Računalom upravljani tribometar

Mihalinec, Dominik

Master's thesis / Diplomski rad

2009

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:174055

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-27**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

D I P L O M S K I R A D

Dominik Mihalinec

Zagreb, 2009.

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

D I P L O M S K I R A D

Mentor

prof.dr.sc. Joško Petrić

Dominik Mihalinec

Zagreb, 2009.

ZAHVALA

Zahvalio bih se svojim roditeljima koji su mi davali veliku podršku tokom moga studiranja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, a naročito sada kod izrade ovog diplomskog rada.

Jednako tako zahvaljujem se asistentima Ivanović Vladimiru i Hrgetić Mariju koji su mi priskočili u pomoć kada sam god trebao neku informaciju vezanu uz moj rad, te mi na taj način omogućili brzi završetak moga diplomskog rada.

Na kraju bih se svakako zahvalio svome mentoru prof. dr. sc. Petrić Jošku koji mi je pristao biti mentor i koji mi je tokom izrade moga diplomskog rada svojim dobrim savjetima omogućio da ovaj rad završim na što bolji način.

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad na temu ˝Računalom vođeni tribometar˝ izradio samostalno koristeći navedenu literaturu, internetske stranice i stručne savjete prof.dr.sc. Petrić Joška, te asistenata Ivanović Vladimira i Hrgetić Marija.

Dominik Mihalinec

_____

Zagreb, zima 2008./09.

SAŽETAK

Ovaj diplomski rad sadrži detaljan opis, način rada, te mogućnosti korištenja računalom vođenog tribometra.

Kako je trenje dio našega života, svuda je prisutno oko nas i omogućuje nam normalan život, često je i štetan čindbenik disipacije pogonske energije. Dakle ono je kod puno stvari korisno, ali može biti i štetno u smislu da gubimo energiju savladavajući ga. Zato je potrebno poznavati to trenje, ući mu u srž postojanja, vidjeti o čemu sve ovisi u nekom stvarnom procesu rada nekog stroja, vidjeti kako silu trenja možemo povećati i kako smanjiti, dakle kako njime upravljati i držati silu trenja u granicama željene. Da bi sve ovo saznali mora postojati uređaj, odnosno stroj koji će biti tako načinjen i opremljen da će moći ispitivati trenje u raznim dinamičkim situacijama gdje se mjenja temperatura, normalna sila, relativna brzina i koeficijent trenja, odnosno sve ono što utjeće na njegovu veličinu u radnom vremenu.

Upravo jedan takav stroj će opisati ovaj diplomski rad, dakle vidjet će se konstrukcijska izvedba takvog stroja, mogućnosti stroja i prikaz samog ispitivanja na takvom stroju. Vidjet će se koliko zapravo ovaj stroj može precizno kontinuirano opisivati silu trenja u vremenskom razdoblju u kojemu se događaju raznorazne promjene parametara koje se također mogu mjeriti jer ne bi opis trenja drugačije bio potpun. Ono što je još zanimljivo je to da ovaj stroj može izvoditi razna druga ispitivanja osim trenja, koja će biti prikazana i spomenuta u ovome radu.

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. UPOZNAVANJE RAČUNALOM VOĐENOG TRIBOMETRA..... 7
2.1 Osnovna ideja projekta..... 7
2.2 Osi gibanja tribometra i osnovni princip rada..... 10
3. MODULI TRIBOMETRA..... 14
3.1 Modul za ostvarivanje horizontalnog linearnog gibanja..... 15
3.2 Modul za ostvarivanje rotacijskog gibanja..... 22
3.3 Modul za ostvarivanje normalne sile pritiska..... 29
3.4 Klima komora i uređaj za klimatizaciju komore..... 43
3.5 Postolje tribometra..... 48
3.6 Montaža tribometra..... 51
4. POGONI TRIBOMETRA..... 56
4.1 Linearni motor za ostvarivanje horizontalnog pravocrtnog gibanja..... 56
4.2 Sinkroni AC servo motor za ostvarivanje rotacije mjernog diska..... 62
4.3 Sinkroni AC servo motor za ostvarivanje normalne sile pritiska na uzorak..... 69
5. SENZORI TRIBOMETRA..... 73
5.1 Senzori mjerenja sila..... 74
5.2 Senzori mjerenja brzina i položaja..... 77
5.3 Senzori mjerenja temperature..... 81
6. KARAKTERISTIKE PARAMETARA TRIBOMETRA 83
6.1 Karakteristike parametara uz konstantnu temperaturu i zanemarivanje deformacije uzoraka..... 84
6.2 Karakteristike parametara uz temperaturnu dinamiku i utjecaj deformacije uzoraka 100
7. MOGUĆNOSTI ISPITIVANJA NA TRIBOMETRU..... 104
7.1 Mjerenje sile trenja kod tarnih parova..... 104
7.2 Ispitivanje opruga..... 114
7.3 Mjerenje sile rezanja..... 118
7.4 Ispitivanje tvrdoće materijala..... 122
7.5 Ostale mogućnosti rada na stroju..... 125
8. ZAKLJUČAK..... 127

LITERATURA..... 129

PRILOG..... 131
A Pogonski motori..... 131
B Vretena i vodilice..... 144
C Senzori..... 156
D Slike modula tribometra prije sklapanja 177
E Tehnički crteži modula tribometra i elemenata za pritezanje uzoraka..... 182

POPIS SLIKA

Slika 1.1.1 Prikaz kontakta tijela o podlogu..... 1

Slika 1.1.2 Dijagramski prikaz ovisnosti sile trenja o brzini kod
različitih vrsta trenja i trošenja..... 2

Slika 1.2.1 Prikaz statičkih tribometara..... 4

Slika 1.2.2 Osnovne metode ispitivanja trenja..... 5

Slika 2.1.1 Osnovna ideja tribometra..... 7

Slika 2.1.2 Model tribometra sa osnovnim dijelovima..... 9

Slika 2.1.3 Model tribometra – linearni motor i zatvorena klima komora..... 9

Slika 2.2.1 Prikaz sheme gibanja linearnog motora – položaj 1..... 10

Slika 2.2.2 Prikaz sheme gibanja linearnog motora – položaj 2..... 10

Slika 2.2.3 Prikaz linearne aksijalne osi i pripadajućeg modula – nulti položaj..... 11

Slika 2.2.4 Prikaz linearne aksijalne osi i pripadajućeg modula – krajnji položaj..... 11

Slika 2.2.5 Prikaz rotacijske osi i pripadajućeg modula – rad na disku..... 12

Slika 3.1.0 Prikaz tribometra sa pripadajućim modulima..... 14

Slika 3.1.1 Prikaz modula za ostvarivanje horizontalnog pravocrtnog gibanja..... 16

Slika 3.1.2 Prikaz monoblokova s vodilicama i sekundarom u poziciji
postavljanja na postolje..... 17

Slika 3.1.3 Prikaz vodilice INA KUVE 25-B-KT-SL sa vagonetom..... 18

Slika 3.1.4 Postavljanje vodilica i sekundara na monoblok linearnog motora..... 18

Slika 3.1.5 Pokretni dio aksijalnog modula – linearni motor sa kolicima..... 19

Slika 3.1.6 Prikaz spajanja spojne motke na nosač linearnog motora..... 19

Slika 3.1.7 Prikaz sastavljanja linearnih kolica..... 20

Slika 3.1.8 Prikaz sastavljanja pokretnog dijela aksijalnog modula..... 21

Slika 3.1.9 Aksijalni modul u stanju rada (harmonijsko gibanje naprijed – nazad)..... 21

Slika 3.2.1 Rotacijski modul tribometra i osnovni podmoduli..... 22

Slika 3.2.2 Prikaz sklapanja motornog sklopa rotacijskog modula..... 23
Slika 3.2.3 Prikaz sklapanja donjeg dijela sklopa rotacijskog diska..... 24
Slika 3.2.4 Prikaz sklapanja srednjeg dijela sklopa rotacijskog diska.....25
Slika 3.2.5 Prikaz postavljanja enkodera na vratilo i nosač enkodera.....26
Slika 3.2.6 Rotacijski enkoder postavljen na nosaču.....26
Slika 3.2.7 Prikaz pasivnog sklopa modula rotacijskog diska.....27
Slika 3.2.8 Postavljanje aktivnog dijela modula diska na sklop.....27
Slika 3.2.9 Prikaz modula rotacijskog diska sa oba diobena para remenica..... 28
Slika 3.3.1 Modul za ostvarivanje normalne sile pritiska.....29
Slika 3.3.2 Cilindar sa sinkronim AC servo motorom.....30
Slika 3.3.3 Senzorska glava..... 30
Slika 3.3.4 Planetarno navojno vreteno..... 31
Slika 3.3.5 Planetarno navojno vreteno tipa RGT 8.1.25 KL10.....32
Slika 3.3.6 Prikaz senzorske glave u rastavnom stanju..... 33
Slika 3.3.7 Prikaz sklapanja senzorske glave – gornji elementi..... 34
Slika 3.3.8 Sklop senzora normalne sile.....35
Slika 3.3.9 Pogled kroz presjek na senzor vertikalne sile..... 36
Slika 3.3.10 Prikaz sklopa senzora koji mjere silu trenja..... 37
Slika 3.3.11 Presjek plovka senzorske glave sa senzorskim podsklopovima.....38
Slika 3.3.12 Prikaz slaganja senzorskih elemenata u sklop.....39
Slika 3.3.13 Prikaz slaganja donjeg sklopa senzorske glave..... 40
Slika 3.3.14 Prikaz mehaničke stege s uzorkom (klin).....40
Slika 3.3.15 Postav modula za ostvarivanje normalne sile na klima komoru..... 41
Slika 3.3.16 Opcije za postavljanje modula senzorske glave na kučište klima komore.....42
Slika 3.4.1 Prikaz klima komore sa prednje strane i sa leđa.....43
Slika 3.4.2 Sastavljanje klima komore..... 44
Slika 3.4.3 Sastavljanje klima komore – uvećani prikaz sa boka.....44

Slika 3.4.4 Sastavljanje klima komore – uvećani prikaz stražnjeg dijela..... 45

Slika 3.4.5 Prikaz klima uređaja sa nosačem..... 46

Slika 3.4.6 Klima komora i klima uređaj smješteni na tribometru..... 47

Slika 3.5.1 Postolje tribometra..... 48

Slika 3.5.2 Prikaz sklapanja postolja tribometra..... 49

Slika 3.5.3 Prikaz sklapanja postolja tribometra – srednji dio.....49

Slika 3.5.4 Sklapanje podnožja postolja..... 50

Slika 3.6.1 Postavljanje linearnog aksijalnog modula..... 51

Slika 3.6.2 Postavljanje modula rotacijskog diska na postolje..... 51

Slika 3.6.3 Modul rotacijskog diska postavljen na postolju – aktivno stanje..... 52

Slika 3.6.4 Modul rotacijskog diska postavljen na postolju – pasivno stanje..... 53

Slika 3.6.5 Postavljanje klima komore na postolje tribometra..... 53

Slika 3.6.6 Postavljanje klima uređaja na tribometar..... 54

Slika 3.6.7 Postavljanje modula senzorske glave na klima komoru..... 54

Slika 3.6.8 Prikaz modela gotovog tribometra..... 55

Slika 4.1.1 Prikaz primara i sekundara u gibanju..... 58

Slika 4.1.2 Linearni motor..... 58

Slika 4.1.3 Stvarni prikaz linearnog motora – primar..... 60

Slika 4.1.4 Odnos relativne brzine i položaja linearnog motora uz maksimalnu silu 61

Slika 4.2.1 Sinkroni AC servo motor tipa SIEMENS, tip 1FT6 6KW7 – model..... 63

Slika 4.2.2 Dijagramski prikaz ovisnosti maksimalne sile trenja na disku o radnom radijusu za oba prijenosna omjera..... 67

Slika 4.2.3 Sinkroni AC servo motori marke SIEMENS, tip 1FT6 062 6WK7 (srednji)..... 68

Slika 4.2.4 Zupčasti remen tipa HTD..... 68

Slika 4.2.5 Remenice za zupčaste remene..... 68

Slika 4.3.1 Sinkroni AC servo motori marke SIEMENS, tip 1FT6 024 6AK7 (najmanji s desna).....71

Slika 4.3.2 Dijagramski prikaz ovisnosti zakreta motora i vertikalnog pomaka klipa..... 71

Slika 5.1.1 Shema rada tenzometarskog senzora..... 74

Slika 5.1.2 Shema djelovanja tenzometarskog senzora..... 74

Slika 5.1.3 Tenzometarski senzor sile model LC 307 – 1K..... 76

Slika 5.1.4 Pojačalo senzora sile tipa RM 4220..... 76

Slika 5.2.1 Princip rada enkodera..... 77

Slika 5.2.2 10 – bitni kodni disk..... 77

Slika 5.2.3 Izlazni signal inkrementalnog enkodera..... 78

Slika 5.2.4 Montiranje linearnog apsolutnog enkodera na linearni modul..... 79

Slika 5.2.5 Prikaz ponašanja linearnog enkodera uslijed rada linearnog motora..... 79

Slika 5.2.6 Rotacijski enkoder..... 80

Slika 5.2.7 Linearni enkoder tipa LC 481..... 80

Slika 5.3.1 Princip djelovanja termopara..... 81

Slika 6.1.1 Ovisnost sile linearnog motora o vremenu..... 85

Slika 6.1.2 Ovisnost ubrzanja linearnog motora o vremenu..... 85

Slika 6.1.3 Ovisnost brzine linearnog motora o vremenu..... 86

Slika 6.1.4 Ovisnost položaja mjernih kolica linearnog modula o vremenu..... 87

Slika 6.1.5 Ovisnost sile linearnog motora o vremenu za max. stacionarnu brzinu..... 89

Slika 6.1.6 Ovisnost akceleracije linearnog motora o vremenu za max. stacionarnu brzinu.... 89

Slika 6.1.7 Ovisnost brzine linearnog motora o vremenu za max. stacionarnu brzinu..... 90

Slika 6.1.8 Ovisnost položaja linearnog motora o vremenu – max brzina
i brzina kod maksimalne sile..... 91

Slika 6.1.9 Ovisnost snage linearnog motora o vremenu..... 92

Slika 6.1.10 Ovisnost stacionarne brzine linearnog motora o faktorima k_1 i k_2..... 93

Slika 6.1.11 Ovisnost stacionarne brzine linearnog motora o faktoru puta ubrzanja k_2..... 94

Slika 6.1.12 Ovisnost stacionarne brzine linearnog motora o faktoru
povećanja akceleracije k_1..... 94

Slika 6.1.13 Ovisnost stacionarne brzine linearnog motora o faktorima k_2 i k_3..... 95

Slika 6.1.14 Ovisnost vremena ubrzanja linearnog motora o faktorima k_1 i k_2..... 97

Slika 6.1.15 Ovisnost sile trenja o relativnoj brzini – dopušteni limiti na linearnom modulu.... 98

Slika 6.1.16 Ovisnost brzine klizanja rotacijskog diska o radnom radijusu diska..... 99

Slika 6.1.17 Ovisnost brzine klizanja rotacijskog diska o radnom radijusu i učestalosti vrtnje diska..... 99

Slika 6.2.1 Prikaz uzorka sa dimenzijama..... 101

Slika 6.2.2 Smanjenje normalne sile usred odnošenja materijala..... 102

Slika 7.1.1 Prikaz uzoraka za ispitivanje trenja i trošenja sa pripadnim nosačima..... 106

Slika 7.1.2 Prikaz mehaničke stege sa nosačem i uzorkom u obliku klina..... 107

Slika 7.1.3 Mehanička stega sa nosačem i uzorkom u obliku klina u rastavljenom stanju..... 108

Slika 7.1.4 Prikaz stvarnog rada na rotacijskom disku metodom pin on disk..... 109

Slika 7.1.5 Prikaz programskog pračenja zbivanja procesa na računalu..... 110

Slika 7.1.6 Mikroskopski prikaz površine uzorka nakon ispitivanja 110

Slika 7.1.7 Prikaz postavljanja uzorka (kuglice) sa pripadajućim nosačem na stegu..... 111

Slika 7.1.8 Prikaz rada metode kuglice na ploči..... 112

Slika 7.1.9 Prikaz procesa rada na linearnom modulu..... 113

Slika 7.2.1 Naprava za prihvat tlačnih opruga unutarnjih promjera 5-10 mm..... 115

Slika 7.2.2 Prikaz postavljene opruge između linearnih kolica i senzorske glave..... 115

Slika 7.2.3 Opruga u početnom neopterećenom položaju..... 116

Slika 7.2.4 Opruga u krajnjem opterećenom položaju..... 116

Slika 7.3.1 Nož za ispitivanje sila rezanja učvršćen sa steznim čeljustima..... 118

Slika 7.3.2 Proces ispitivanja sile rezanja na obratku 120

Slika 7.3.3 Prikaz djelovanja sila rezanja 120

Slika 7.4.1 Prikaz ispitivanja tvrdoće Rockwellovim postupkom..... 122

Slika 7.4.2 Uzorak opterećen silom utiskivača..... 123

Slika 7.4.3 Otisak na površini materijala nakon ispitivanja tvrdoće 124

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIČKIH VELIČINA

α..... Koeficijent linearnog temperaturnog produljenja materijala, 1/K

A..... Površina uzorka na koju djeluje normalna sila, mm^2

A_1..... Površina gornjeg uzorka, mm^2

A_2..... Površina donjeg uzorka, mm^2

$a_{max,acc}$..... Maksimalno ubrzanje tereta linearnog modula, m/s^2

$a_{max,ret}$..... Maksimalno usporenje tereta linearnog modula, m/s^2

$a_{HS\text{-}TEC}$..... Preporučeno ubrzanje i usporenje proizvođača, m/s^2

a_{vmax}..... Akceleracija za postizanje maksimalne brzine i minimalnog stacionarnog puta, m/s^2

b..... Debljina diska, mm

d..... Promjer diska, mm

d_0..... Nazivni promjer vretena okomitog modula, mm

dF_N..... Diferencijal normalne sile, N

dF_f..... Diferencijal sile trenja, N

$d\mu$..... Diferencijal faktora trenja

dv..... Diferencijal relativne brzine, mm

$\Delta F_{N,nep}$..... Povećanje ili smanjenje normalne sile usred nepoznatog uzroka, N

$\Delta F_{N,T}$..... Povećanje normalne sile usred povećanja temperature, N

$\Delta F_{N,T1}$..... Povećanje normalne sile usred pokušaja produljenja gornjeg uzorka, N

$\Delta F_{N,T2}$..... Povećanje normalne sile usred pokušaja produljenja donjeg uzorka, N

$\Delta F_{N,troš}$..... Povećanje normalne sile radi trošenja površine, N

Δl..... Produljenje uzorka u smjeru sile pritiska, mm

Δl_1..... Produljenje gornjeg uzorka usred djelovanja topline, mm

Δl_2..... Produljenje donjeg uzorka usred djelovanja topline, mm

Δl_{el1}..... Elastična deformacija površine djelovanjem norm. sile prije odnošenja materijala, mm

Δl_{el2}..... Elastična deformacija površine djelovanjem norm. sile nakon odnošenja materijala, mm

Δl_{om}..... Debljina odnešenog materijala, mm

Δl_{opr}..... Elastična deformacija opruge, mm

ΔR..... Prirast otpora senzora sile usred djelovanja sile, Ω

ΔT..... Prirast temperature, K

E..... Youngov modul elastičnosti, N/mm^2

E_1..... Youngov modul elastičnosti gornjeg uzorka, N/mm^2

E_2..... Youngov modul elastičnosti donjeg uzorka, N/mm^2

η_1..... Iskoristivost navojnog vretena pri zatezanju

F_f..... Sila otpora (trenja), N

F_f..... Sila otpora (trenja), N

$F_{f,max}$..... Maksimalna sila trenja, N

$F_{f,max(i=1)}$... Maksimalna sila trenja kod prijenosnog omjera i = 1– prema mogućnosti frekv.pretv., N

$F'_{f,max(i=1)}$.. Maksimalna sila trenja kod prijenosnog omjera i = 1 – prema mogućnosti motora, N

$F'_{f,r2}$..... Maksimalna sila trenja na maksimalnom radijusu – prema mogućnosti motora, N

$F_{f,r2}$..... Maksimalna sila trenja na maksimalnom radijusu – prema mogućnosti frekv.pretv., N

$F_{f,min(i=1)}$... Minimalna sila trenja kod prijenosnog omjera i = 1 – prema mogućnosti frekv.pretv., N

$F'_{f,min(i=1)}$.. Minimalna sila trenja kod prijenosnog omjera i = 1 – prema mogućnosti motora, N

F_i..... Maksimalna sila kod maksimalno moguće brzine na linearnom modulu, N

$F_{HS\text{-}TEC,max}$ Maksimalna sila linearnog motora uz HS-TEC-ov režim rada, N

F_{max}..... Maksimalna sila motora, N

F_N..... Nazivna sila motora, N

$F_{N,max}$..... Maksimalna normalna sila pritiska – predviđena, N

$F_{N,real}$..... Maksimalna stvarna normalna sila uz maksimalni moment motora, N

F_{N1}..... Normalna sila nakon djelovanja procesa, N

F_{N2}..... Početna narinuta normalna sila, N

F_{opr}..... Sila u ispitivanoj opruzi, N

F_{tr}..... Sila trenja (općenito), N

F_{trC}..... Coulombova sila trenja – viskozna, N

F_{trS} ..... Statička sila trenja, N

F_{vmax}..... Sila linearnog motora za postizanje maksimalne brzine i minimalnog stac. puta, N

f_{titr}..... Frekvencija titranja linearnih kolica, min^{-1}

F_c ..... Glavna sila rezanja, N

F_p ..... Natražna sila rezanja, N

F_R ..... Rezultantna sila rezanja, N

F_0 ..... Početna sila kod ispitivanja tvrdoće materijala, N

F_{dod} ..... Dodatna sila kod ispitivanja tvrdoće materijala, N

F_{uk} ..... Ukupna sila kod ispitivanja tvrdoće materijala, N

h_0..... Početna dubina utiska utiskivača kod ispitivanja tvrdoće materijala, mm

h_{uk}..... Ukupna dubina utiska utiskivača kod ispitivanja tvrdoće materijala, mm

I_0..... Struja kratkog spoja motora, A

I_{max}..... Maksimalna struja motora, A

I_N..... Nazivna struja motora, A

J..... Moment inercije rotacijskog modula, kgm^2

J_m..... Moment inercije motora okomitog modula, kgm^2

k_1..... Faktor povećanja ubrzanja

k_2..... Faktor povećanja puta ubrzanja

k_3..... Faktor dužine staze

k_{om}..... Koeficijent vertikalnog pomaka klipa spram kuta zakreta motora

k_R..... Faktor trenja vretena

$K_{troš}$..... Konstanta trošenja

l..... Dužina uzorka u smjeru djelovanja normalne sile (l = b), mm

l_1..... Dužina gornjeg uzorka, mm

l_2..... Dužina donjeg uzorka, mm

μ..... Faktor trenja

m..... Masa gibajućeg tijela, kg

mg..... Sila uslijed mase tijela, N

m_m..... Masa motora, kg

m_{om}..... Masa motora okomitog modula, kg

M_0..... Pokretni moment motora, Nm

M_N..... Nazivni moment motora, Nm

M_{disc1}..... Maksimalni moment diska na najmanjem radnom radijusu diska, Nm

M_{disc2}..... Maksimalni moment diska na najvećem radnom radijusu diska, Nm

M_{mot1}..... Maksimalni moment motora kod najmanjeg radnog radijusa diska, Nm

M_{mot2}..... Maksimalni moment motora kod najvećeg radnog radijusa diska, Nm

M_{mot3}..... Moment opterećenja motora kod brzine klizanja 10 m/s za max. opterećenje, Nm

M_t..... Maksimalni okretni moment motora okomitog modula, Nm

n..... Učestalost vrtnje motora, min^{-1}

$Q_{RV,min}$..... Protok rashladne vode kroz motor, m^3/s

P..... Broj parova polova motora

P_{max}..... Maksimalna snaga (općenito), kW

$P_{lm,max}$..... Maksimalna snaga linearnog motora, kW

P_N..... Nazivna snaga motora, kW

P_m..... Korak matice po okretaju vretena, mm

P_z..... Navojni korak vretena, mm

R_1, R_2, R_3, R_4..... Otpornici mosnog spoja senzora sila, Ω

r_{actic}..... Radni radijus diska, mm

r_1..... Minimalni radijus diska, mm

r_2..... Maksimalni radijus diska, mm

r_{Fmax}..... Najveći radijus gdje još djeluje maksimalna sila trenja, mm

r_{vmax}..... Radijus diska gdje djeluje brzina klizanja od 10 m/s, mm

s_{acc}..... Put ubrzanja kod maksimalnog ubrzanja linearnog modula, mm

$s_{acc,HS\text{-}TEC}$.. Put ubrzanja i usporenja uz HS-TEC-ovu preporuku, mm

$s_{acc,max}$..... Maksimalni put ubrzanja linearnog modula, mm

$s_{acc/stop,2.5g}$.. Put ubrzanja i usporenja kod preporučenog ubrzanja linearnog motora, mm

s_{jed}..... Jedinična dužina staze linearnog modula u jednom smjeru, mm

$s_{jed,acc}$..... Jedinični put ubrzanja, mm

s_{stac}..... Stacionarni put linearnog motora, mm

$s_{stac,jed}$..... Jedinični stacionarni put, mm

$s_{stac,min}$..... Minimalni stacionarni put gibanja linearnog modula, mm

s_{stop}..... Put zaustavljanja kod maksimalnog usporavanja linearnog modula, mm

t_{acc}..... Vrijeme ubrzanja linearnog motora, s

$t_{acc,jed}$..... Jedinično vrijeme ubrzanja linearnog motora, s

t_{stac}..... Vrijeme stacionarnog gibanja linearnog motora, s

$t_{stac,jed}$..... Jedinično vrijeme stacionarnog gibanja linearnog motora, s

t_{uk}..... Ukupno vrijeme gibanja jednog polukoraka linearnog motora (jedan smjer), s

U..... Napon napajanja senzora sile, V

U_0..... Mosni napon senzora sile, mV

U_{ZK}..... Napon napajanja primara linearnog motora, V

v..... Obodna brzina (opći izraz), m/s

v_c..... Brzina rezanja, m/s

v_f..... Posmična brzina, m/s

$v_{d,kliz}$..... Brzina klizanja diska, m/s

$v_{HS\text{-}TEC,max}$ Maksimalna brzina linearnog motora, m/s

v_i..... Maksimalna postiziva brzina na linearnom modulu tribometra, m/s

v_{jed}..... Stacionarna jedinična brzina, m/s

v_{max}..... Maksimalna brzina linearnog motora, m/s

$v_{max,Fmax}$.... Maksimalna brzina pri maksimalnoj sili, m/s

$v_{max,Fn}$..... Maksimalna brzina pri nazivnoj sili, m/s

$v_{sliding1}$..... Brzina klizanja na najmanjem radnom radijusu r_1, m/s

$v_{sliding2}$..... Brzina klizanja na najvećem radnom radijusu r_2, m/s

$v_{sliding3}$..... Brzina klizanja na radnom radijusu r_{Fmax}, m/s

$v_{sliding1(i=1)}$.. Brzina klizanja na najmanjem radnom radijusu r_1 za diobeni omjer i = 1, m/s

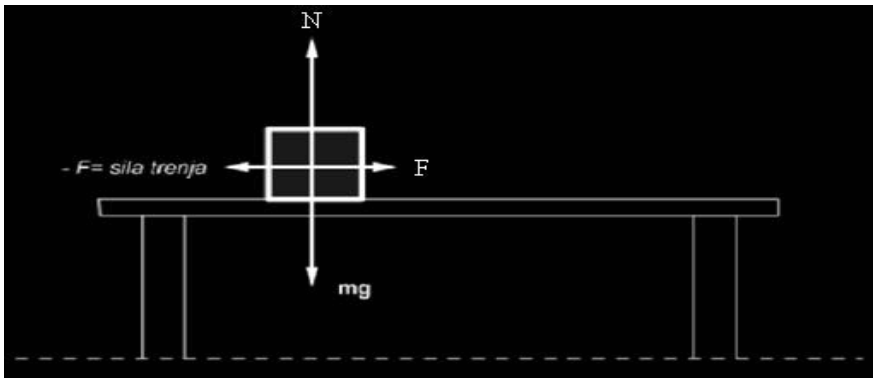
$v_{sliding2(i=1)}$.. Brzina klizanja na najvećem radnom radijusu r_2 za diobeni omjer i = 1, m/s

ω_{mot}..... Kutna brzina motora, s^{-1}

1. UVOD

Sila trenja je prisutna svugdje oko nas gdje postoji relativno gibanje između dva tijela, odnosno to je sila trljanja između dva tijela koja se relativno gibaju jedan spram drugoga. Ona je direktno ovisna o okomitoj sili na površinu tijela koja se naziva normalna sila ili sila pritiska na površinu i o faktoru trenja koji ovisi o stanju površine (hrapavosti) i o sparenim materijalima dvaju tijela u dodiru. Normalna sila najčešće je težina tijela, ako je podloga horizontalna i nema dodatne sile pritiska izvana, a ako se radi o kosoj podlozi onda je normalna sila okomiti dio gravitacijske sile na površinu.

Sila trenja može biti statička i dinamička. Ako tijelo stoji na površini potrebno je neko vrijeme da se tijelo pokrene, odnosno ako se tijelo polako počne gurati silom od nule do neke određene, kod koje će se tijelo pokrenuti, iz zakona akcije i reakcije može se zaključiti da je sila trenja ovdje jednaka sili guranja, znači linearno se povećava kako mi povećavamo silu guranja. To je statičko trenje. Kada se tijelo pokrene sila trenja malo padne i ostane konstantna dalje bez obzira na brzinu, ako je trenje suho ili polusuho (kada postoji kontakt krutih površina). Dinamičko trenje može biti i viskozno i ono je linearno ovisno o brzini. Trenje ne ovisi o veličini površine, nego samo o njezinom stanju.

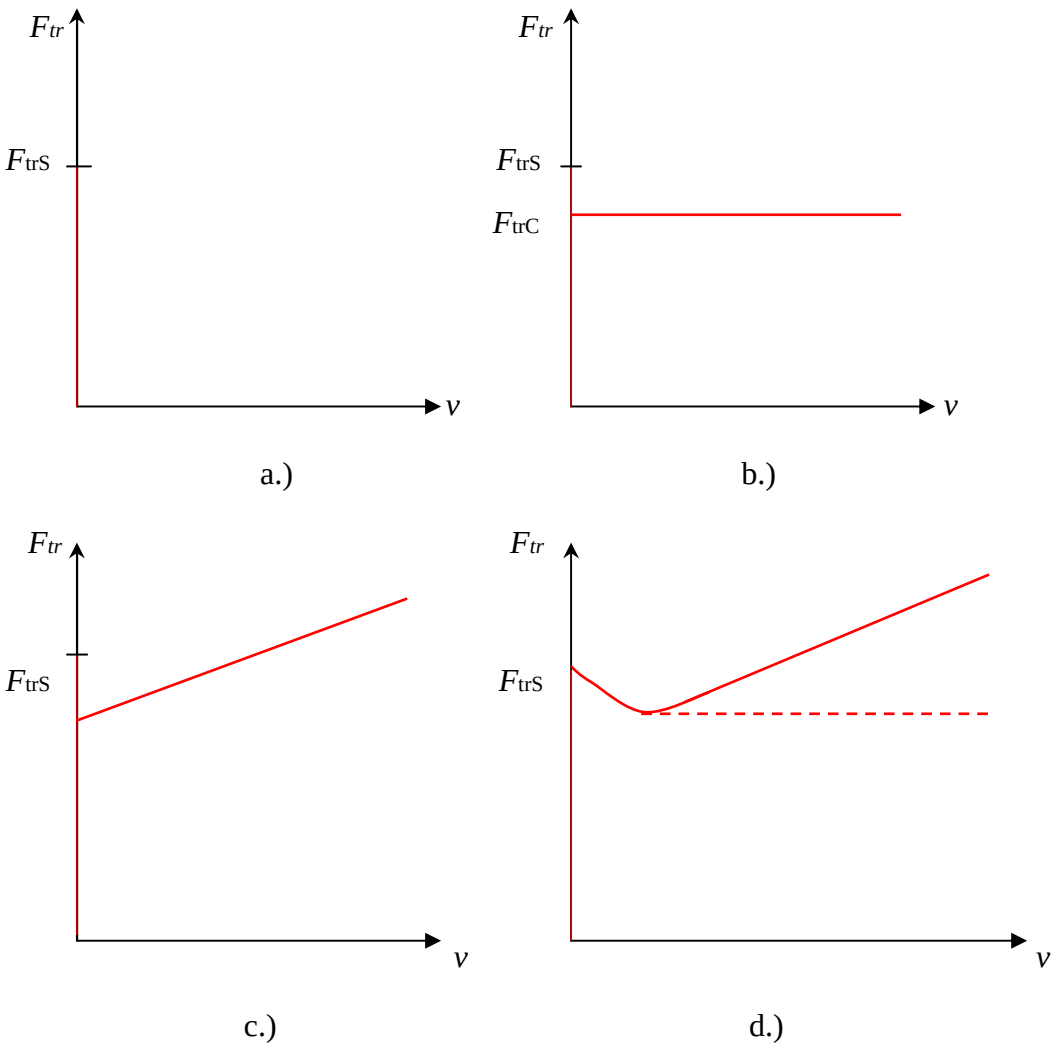


Slika 1.1.1 *Prikaz kontakta tijela o podlogu*

Slika 1.1.1 prikazuje princip trenja. Ako tijelo vućemo silom ***F***, radi sile uslijed mase tijela ***mg*** se pojavljuje sila trenja koja je linearno proporcionalna normalnoj sili reakcije površine na težinu (***N***).

Trenje se još dijeli na trenje valjanja i trenje klizanja. Trenje valjanja je znatno manje nego trenje klizanja i zato se trenje klizanja nastoji izbjeći i zamijeniti gdje god se može sa trenjem valjanja.

Zamislimo da imamo role i da želimo iskoračiti s njima. To bi učinili puno teže nego kada normalno zakoračimo, jer pomoću rola radi malog trenja se teško pokrećemo, što je i dokaz ovome.



Slika. 1.1.2 *Dijagramski prikaz ovisnosti sile trenja o brzini kod različitih vrsta trenja i trošenja*

Dijagrami na slici *1.1.2* prikazuju ovisnost sile trenja (F_{tr}) o brzini (v) pri različitim oblicima trenja.

Slika *1.1.2a* prikazuje čisto statičko trenje (F_{trS}) koje ne ovisi o brzini jer djeluje dok tijelo miruje.

Slika *1.1.2b* prikazuje statičko (mirovanje) i dinamičko (Coulomb-ovo) suho trenje (F_{trC}) (gibanje) koje ne ovisi o brzini iako se tijelo giba (trenje među krutim tijelima).

Slika *1.1.2c* prikazuje statičko trenje i dinamičko viskozno trenje koje ovisi linearno o brzini.

Vidljivo je kao i kod prethodnog dijagrama kako je dinamičko trenje manje od statičkog (ovdje pri malim brzinama).

Ovo trenje je slučaj za trenje među slojevima tekučina, te za slučaj kada postoji dodir krutog i tekućeg tijela.

Slika *1.1.2d* prikazuje **Stribeck-ov efekt**. On kazuje da trenje ne pada naglo pri pokretanju već pada lagano do neke brzine. Dalje se trenje ponaša s obzirom kakve je vrste (viskozno ili suho).

Da bi se trenje moglo ispitivati i pratiti koliki je iznos sile trenja moramo posjedovati jednu napravu koja svojom konstrukcijskom izvedbom zadovoljava mogućnost ispitivanja sile trenja. Takve naprave se zovu tribometri. Svaki tribometar bi morao imati barem dvije osi gibanja kako bi uredno ispunjavao svoju zadaću bez poteškoća. Svaka dodana os iza toga je dodatna mogućnost toga stroja.

Jedna od dviju nužnih osi trebala bi ostvarivati linearno gibanje normalne sile koja je u smjeru te osi. Takvo linearno gibanje bi ostvarivalo normalnu silu pritiska na uzorak. Druga od dviju nužnih osi bila bi os kružnog ili pravocrtnog gibanja. Ako je gibanje pravocrtno onda je ta os u smjeru gibanja i sila trenja se ostvaruje uzduž te osi. Ako li je ta os kružnog gibanja, sila trenja će biti u mimoilaznom okomitom pravcu s tom osi. Kako je sila trenja okomita na normalnu silu, tako se os normalne sile mora prilagoditi osi trenja da bi to funkcioniralo.

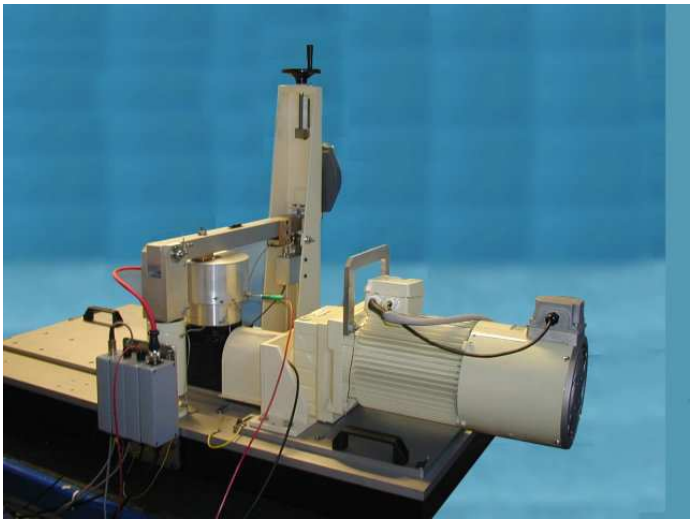
Najčešći tribometri su posve jednostavni instrumenti koji su krajnje jednostavne varijante. Oni imaju najčešće rotacijsku os ostvarivanja trenja koju pogoni asikroni motor sa mogućnošću promjene brzine gibanja i neku gredu smještenu tako da se na nju pričvrsti klin, prsten ili kuglica u sredini. Jedan kraj je posve pričvrćen, a na drugi je spojena vaga ili dinamometar koji mjeri promjenu normalne sile prilikom kratkog djelovanja stroja. Nakon par mjerenja uzima se srednja vrijednost normalne sile. Principom indirektnog mjerenja sila trenja pomoću normalne sile koja joj je proporcionalna ne može se puno otkriti iz takvog stroja jer je puno više čindbenika koji utječu na trenje i često bismo voljeli vidjeti kako sve to funkcionira ako bismo sve te čindbenike uključili u igru i upravljali njima, te da silu trenja promatramo kontinuirano kako se kreće u vremenu uz porast ili pad jednog ili više čindbenika koji utječu na samo trenje. Dosad opisani strojevi su ***statički strojevi za ispitivanje trenja***.

Kako su danas zahtjevi za točnošću i preciznošću sve veći, zahtjeva se od nas da načinimo neki stroj koji bi mogao trenje doslovce pratiti kako se kreće uz promjenu parametara koje možemo mjeriti, a isto tako i upravljati njima. Takav stroj sa tolikim zahtjevima spadao bi u skupinu ***dinamičkih tribometara***.

Dinamički tribometri su mjerni uređaji koji su sposobni ispitivati trenje između dva uzorka na način da kontinuirano prate ne samo silu trenja, nego i parametre stroja koji utjeću na tu silu, te pomoću regulacije smanjuje grešku ispitivanja na minimum.

Na taj se način prati točan iznos sile trenja u svakom mjernom trenutku i taj iznos se može pratiti na računalu, može ga se snimiti, te iza toga raditi sa njime na računalu što se želi. Može se pomoću programa raditi i obrnuto, da se postavi sila trenja, te da se prati nešto drugo, npr. zagrijavanje obloga koje se taru.

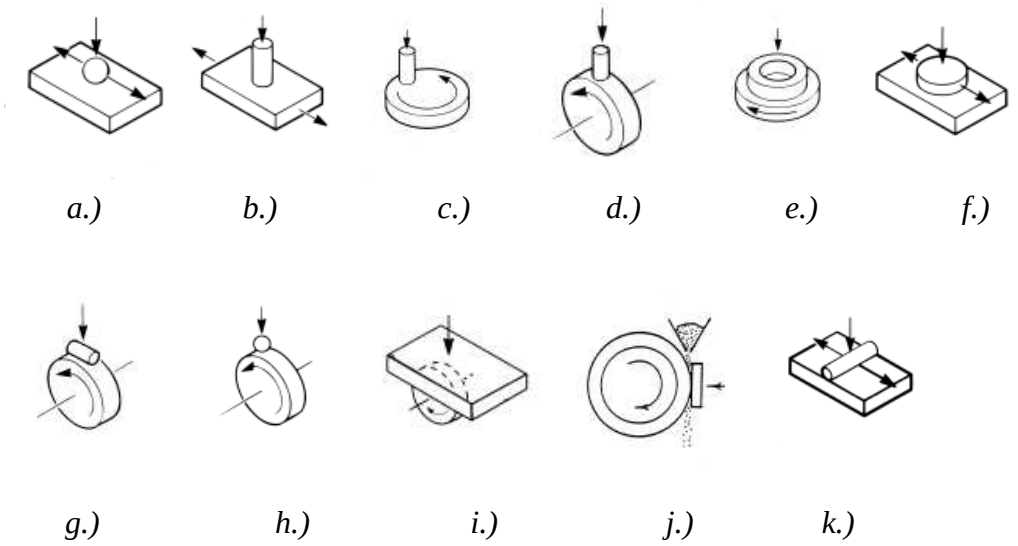
Osim ovoga ovi tribometri su jako fleksibilne građe te mogu vršiti raznorazna druga ispitivanja koja se ne moraju vezati uz trenje. Primjerice, može se ispitivati čvrstoća i tvrdoća materijala, može se mjeriti sila rezanja kod obrade odvajanja čestica, mogu se ispitivati opruge, sile hvatanja na hvataljkama robota i još mnoge druge stvari.



Slika 1.2.1 *Prikaz statičkih tribometara*

Ideja za samim dinamičkim tribometrom pojavila se kada je došlo do potrebe da se trenju uđe dublje u trag, da ga se prati i da se vidi što sve utjeće na njegovu veličinu. Dosad statički tribometar nije bio dosta tehnički opremljen da zadovolji sve te kriterije. Sila trenja nikako ne ovisi samo o normalnoj sili pritiska koja se tako često spominje kao glavni proporcionalni pratitelj sile trenja. Trenje je puno dublje, jer ako se primjerice mijenja temperatura s vremenom u kojem trenje djeluje, ako se još u isto vrijeme dodaje neki abraziv ili s druge strane mazivo između dvije ispitivane površine, pa ako se počne mijenjati relativna brzinu gibanja tijela te se nakon toga izmjeri sila trenja, ona će biti posve drugačija. Koji je od ovih svih pripadajućih elemenata na koji način pridonio toj promjeni, ne zna se, no voljeli bismo znati. Upravo to će raditi dinamički tribometar.

Ono od čega treba krenuti su osnovni principi ispitivanja trenja. Njih ima puno, no ako se želi da stroj bude fleksibilan i da može obavljati većinu takvih ispitivanja mora ga se dobro opremiti. Većina osnovnih metoda ispitivanja trenja navedeno je na slijedećim slikama.



Slika 1.2.2 *Osnovne metode ispitivanja trenja*

Metoda na slici *1.2.2a* prikazuje metodu kuglica na ploči (ball on plate). Glavno gibanje vrši kuglica koja se pravocrtno giba lijevo – desno po ploči.

Metoda na slici *1.2.2b* je metoda klin na ploči (pin on plate). Funkcionira isto kao i prethodna metoda samo što je ovdje umjesto kuglice postavljen klin, tj. valjčić manjeg promjera od svoje dužine.

Treća metoda na slici *1.2.2c* zove se metoda klin na disku (pin on disk). Ovdje klin pritišće o čeonu podlogu diska koja izvodi glavno rotacijsko gibanje.

Metoda na slici *1.2.2d* je metoda klin na prstenu (pin on ring). Glavno kružno gibanje izvodi prsten dok na njegovu valjčastu površinu pritišće klin.

Metoda na slici *1.2.2e* zove se metoda prsten na disku (ring on disk). Glavno gibanje izvodi kružni disk a na njemu je postavljen kružni prsten koji se čeono ispituje.

Metoda na slici *1.2.2f* je metoda blok na ploči (block on plate). Glavno gibanje je pravocrtno a izvodi ga blok koji čeono pritišće na ploču.

Metoda na slici *1.2.2g* zove se metoda klin na prstenu, no ovaj put je klin za razliku od metode na slici 1.2.2*d* smješten tako da svojim obodnim dijelom pritišće na obodni dio prstena dok su im osi okomite i mimoilazne. Prsten izvodi glavno kružno gibanje.

Metoda na slici *1.2.2h* zove se metoda kuglica na prstenu (ball on ring). Sve je isto kao i kod prethodne metode, no umjesto klina se upotrebljava kuglica.

Metoda na slici *1.2.2i* naziva se metoda ploče na prstenu (plate on ring). Glavno kružno gibanje izvodi prsten, dok ploča pritišće na njegov obod.

Metoda na slici *1.2.2j* naziva se metoda ispitivanja trošenja uz dodatak abraziva. Disk se vrti i na njegov obod se dodaje abraziv koje se uz sam obod diska pritiće dodatnom pločom.

Metoda na slici *1.2.2k* naziva se metoda valjak na ploči (cylinder on plate). Zasniva se tako da glavno pravocrtno gibanje izvodi valjak koji se obodno valja po po površini ploče i pritišće obodno na nju.

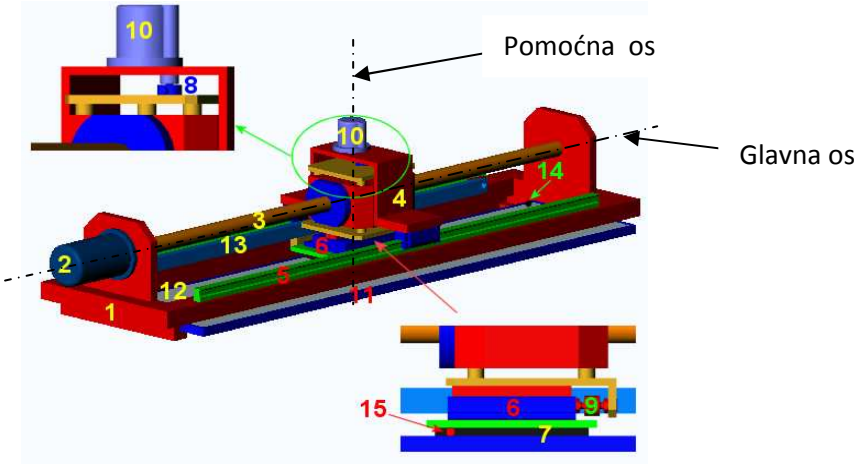
Više o statičkim tribometrima i trenju može se saznati iz **literature [1....4]**.

2. UPOZNAVANJE RAČUNALOM VOĐENOG TRIBOMETRA

2.1 OSNOVNA IDEJA PROJEKTA

Tribometar o kojemu će se dalje pričati spada u grupu dinamičkih tribometara. Kako postoji sve više zahtjeva za ispitivanje trenja pod različitim dinamičkim uvjetima, statički tribometri ne mogu vršiti ovakva ispitivanja, pa se pojavila ideja da se napravi uređaj, tj. stroj koji je u stanju ispitivati gotovo sve što se veže uz trenje, pa i šire. On treba biti veoma precizan i treba podatke ispitivanja prikazivati kontinuirano u vremenu, na način da se ti podaci mogu snimati i spremati.

Osnova od kud početi s realizacijom ovakvog stroja je određivanje broja osi gibanja stroja i njihov položaj u na stroju. Svaki bi tribometar trebao imati najmanje dvije osi gibanja da bi mogao ispitivati neki uzorak. Jedna os je za ostvarivanje normalne sile pritiska, a druga za ostvarivanje relativnog gibanja, tj. sile trenja. Slijedeća slika prikazuje osnovnu ideju takvog stroja.



Slika 2.1.1 *Osnovna ideja tribometra*

Glavni dijelovi ovakvog tribometra bili bi: ***postolje (1), motor za osnivanje glavnog gibanja (2), glavno radno vreteno (3), klizač (4), vodilice (5), temeljna ploča (7), senzori vertikalnih sila (8), senzori horizontalnih sila (9) i pritiskalica (10)***

Ovakvom izvedbom stroja sa dvije linearne osi moglo bi se vršiti tri od navedenih metoda u uvodnom poglavlju i to metoda klin na ploči (*Slika 1.2.2a*), kuglica na ploči (*Slika 1.2.2b*) i blok na ploči (*Slika 1.2.2f*).

Kako bi se proširilo djelovanje stroja uvest će se još jedna os i to kružna os kako bi se mogle vršiti još dvije metode ispitivanja trenja i to metode na disku – metoda klin na disku (*Slika 1.2.2c*) i metoda prsten na disku (*Slika 1.2.2e*).

Ova os bila bi smještena kako se vidi paralelno sa osi normalne sile pritiska. Da se doda još jedna rotacijska os okomita na ovu okomitu os, stroj bi mogao realizirati gotovo sve postojeće metode ispitivanja trenja. No kako su neke metode rijetke jednostavno se ne isplati raditi takav stroj koji ne iskorištava barem većinom svog radnog vijeka svoje mogućnosti. Tada je ekonomski neisplativ.

Dakle uzima se strategija da se načini stroj sa tri osi gibanja. Rotacijskom osi, aksijalnom i vertikalnom osi gibanja. Rotacijska os bi se pri tome postavila vertikalno.

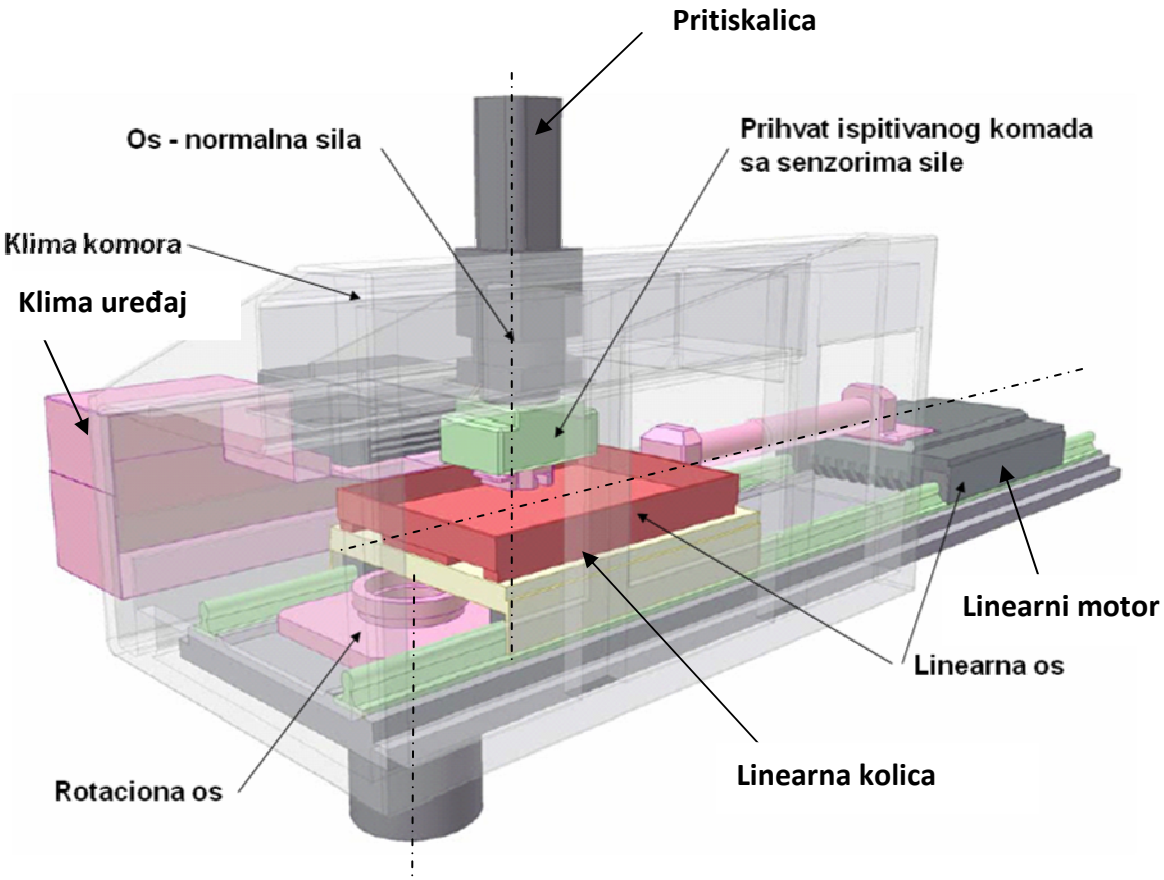
Da bi se osnovalo neko gibanje moraju postojati pogonski strojevi koji će pokretati izvršne elemente koji realiziraju određeni rad. Kako su ovdje tri osi na koje smo se odlučili, morala bi postojati tri servo motora koji će svaki pojedinačno upravljati svojom osi. Da bi se smanjili gubici razvijen je princip da se izbjegnu prijenosni omjeri i da se ide ako je moguće na direktnu brzinu gibanja i silu s električnog motora, bez prijenosnih omjera i elemenata pretvorbe rotacijskog gibanja u pravocrtno. Za aksijalno linearno gibanje se zato uzima linearni sinkroni servo motor koji ima najbolju iskoristivost u odnosu na rotacijski motor koji linearno gibanje izvodi preko mehaničkog pretvornika gibanja. Druga dva će biti AC sinkrona servo motora za pogon vertikalne osi i rotacijske osi.

Da bi stroj bio precizan i da bi mogao pratiti trenje mora imati ugrađenu regulaciju. Svaka regulacija zahtjeva da stroj posjeduje senzore koji registriraju postojeće stanje i informiraju upravljački sustav o stanju. Strojem će upravljati računalo, dakle ono će biti centralni dio stroja koje će nadzirati stanje na stroju i upravljati njime. Senzori moraju biti postavljeni na stroju i to na mjestima na kojima će moći mjeriti stanja bez velikih grešaka, jer ako oni krivo pokazuju stanje, onda se neće moći očitati točni podaci sile trenja. Senzori koji će se ovdje primijeniti su: senzori sile koji će mjeriti sile u vertikalnoj ravnini (normalnu silu) i sile u horizontalnoj ravnini (silu trenja), senzori temperature koji će mjeriti temperaturu ispitivane površine i medija za podmazivanje, senzori relativne brzine gibanja dvaju tijela podvrgnutih ispitivanju, te senzor položaja koji će mjeriti položaj tijela u pokretu kako bi mogli u svakom trenutku znati njegov položaj.

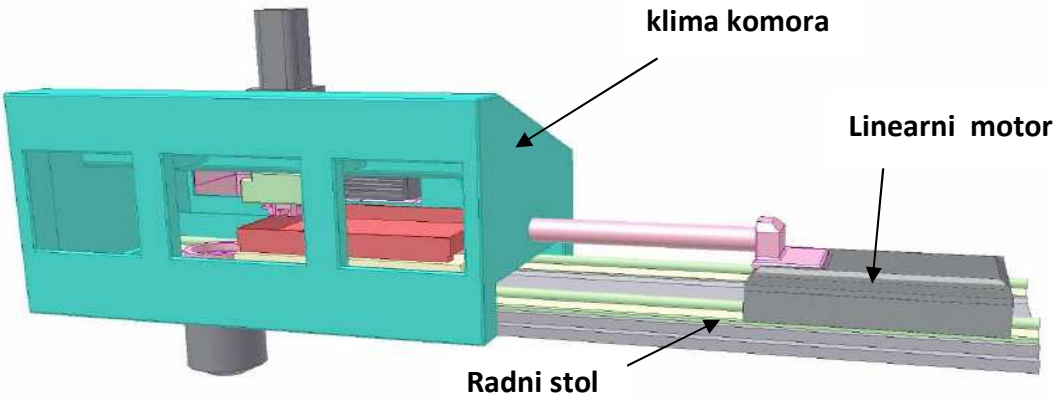
Da se može regulirati temperatura, osim senzora potrebno je imati klima uređaj koji će održavati zadanu temperaturu. Upravo se radi toga mora radno mjesto odvojiti od okoline pomoću klima komore koja će biti izolirana i koja neće dozvoljavati velike gubitke topline. Time će se temperatura moći držati pod nadzorom tijekom procesa.

Sve što je spomenuto treba posložiti na neko postolje koje će odoljevati vibracijama i ispunjavati točnost i stabilnost sustava.

Sljedeće slike (*2.1.2* i *2.1.3*) prikazuju model stroja kakvog bismo željeli sa osnovnim dijelovima za funkcionalnost stroja (**literatura [5]**).



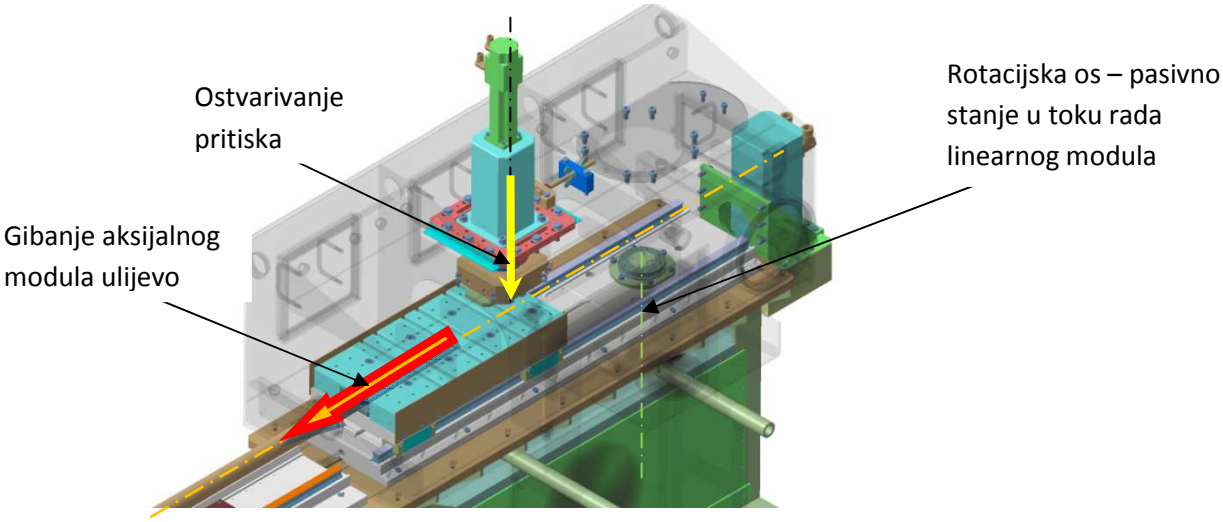
Slika 2.1.2 *Model tribometra sa osnovnim dijelovima*



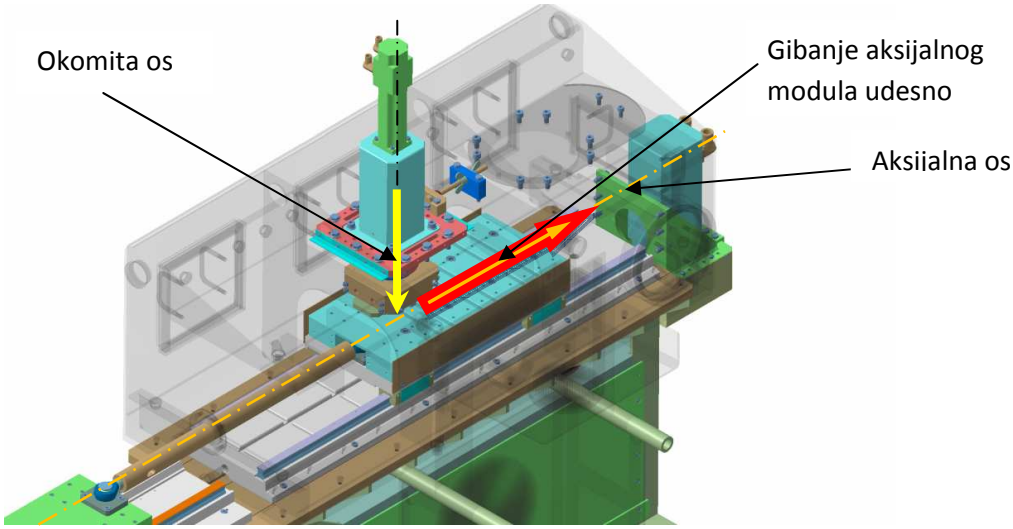
Slika 2.1.3 *Model tribometra – linearni motor i zatvorena klima komora*

2.2 OSI GIBANJA TRIBOMETRA I OSNOVNI PRINCIP RADA

Postoje dakle tri osi gibanja koje su predviđene na ovome stroju. Dvije od njih su linearne osi gibanja, a treća je rotacijska. Da bi se sila trenja uopće pojavila mora postojati neka relativna brzina između dva uzorka. Ako je ta brzina orijentirana u jednom pravcu u dva smjera onda se ostvaruje pravocrtno gibanje i to po ***linearnoj aksijalnoj osi*** gibanja. Ako postoji kružno gibanje onda postoji kružna brzina u smjeru ***rotacijske osi***. Sile trenja uvijek su na istom pravcu kao i relativne brzine gibanja, samo u suprotnom smjeru djelovanja od iste te brzine. Vertikalna os je os u čijem smjeru nema brzine gibanja već samo mali pomaci kako bi se ostvarila normalna sila pritiska u željenim granicama. U ovome slučaju ta se os naziva ***okomita os***. Po njoj se stvaraju mali impulsevi koje daje motor preko reduktora kako bi se ostvarila relativno konstantna normalna sila kada se to želi.



Slika 2.2.1 *Prikaz sheme gibanja linearnog motora –položaj 1*

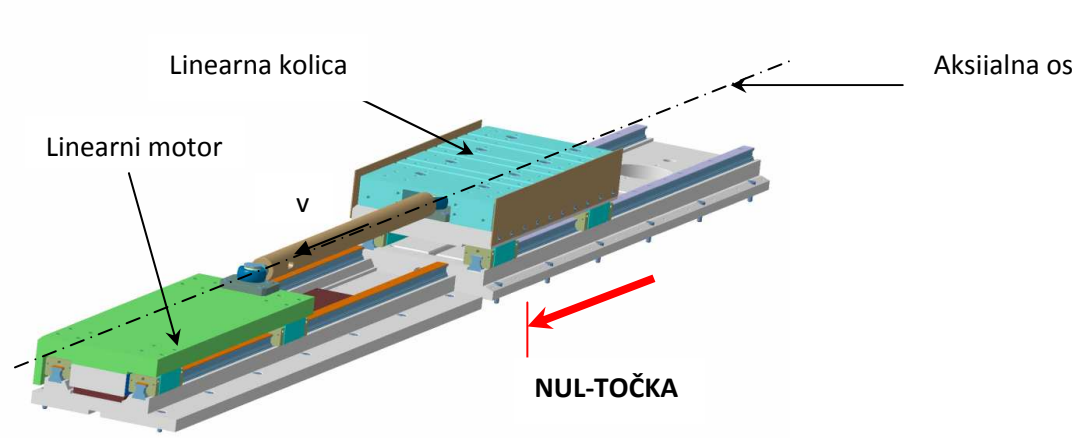


Slika 2.2.2 *Prikaz sheme gibanja linearnog motora – položaj 2*

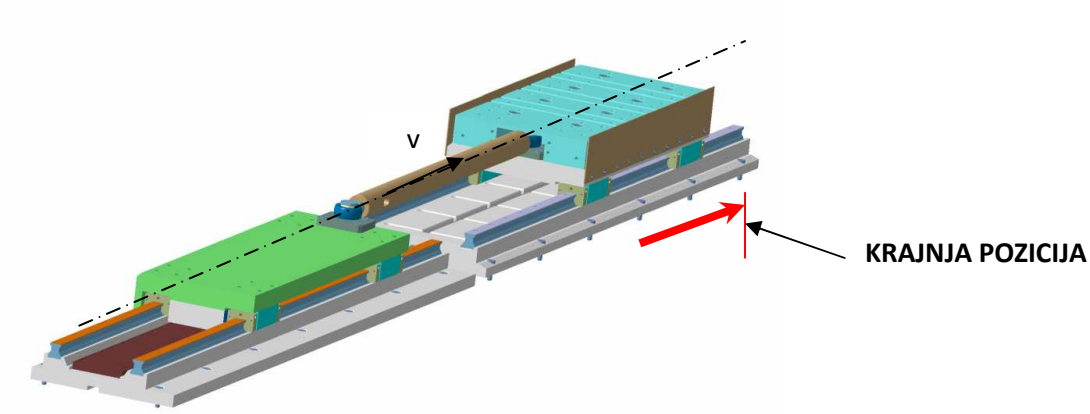
Linearno aksijalno gibanje ostvaruje linearni sinkroni servo motor sa kolicima koje su direktno motkom povezane sa njime. Kolica su potrebna jer se na njih učvršćuje donji uzorak i ona su smještena unutar komore. Mogućnosti su da se na kolica montira posuda u koju će se staviti tekući materijal na normalnoj temperaturi te se u klima komori namjeste stvarni temperaturni uvjeti gdje će se takav materijal usred pada temperature skrutnuti. Linearno gibanje ostvaruje se na način da se linearni motor pokrečući za sobom kolica giba čas u jednom smjeru, čas u drugom po vodilicama.

Rotacijsko gibanje izvodi AC sinkroni servo motor koji je preko remenica i zupčastog remena indirektno povezan sa vratilom na kojemu se nalazi rotacijski disk. Na taj se disk učvršćuje donji uzorak.

Gibanje po okomitoj osi izvodi AC sinkroni servo motor koji je preko planetarnog vretena i matice povezan sa mjernom glavom. Mjerna glava je smještena na klip cilindra, a na klipu je matica preko koje se zasniva pomak. Unutar mjerne glave se nalaze senzori sila kojih ima tri komada. Dva mjere trenje u horizontalnom aksijalnom smjeru, a jedan je smješten na vertikalnu okomitu os pa mjeri normalnu silu pritiska.

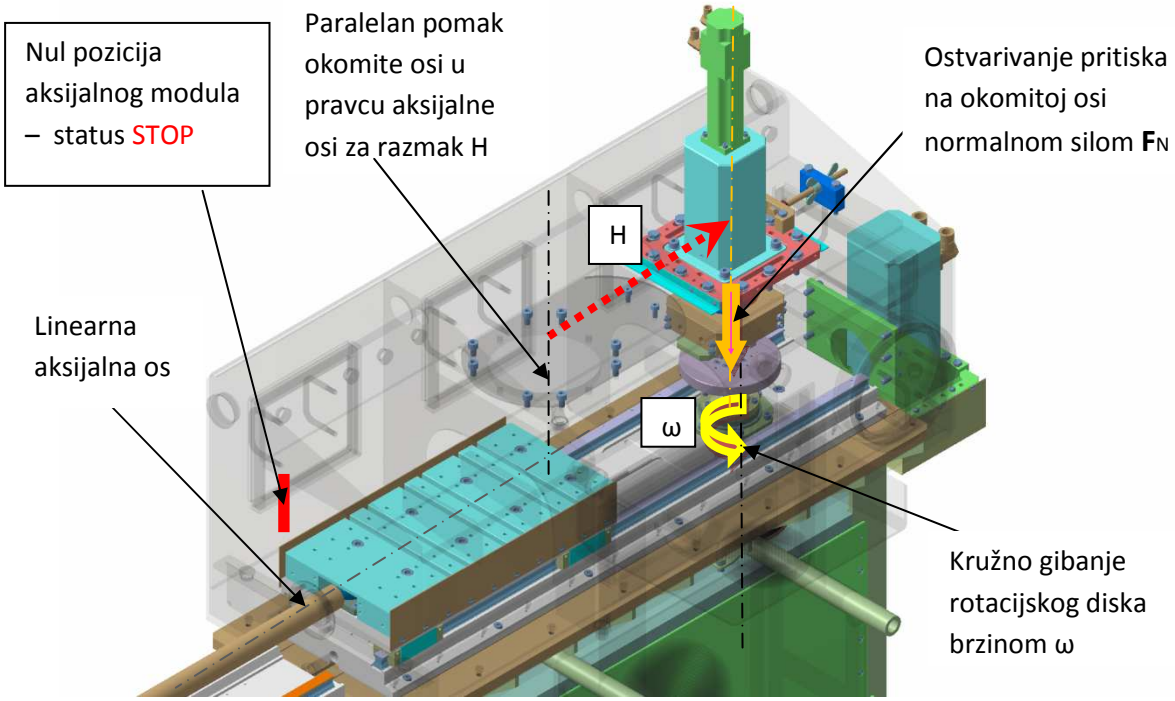


Slika 2.2.3 *Prikaz linearne aksijalne osi i pripadajućeg modula – nulti položaj*



Slika 2.2.4 *Prikaz linearne aksijalne osi i pripadajućeg modula – krajnji položaj*

Iz *slika 2.2.1* i *2.2.2* lijepo je moguće vidjeti sve postojeće osi na stroju i rad aksijalnog modula koji se giba harmonijski čas na jednu, čas na drugu stranu. Dok se odvija taj rad linearnog motora s kolicima u isto vrijeme preko modula za dobivanje normalne sile na okomitoj osi se dobiva okomita sila koja stvara pritisak na sam stol na kolicima. To je normalna sila na uzorak koja je proporcionalna sili trenja.



Slika 2.2.5 *Prikaz rotacijske osi i pripadajućeg modula – rad na disku*

Linearno gibanje linearnog motora s kolicima ostvaruje se kada se ispituju uzorci metodama koje imaju linearno gibanje unutar ispitivanja, a to su metode prikazane na slici *1.2.2a, 1.2.2b, 1.2.2e* i *1.2.2k* koje koriste blok koji se pravocrtno harmonijski giba.

Ako se želi ispitivati metodama koje imaju kružno gibanje po rotacionalnoj osi koje su prethodno spomenute gore u navedenom tekstu, tada će se premjestiti modul ostvarivanja normalne sile pritiska na mjesto na kojem će moći djelovati sa rotacijskim diskom tako da će ga se pomaknuti za iznos **H** udesno u drugo ležište. Taj pomak će značiti i paralelan pomak okomite osi za korak **H**.

Modul rotacijskog diska će se prebaciti u aktivni rad na način da će se na modul montirati disk koji nije u uporabi kada je u uporabi linearni aksijalni modul. To stanje rotacijskog modula u tom neaktivnom stanju naziva se ***pasivno stanje rotacijskog modula*** koji na sebi tada nema završni radni dio (disk, završno vratilo). Kada se ostvari ***aktivno stanje rotacijskog modula*** tada linearni aksijalni modul ne radi i nalazi se u nul poziciji, a to je krajnji gornji ili lijevi položaj prema *slici 2.2.3* i *2.2.5*.

Na taj se način ostvaruju dva različita načina rada samog tribometra. Postoji mogućnost da se okomita os uopće ne pomiče na način da se rotacijska os pomakne više ulijevo prema linearnom motoru. Tada ne bi trebalo premještati modul ostvarivanja normalne sile pritiska već bi se samo postavio disk na njegov modul kada bi željeli rad sa diskom. Ovo se nije primijenilo na stroj iz razloga što se možda jednog dana može koristiti stroj sa dvije glave na okomitoj osi koje će imati svaka svoju funkciju i dva paralelna rada koja ne moraju biti ispitivanje trenja.

Druga solucija je da postoje dva modula ostvarivanja normalne sile pritiska i duži stol koji bi mogao obuhvatiti veći osni razmak između dviju takvih okomitih osi. Na taj način pasivnog stanja rotacijskog modula ne bi trebalo biti i moglo bi se u bilo kojem trenutku ispitivati dva različita uzorka, no kako su ispitivanja rijeđa, a modul normalne sile pritiska jako skup tada se izabrala ovakva solucija radi ekonomskih razloga. Jednostavno kada se sa linearnog načina prelazi na rotacijski način ispitivanja pomakne se modul normalne sile pritiska u desno uzduž aksijalne osi za razmak **H**, a disk sa pripadajućim vratilom se stavi na rotacijski modul, te linearni modul postavi u nul položaj i stanje **STOP**.

Cijeli proces ispitivanja se događa u klima komori. Ona je namjenjena simulaciji rada pod realnim uvjetima koji su često ispod točke ledišta vode tako da se može ispitivati stanje na ledu ili stanje ponašanja nekog uzorka na nekoj drugoj tvari koja je tekućina na sobnoj temperaturi pa se ne bi mogla ispitivati na ovakav način. Često se dogodi da se želi ispitivati neki materijal u zagrijanom stanju radi određenih razloga pa je potrebno zagrijati atmosferu komore.

Uslijed trenja dolazi do razvijanja topline koja diže temperaturu uzorka i time utjeće na samu silu trenja indirektno povećavajući normalnu silu i direktno utjećući na koeficijent trenja. Da bi se to spriječilo podesi se klima u komori na konstantnu temperaturu tako da klima uređaj lagano hladi komoru uslijed procesa rada i na taj način oduzima razvijenu toplinu koja se razvila procesom ispitivanja trenja, te temperatura ostane relativno konstantna. Kažem relativno, jer se temperatura ipak kreće u sitnim granicama dozvoljenog odstupanja koje nadzire regulator.

3. MODULI TRIBOMETRA

Ovaj stroj predviđen je da se gradi na modularan način. Modularna gradnja ovoga stroja donosi mu veliku fleksibilnost koja nam omogućuje da stroj upotrijebimo za razna druga ispitivanja koja će isto tako biti navedena. U daljnjem tekstu biti će opisani ti moduli svaki pojedinačno. Tribometar ima pet modula koji se kao cjelina mogu staviti na njega i maknuti kada se to želi na isti način sa njega. Ti moduli su:

A ..... modul za ostvarivanje horizontalnog pravocrtnog gibanja

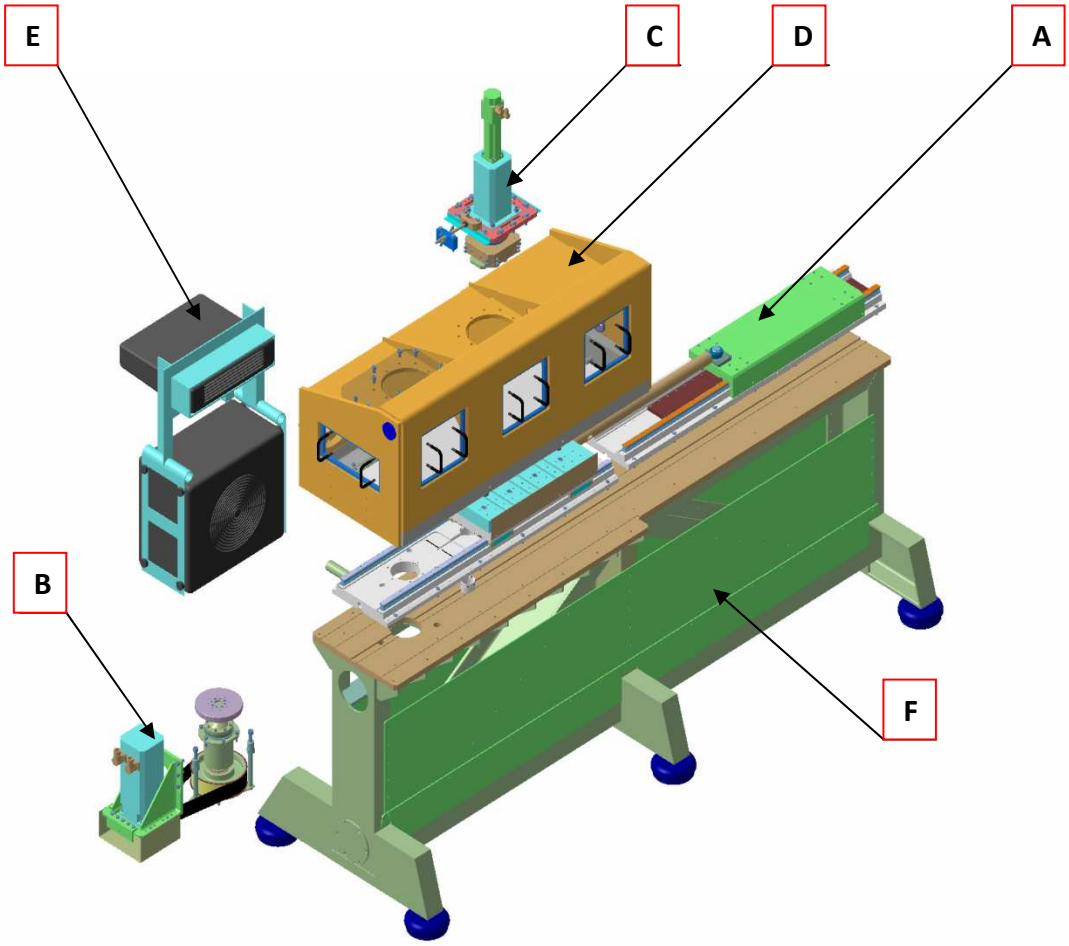
B ..... modul za ostvarivanje rotacijskog gibanja

C ..... modul za ostvarivanje normalne sile pritiska

D ..... klima komora

E ..... uređaj za klimatizaciju komore

F ..... postolje tribometra



Slika 3.1.0 *Prikaz tribometra sa pripadajućim modulima*

3.1 MODUL ZA OSTVARIVANJE HORIZONTALNOG PRAVOCRTNOG GIBANJA

Da bi se ostvarilo relativno pravocrtno gibanje po spomenutoj ***aksijalnoj osi*** tribometra, mora se napraviti takav sklop sa pripadajućim pogonskim uređajem koji će u potpunosti zadovoljavati naše zahtjeve. Zahtjevi sustava su sljedeći:

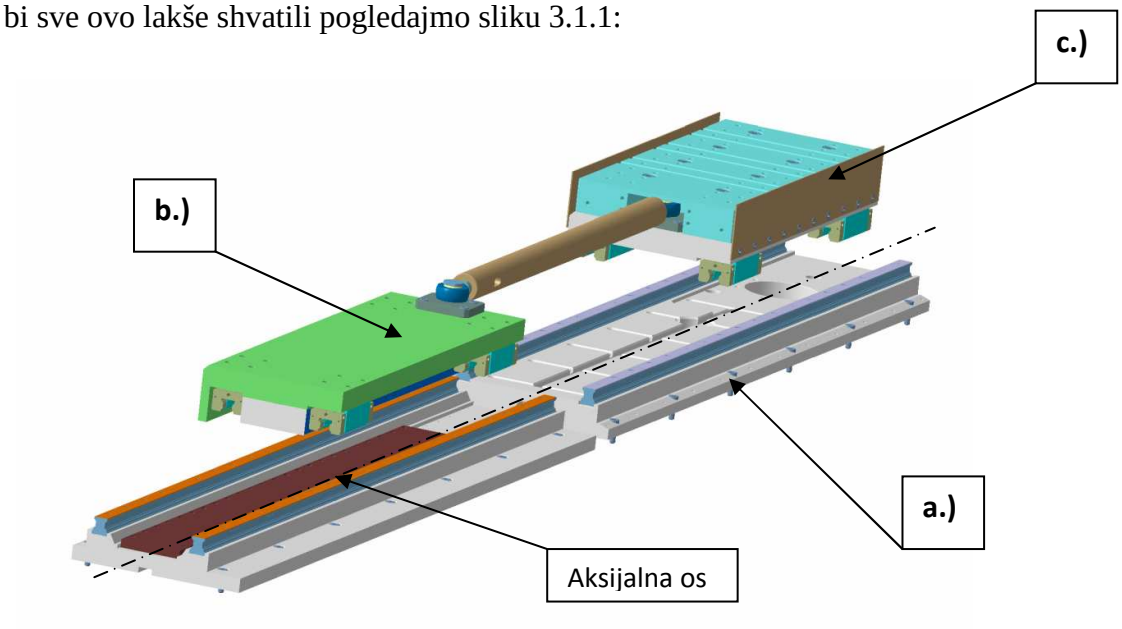
a.) ***Točnost***
b.) ***Krutost konstrukcije***
c.) ***Stabilnost***
d.) ***Brzina***

Neki ovi zahtjevi su međusobno jedan s drugime povezani i primjerice nema točnosti bez zadovoljavajuće konstrukcijske krutosti, zato se prilikom izrade takvoga modula treba veoma paziti na koji se način odabiru elementi koji čine takav sustav te njihove karakteristike. Dio ovoga modula će biti integriran unutar klima komore u kojoj se planiraju velike mogućnosti temperaturne varijacije, zato je za dijelove koji imaju relativnu brzinu među sobom potrebno odabrati materijal sa malim temperaturnim koeficijentom širenja materijala kako ne bi došlo do povečanja otpora između tih dijelova, a s druge strane se očuvala točnost sustava. Ovaj modul zato ima nekoliko podsklopova, a to su:

a.) ***Monoblokovi s vodilicama***
b.) ***Linearni motor***
c.) ***Kolica sa pričvrsnim stolom ili kadicom***

Od ovih nabrojenih podmodula, monoblokovi s vodilicama spadaju u nepokretne dijelove, dok ostala dva spadaju u pokretne dijelove koji se relativno gibaju na čvrsto pozicioniranim monoblokovima.

Da bi sve ovo lakše shvatili pogledajmo sliku 3.1.1:

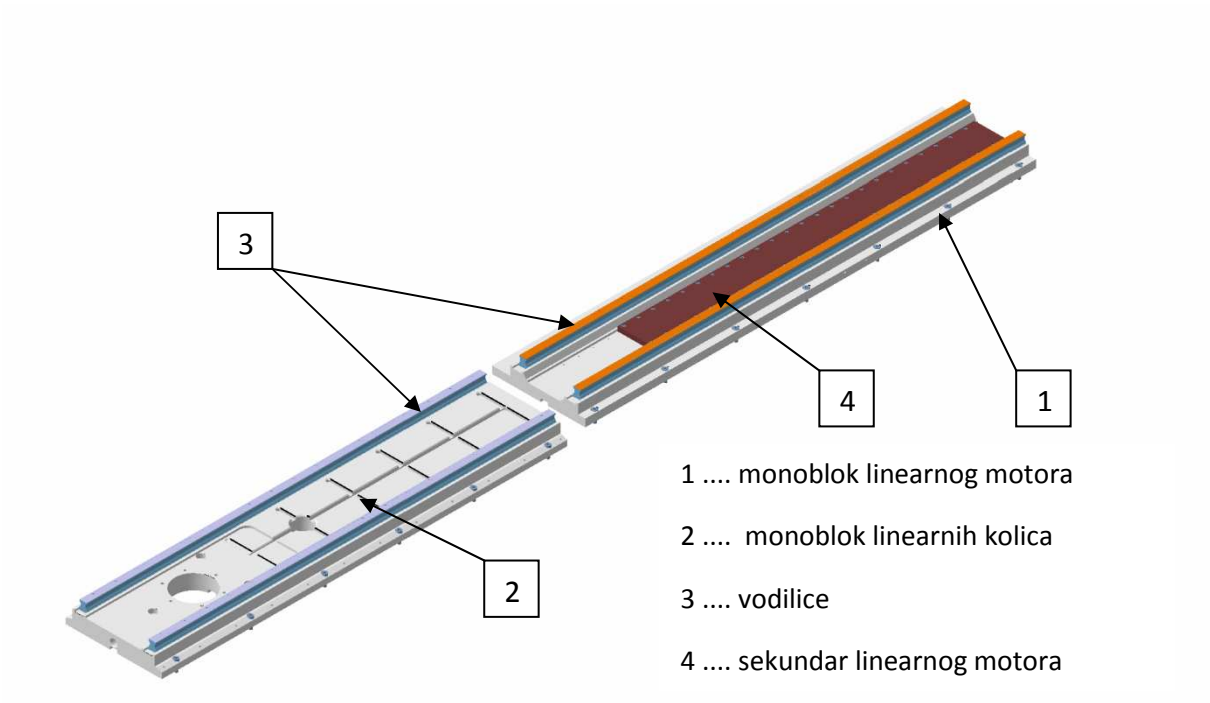


Slika 3.1.1 *Prikaz modula za ostvarivanje horizontalnog pravocrtnog gibanja*

Na slici 3.1.1 vidljiva je aksijalna os po kojoj će se u buduće ovaj modul nazivati ***aksijalni modul***. Statički sustav koji služi kao temelj i kruto tijelo modula je monoblok u ovome slučaju. Kako bi dio monobloka morao biti unutar spomenute komore, da se lakše postavi komora taj će se monoblok rastaviti na dva monobloka. Jedan je temelj linearnom motoru i naziva se ***monoblok linearnog motora***, a drugi koji je temelj linearnih kolica i naziva se ***monoblok linearnih kolica.*** Ti monoblokovi su izrađeni od aluminske legure koja je u pogledu čvrstoće, mase, krutosti , temperaturnog vođenja i širenja, te cijene jedna od najboljih legura. Može se birati bilo koja od tih legura od kojih svakako ima prednost ***antikorodal*** koji ima uz sve nabrojano još i veliku postojanost prema koroziji koju mogu uzrokovati razna ulja i paste za podmazivanje prilikom ispitivanja. Evo par legura koje su prihvatljive za monoblokove: **AlMg3, AlMg4, AlMg5, Al Si1 Mg**.

Oba monobloka su vijcima pričvršćena za radni stol postolja tako da čine stabilni i kruti statički temelj na koji se postavljaju vodilice. Monoblok linearnog motora, osim što na sebe prima vodilice, prima i sekundar linearnog motora. Sekundar linearnog motora je tzv. stator načinjen od parcijanih pločica permanentnog magneta koje su vijcima pričvršćene za monoblok. Ovisno o koraku linearnog pomaka, pločice se postavljaju u niz tako da ukupna dužina zadovoljava zbroj dužine primara i hoda motora.

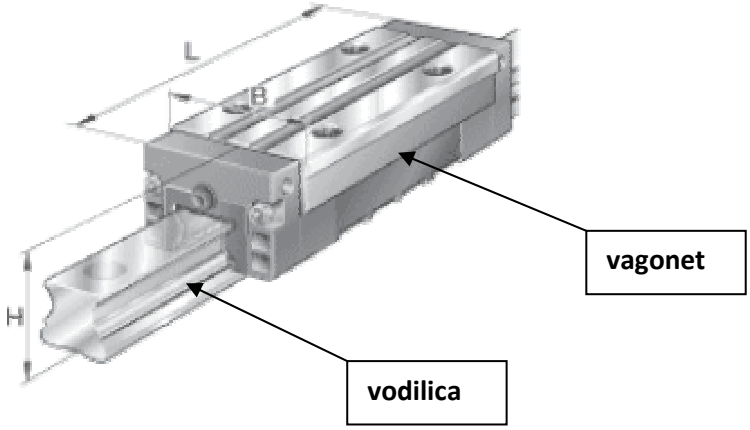
Monoblok linearnih kolica na sebi mora imati kanale za ulja i tekućine koje će se cijediti sa mjesta ispitivanja. Te će se tekućine sabirati u sifonskoj čašici i izlaziti kroz nju u odvodnu cijev.



Slika 3.1.2 *Prikaz monoblokova sa vodilicama i sekundarom u poziciji postavljanja na postolje*

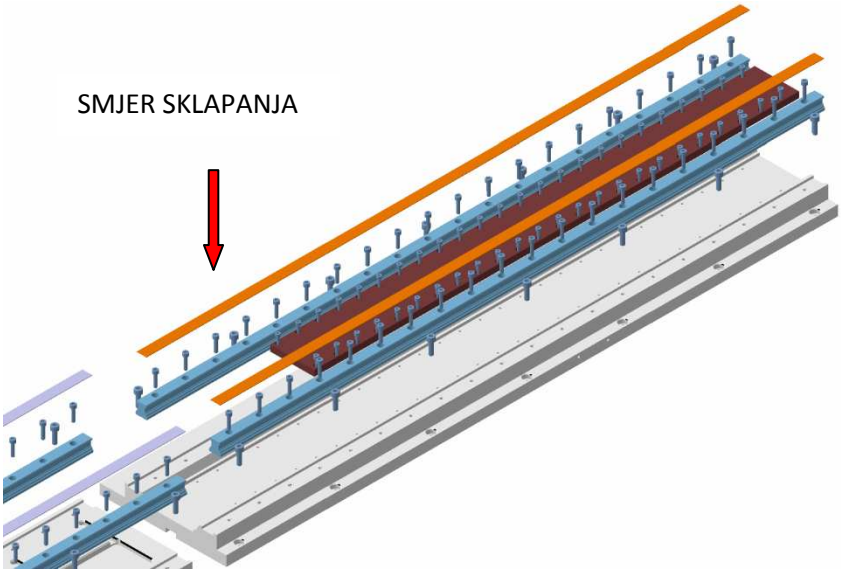
Osim toga taj monoblok linearnih kolica ima veliki provrt kroz koji se provlači modul rotacijskog diska. Vodilice koje su ovdje postavljene na monoblokove su visokodinamičke valjne vodilice. Takve vodilice imaju princip rada kao i valjni ležajevi gdje umjesto trenja klizanja postoji trenje valjanja koje je kako smo rekli puno manjeg iznosa. Na taj se način može zanemariti trenje u vodilicama koje je štetno ne samo za vodilice, već i u energetskom smislu. Ove vodilice moraju zadovoljavati nosivost i brzinu koja se traži od njih.

Ovakvih vodilica ima puno vrsta. Razlikuju se po tijelima valjanja koji mogu biti valjčići, kuglice, bačvice, iglice i stošci, te po broju redova i načinu slaganja u red. Ovdje upotrebljene vodilice biti će četveroredne kuglične vodilice. Komplet čine vodilice i vagoneti koji su zatvoreni sustav. Četiri reda kuglica smještenih po dva reda na svakoj strani vodilice čini ove vodilice veoma dinamičnima. Sustav vodilica-vagonet ima centralno podmazivanje uljem za centralno podmazivanje što daje sustavu još veću otpornost na trošenje i smanjuje trenje u vodilicama. Centralno podmazivanje nadzire računalo i dodaje ulje u određenom vremenskom periodu. Slika 3.1.3 prikazuje vodilicu **INA KUVE 25-B-KT-SL** koja je izabrana za ovaj modul. Te se vodilice fiksiraju na monoblokove sa imbus vijcima i nakon što se vijcima pričvrste, postavi se dodatna lamela koja legne na gornji dio vodilice i elastično sjedne na nju te prekrije rupe.



Slika 3.1.3 *Prikaz vodilice INA KUVE 25-B-KT-SL sa vagonetom*

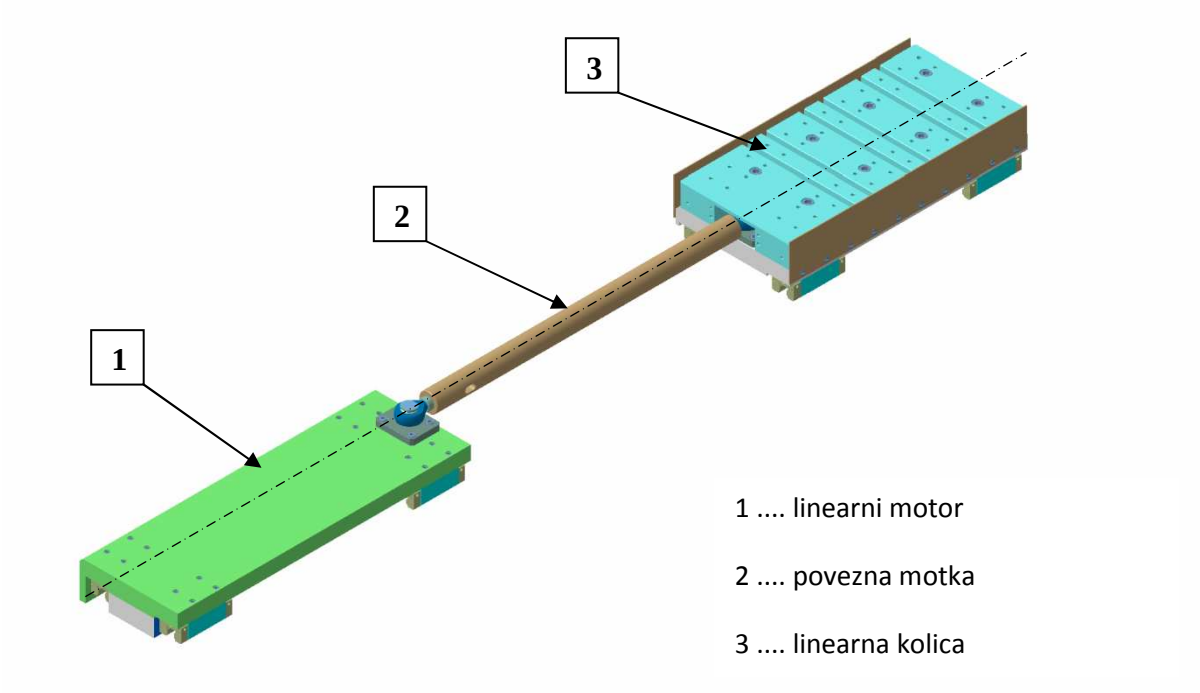
Specifikacija ovog tipa vodilice nalazi se u prilogu **B1** i u **literaturi [6]**. Slika 3.1.4 prikazuje postavljanje vodilica i sekundara na monoblok linearnog motora. Sa slike je potpuno vidljivo kako se vodilice pričvršćuju vijcima i način kako se pričvršćuje sekundar na monoblok.



Slika 3.1.4 *Postavljanje vodilica i sekunadara na monoblok linearnog motora*

Pokretni dio aksijalnog modula sastavljen je od linearnog motora koji je preko motke povezan sa linearnim kolicima koje će se nalaziti unutar komore. Linearni motor, tj. njegov primar postavlja se na nosač primara te tako sa njime čini gibljivi dio linearnog motora. Na sam taj nosač još dolaze četiri vagoneta koja se vijcima pričvršćuju za nosač, po dva na svaku vodilicu.

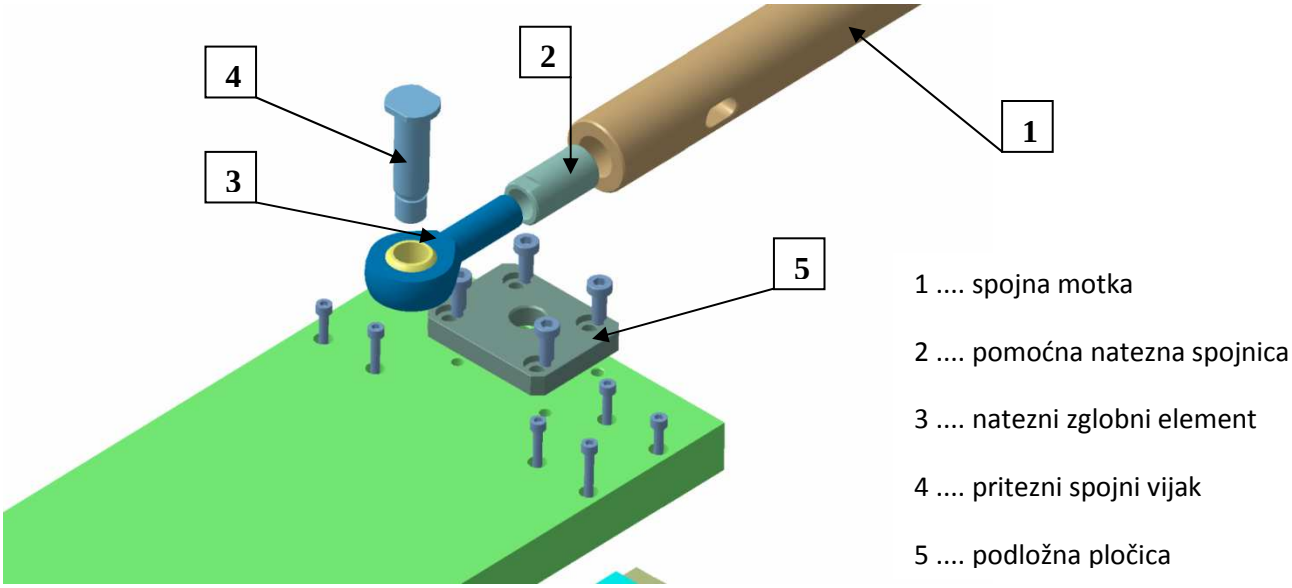
Slika 3.1.5 prikazuje pokretni dio aksijalnog modula.



Slika 3.1.5 *Pokretni dio aksijalnog modula – linearni motor sa kolicima*

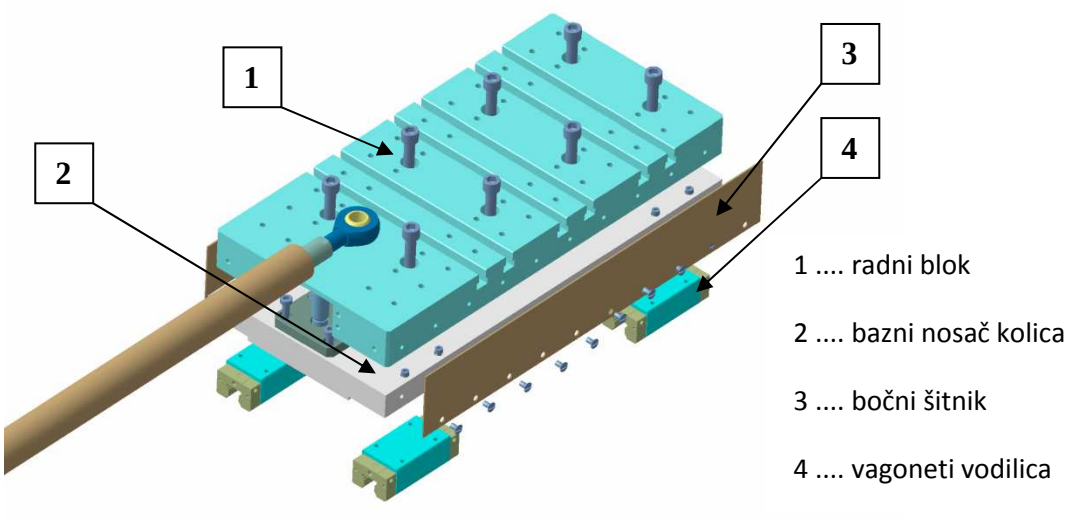
Kada se primar postavi na nosač linearnog motora i kada se postave vagoneti na isti nosač pomoću vijaka i sve to zajedno stavi na vodilice, dobiva se veoma mali zazor između primara na pokretnom dijelu i sekundara motora na monobloku koji je oko pola milimetra.

Kada se primar spoji na struju, budući da su na njemu namoti kojima će proteći struja pojavit će se linearna sila u smjeru aksijalne osi, dakle motor će se pokrenuti. Motka spaja kolica sa motorom preko posebne natezne spojnice i nateznog zglobnog elementa koji je vijkom pritegnut za nosač motora tj. s druge strane na isti način za kolica, kako prikazuje slika 3.1.6



Slika 3.1.6 *Prikaz spajanja spojne motke na nosač linearnog motora*

Nosač primara načinjen je također od aluminijske legure tako da je sam modul podosta lagan i nema velik moment tromosti pa ga je lakše ubrzati. Linearna kolica osim što imaju bazni nosač na koji su montirani vagoneti kako bi kolica preko njih mogla kliziti po vodilicama, imaju još i radni blok koji služi za postavljanje krutog uzorka za ispitivanje. Pogledajmo sliku 3.1.7:

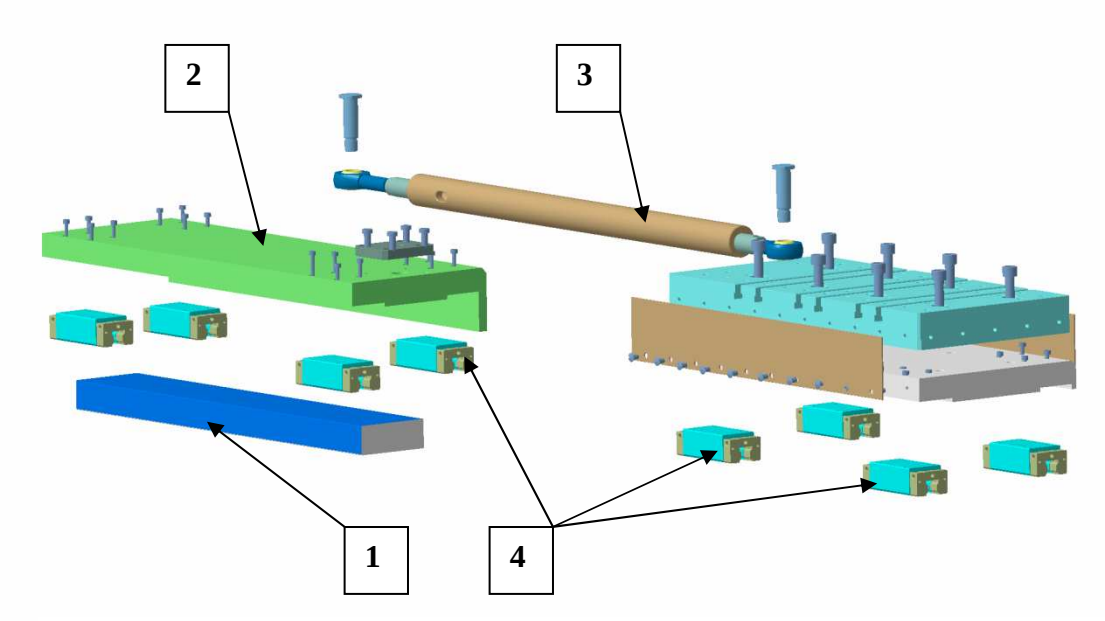


Slika 3.1.7 *Prikaz sastavljanja linearnih kolica*

Kada se ispituje neka tekučina koja se treba skrutnuti nakon klimatskih promjena u komori, tada se umjesto radnog bloka upotrebljava kadica koja ima isti princip pritezanja na bazni nosač kao i radni blok.

Bazni nosač, radni blok i kadica rade se od aluminijske legure otporne na koroziju. To može biti ista legura kao i za monoblokove koji su se već spominjali.

Nakon ovoga opisa pogledajmo pokretni dio aksijalnog modula u dijelovima. Dakle nosač linearnog motora je baza na koji se montira primar sa vagonetima. Bazni nosač na kolicima, baza je na koju dolaze vagoneti sa donje strane, a radni blok ili posuda sa gornje. Svi ovi dijelovi pričvršćuju se vijcima. Nakon toga linearna kolica idu na vodilice svoga monobloka, a linearni motor na vodilice svoga monobloka. Tada se motor i kolica povezuju sa spojnom motkom na opisan način.



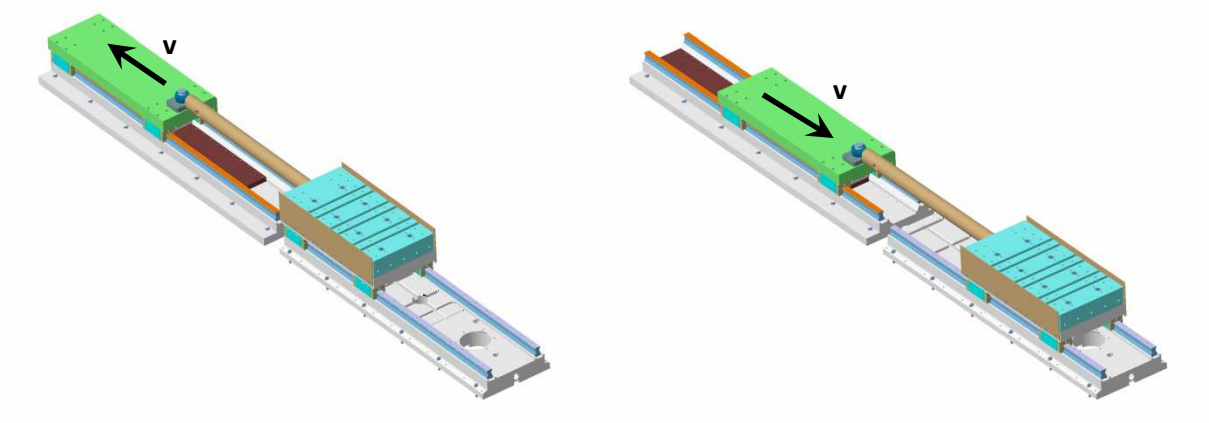
1 .... primar linearnog motora

2 .... nosač primara linearnog motora

3 .... spojna motka

4 .... vagoneti vodilica

Slika 3.1.8 *Prikaz sastavljanja pokretnog dijela aksijalnog modula*



Slika 3.1.9 *Aksijalni modul u stanju rada (harmonijsko gibanje naprijed – nazad)*

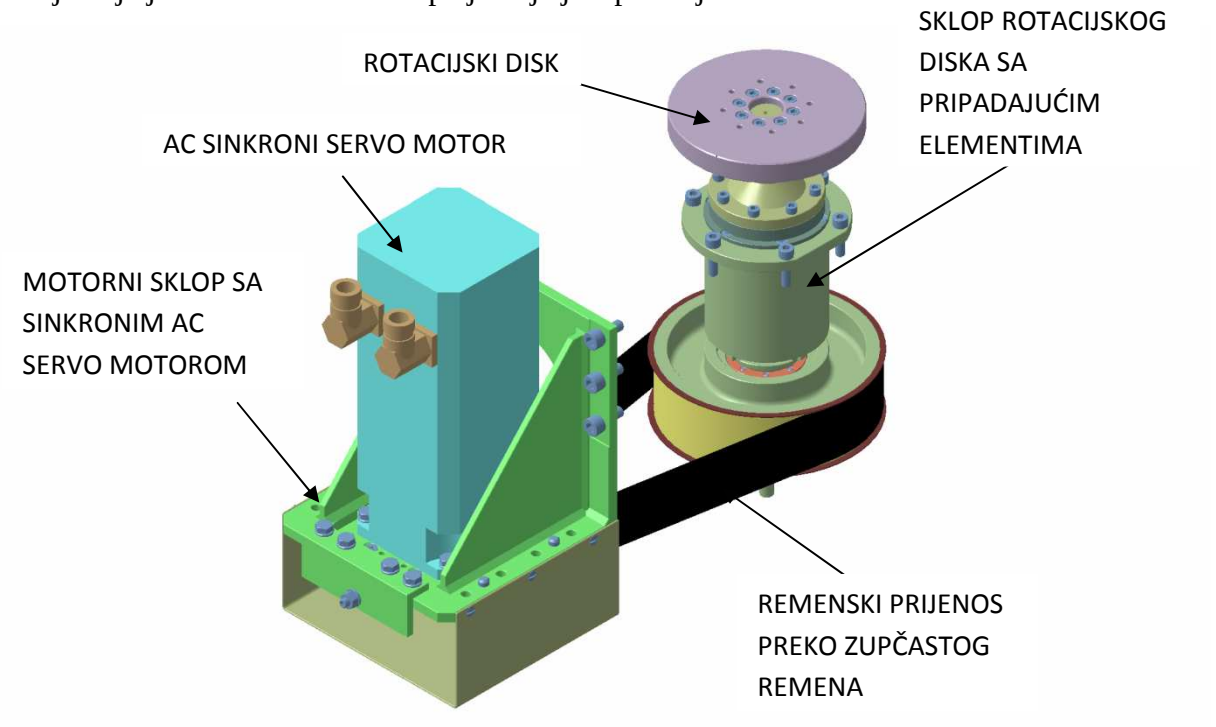
Prema slici 3.1.9 vidi se kako se aksijalni modul ponaša u gibanju. Pokretni gornji dio počne se relativno gibati spram donjeg dijela po vodilicama čas u jednu stranu, čas u drugu pogonjen linearnim motorom kako je strelicama prikazano.

Sam način gibanja, ubrzanje i usporenje, te ponašanje brzine gibanja bit će opisano u ***poglavlju 6*** gdje će biti riječi o samom dinamičkom procesu koji se događa na aksijalnom modulu. Ono što još treba reći je to da se ovakav modul vijcima učvršćuje na radni stol postolja tribometra koje će biti opisano u slijedećim poglavljima.

3.2 MODUL ZA OSTVARIVANJE ROTACIJSKOG GIBANJA

Rotacijsko gibanje za ispitivanje trenja potrebno je da se ostvare metode spomenute u poglavlju *1.2* prikazane na slici *1.2.2c* (*pin on disk*) i *1.2.2e (ring on disk).* Modul mora zadovoljavati sve zahtjeve kao i aksijalni modul, znači točnost, stabilnost, krutost i brzinu.

Ovaj modul je osmišljen tako da ga pogoni sinkroni AC servo motor koji je upravljan računalom. Da osigura dva prijenosna omjera o kojima će biti kasnije riječ, motor nije direktno postavljen na vratilo na kojemu se nalazi disk, već preko zupčastog remena i dviju remenica pogoni gonjeno vratilo na kojemu se nalazi disk. Prijenosni omjeri koji se upotrebljavaju ovdje su: ***i = 1*** i redukcija ***i = 3.*** Razlog za dva prijenosna omjera leži u tome da se moraju zadovoljiti dva uvjeta koja se ne mogu zadovoljiti bez dva prijenosna omjera. Jedan uvjet je da se zadovolji brzina motora na disku, a drugi je uvjet da snaga ne ide iznad dozvoljene kako bi motor mogao izdržati unatoč tome što je potreban za proces ispitivanja povećani moment trenja koji bi potrebnu snagu povećao. Kako je snaga umnožak momenta i brzine, smanji li se brzina uz istu snagu imamo povećani moment, dakle potrebna je redukcija brzine. Ovo se i moglo izbjeći na način da se uzme jači motor za pokretanje diska, no cijena sa povećanjem snage veoma raste i s obzirom na gustoću ispitivanja koja je mala uzela se ova opcija koja je isplativija.

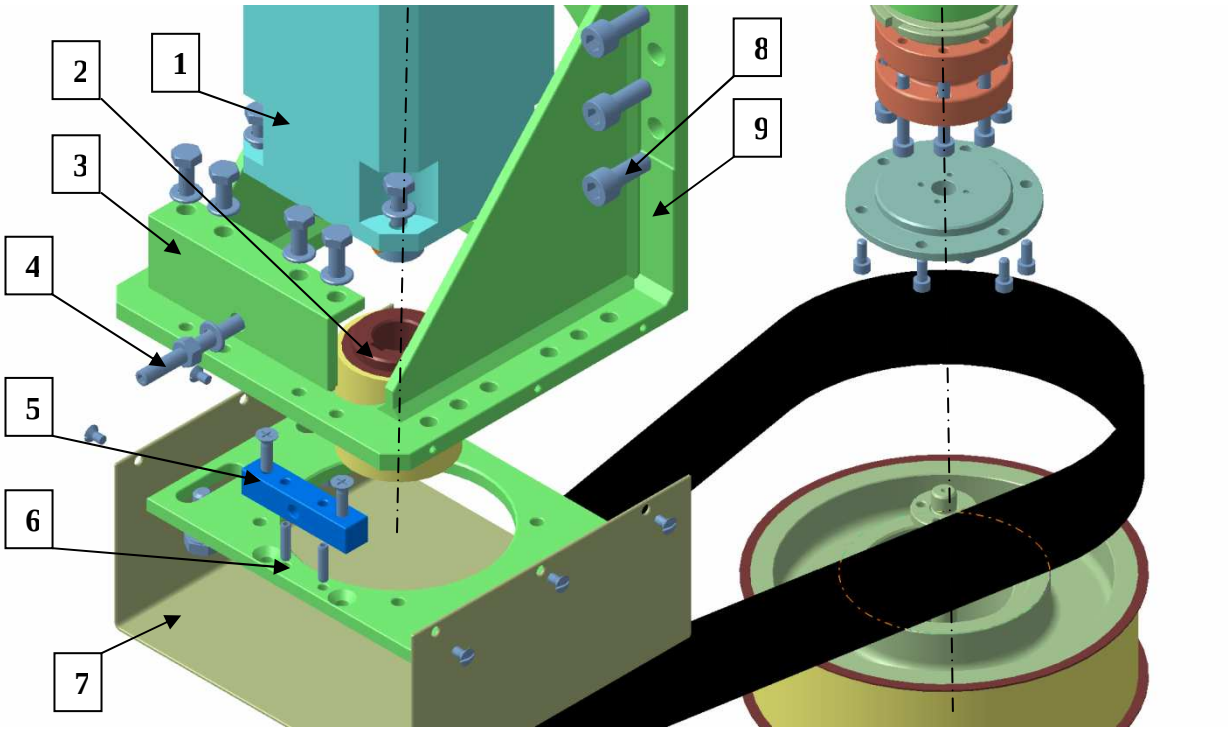


Slika 3.2.1 *Rotacijski modul tribometra i osnovni podmoduli*

Motor diska se izabire prema potrebnoj snazi, ovdje se radi o sinkronom AC servo motoru kojim je moguće upravljati. Više o samim motorima biti će u poglavlju 4.

Krenimo od motornog sklopa. Motor se pričvršćuje sa četiri vijka na čelični nosač koji se konzolno montira na postolje tribometra pomoću šest imbus vijaka. Motor mora biti dobro osiguran na nosaču pa se vijcima dodaju elastične pločice kako slučajno ne bi došlo do olabavljivanja spoja koji bi uzrokovao ne samo netočnost stroja već i moguću štetu. Kako je ovdje remenski prijenos, između pogonske i gonjene remenice mora biti mogućnost zatezanja remena kako ne bi bio labav i na taj način uzrokovao netočnosti pri prenošenju sile i gibanja.

Zato se razradio sistem kako bi se remen mogao pritegnuti i to na način da se motor montira na pomoćni nosač koji je pritegnut za glavni nosač, a za razliku od njega koji je fiksan, taj pomoćni nosač ima mogućnost uzdužnog pomaka zajedno sa motorom spram fiksnog nosača. Nakon pritezanja pomoćni se nosač pritegne vijcima za glavni nosač. Natezanje remena postiže se sa svornim vijkom koji se stegne maticom nakon zatezanja remena preko jarma.



1 .... AC sinkroni servo motor

2 .... pogonska remenica za diobeni omjer i = 3

3 .... L-profil za prednatezanje remena

4 .... svorni vijak za prednatezanje remena

5 .... jaram za prednatezanje remena

6 .... pomoćni nosač motora

7 .... štitnik remenice

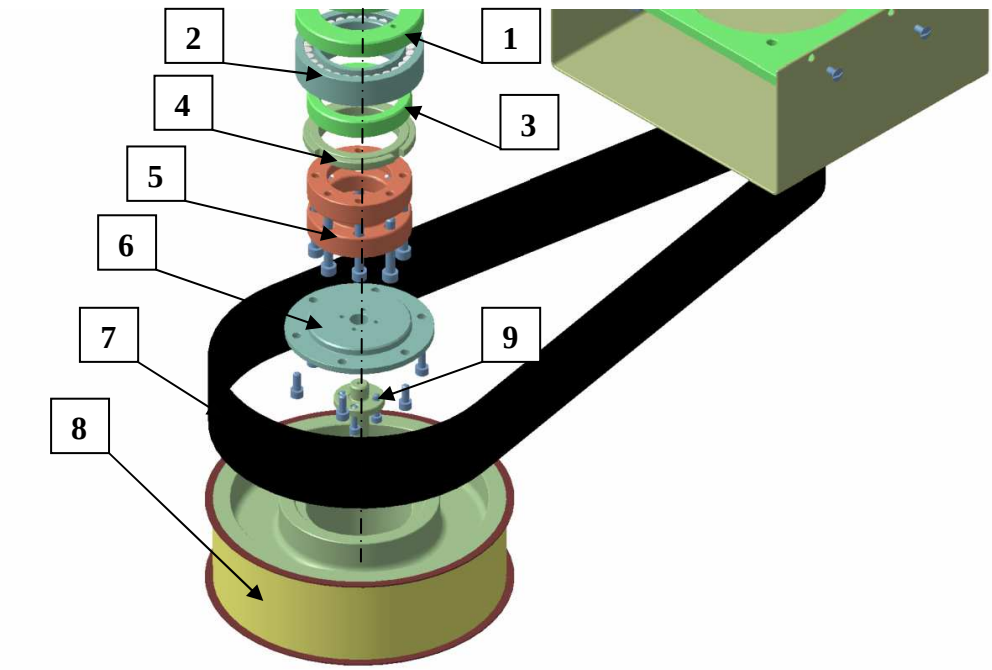
8 .... vijci za pritezanje nosača na postolje

9 .... glavni nosač motora

Slika 3.2.2 *Prikaz sklapanja motornog sklopa rotacijskog modula*

Slika 3.2.2 prikazuje sklapanje motornog sklopa rotacijskog modula koji se opisuje. Na motorno vratilo direktno je spojena remenica sa **24 zuba** na obodu, a fiksira se perom.

Za diobeni omjer **i = 1** postoji remenica sa **48 zuba** na obodu i duplo je većeg diobenog promjera. Gonjena remenica za diobeni omjer **i = 3** ima **72 zuba** na obodu, dok ona sa diobenim omjerom **i = 1** ima **48 zuba** na obodu kao i pogonska. Dakle kada se želi mijenjati prijenosni omjer samo se promjene remenice. Odnos diobenih promjera para remenica daje iznos diobenog omjera koji je u radu. Tip remena je **HTD8**, a remenice se izrađuju od sivog lijeva, sve osim male pogonske remenice koja se izrađuje od čelika radi čvrstoće. Na osi rotacijskog diska radi dobre ukrute postoji podosta elemenata koji čine sklop rotacijskog diska. Pogledajmo sliku 3.2.3 i 3.2.4:



1 .... štitnik ležaja

2 .... stožasti valjni radijalno-aksijalni ležaj

3 .... pritiskivač ležaja

4 .... sigurnosna matica pritezanja

5 .... elastični element za stezanje gonjene remenice na vratilo

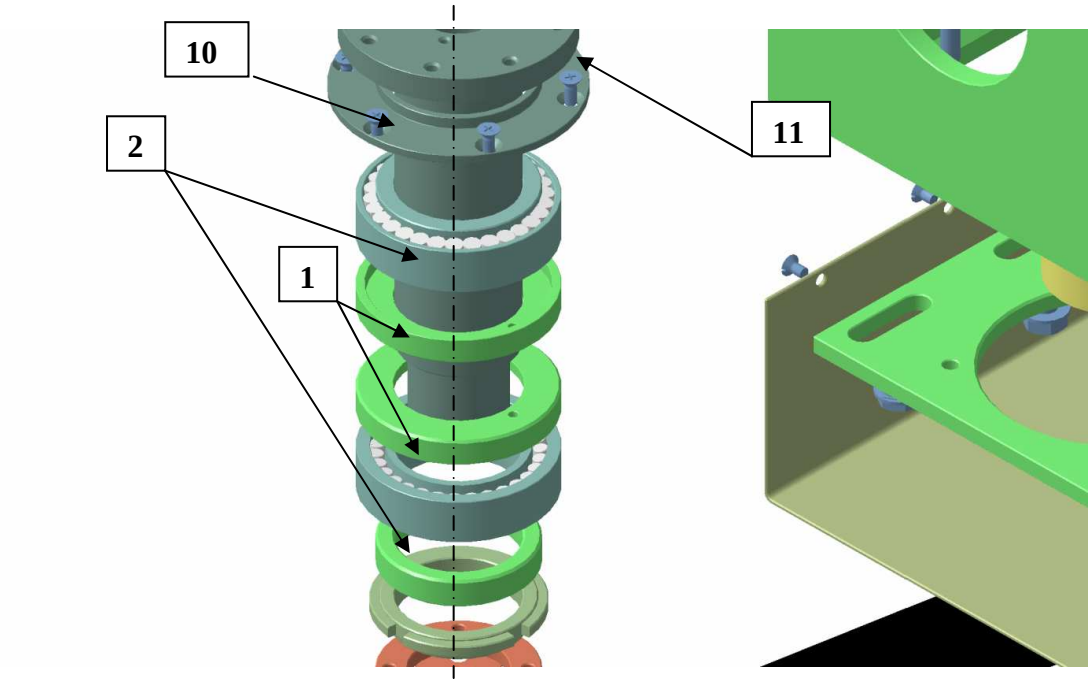
6 .... poklopac gonjene remenice

7 .... zupčasti remen

8 .... gonjena remenica

9 .... vratilo rotacijskog enkodera

Slika 3.2.3 *Prikaz sklapanja donjeg dijela sklopa rotacijskog diska*



10 .... gornji poklopac 11 .... vratilo rotacijskog diska

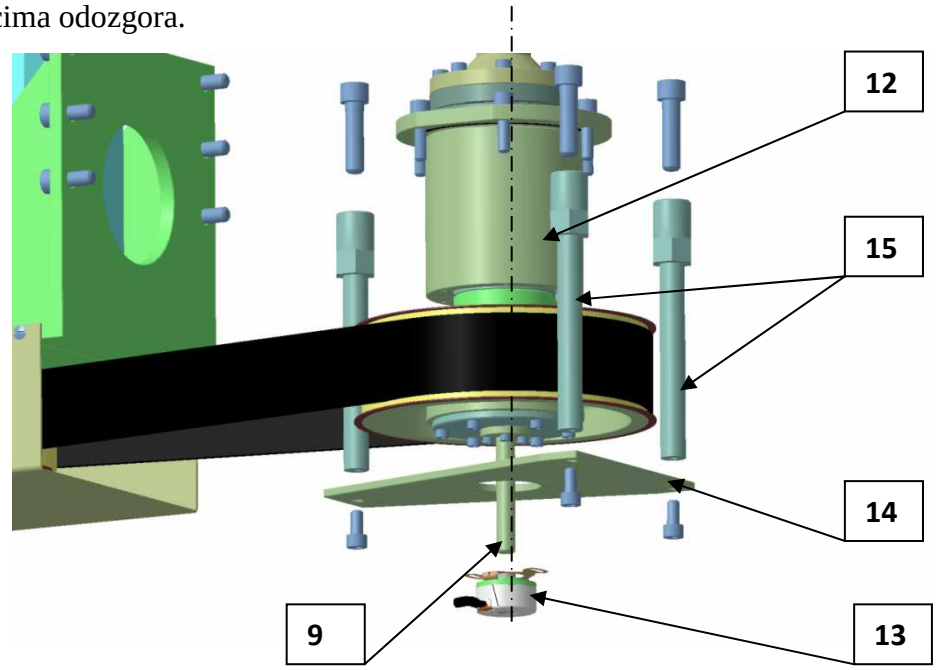
Slika 3.2.4 *Prikaz sklapanja srednjeg dijela sklopa rotacijskog diska*

Vratilo (10) slika 3.2.4 izrađeno je od poboljšanog čelika. Sa njegove donje strane redom se postavljaju elementi kako prikazuju prethodne dvije slike 3.2.3 i 3.2.4. Gornji čelični poklopac služi da onemogući vanjskom prstenu stožastog valjnog radijalno-aksijalnog ležaja aksijalni pomak.

Istu funkciju ima pritiskivač ležaja (3) slika 3.2.3 sa donje strane, te štitnici ležaja (1) sl. 3.2.3 i 3.2.4 sa unutrašnje strane među ležajevima. Sa vanjske strane štitnici ležaja su poduprti na vanjsku osnovu (12) sl. 3.2.5 koja je u obliku cijevi i koja se direktno vijcima pričvršćuje na monoblok linearnih kolica aksijalnog modula tribometra pri montaži na njega. Ležajevi su pomoću svojih podupirača dodatno još na kraju osigurani donjim poklopcem i sigurnosnom maticom (4) sl. 3.2.3. Kako bi se gonjena remenica (8) sl. 3.2.3 pritegnula i pozicionirala, između remenice i rukavca vratila se postavi elastični element za pritezanje (5) sl.3.2.3, koji se stegne vijcima i na taj način elastično deformira pa pritegne remenicu na rukavac elastičnom silom. Taj se element izrađuje od čelika za opruge.

Na kraju se na čelo remenice postavi poklopac (6) sl. 3.2.3 i spoji vijcima za remenicu. Unatoć tome što postoji integrirani rotacijski enkoder na motoru koji mjeri položaj i brzinu rotacijskog diska, postoji mogućnost elastične deformacije zupčastog remena koja bi mogla dovesti do nepreciznosti. Zato se odlučilo postaviti još jedan rotacijski enkoder direktno na os vratila i to na način da se vratilo rotacijskog enkodera (9) sl. 3.2.3 postavi na poklopac (6) i zategne vijcima.

Ono na što se mora obratiti pozornost je udar vratila enkodera prilikom vrtnje, kako se ne bi smanjila točnost u slučaju loše centričnosti tog vratila. Na to vratilo se zatim postavi enkoder sa šupljim kučištem (13) sl. 3.2.5, tako da vratilo prođe kroz njega i pritegne se za vratilo priteznim elementom, a kučište se vijcima spaja na nosač kučišta enkodera (14) sl. 3.2.5 koji je pomoću tri dugačka distancera (15) sl. 3.2.5 odvojen od monobloka linearnih kolica aksijalnog modula, na koju se spaja vijcima odozgora.



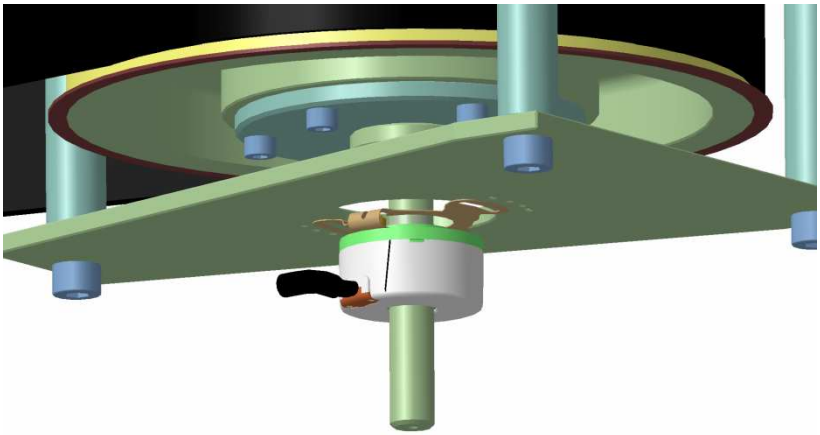
12 .... vanjska osnova

14 .... nosač kučišta enkodera

13 .... enkoder sa šupljim kučištem

15 .... distanceri

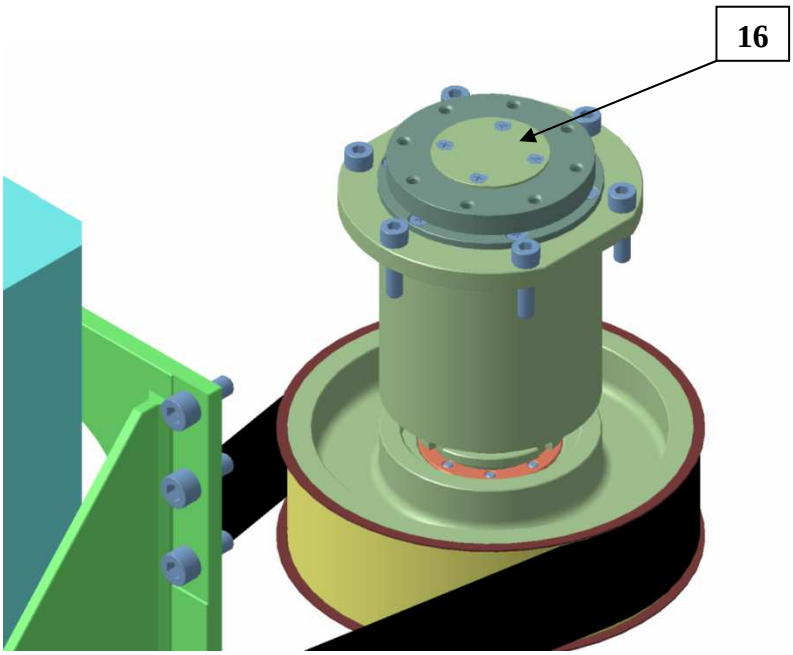
Slika 3.2.5 *Prikaz postavljanja enkodera na vratilo i nosač enkodera*



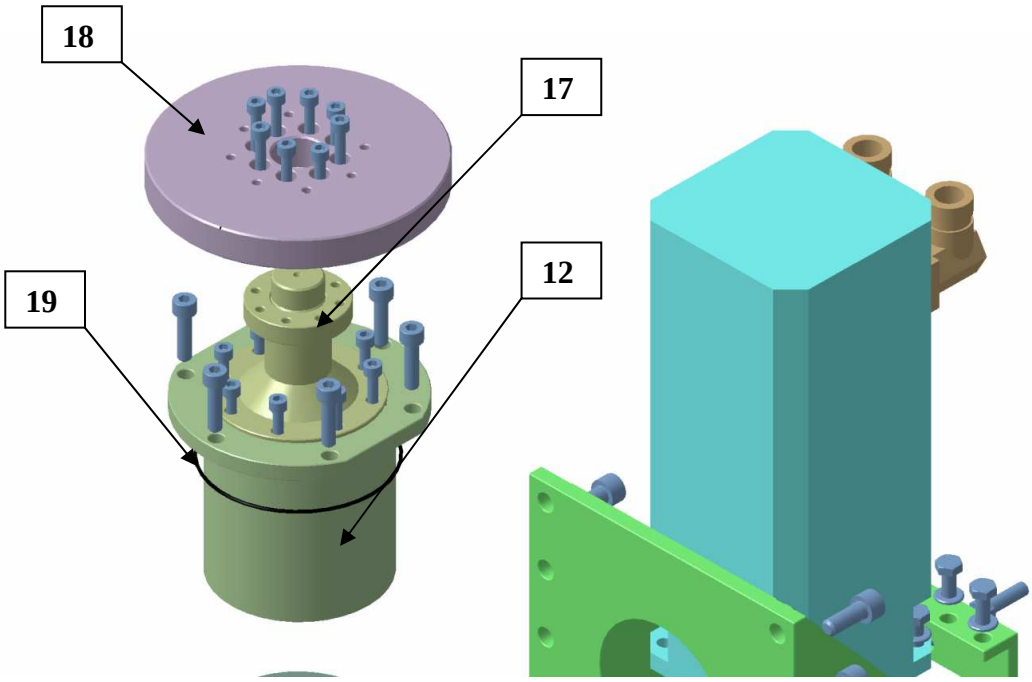
Slika 3.2.6 *Rotacijski enkoder postavljen na nosaču*

Ovaj opisani sklop postavlja se na postolje i predstavlja pasivni modul rotacijskog diska.

Pasivni iz tog razloga što ne može obavljati korisni rad jer nema aktuatorski dio, a to su pomoćno vratilo i disk koji se na tom vratilu nalazi. Kada se rad ne obavlja postavi se pločica (16) sl. 3.2.7 na šuplje čelo vratila kako prljavština ne bi ulazila unutar njega.



Slika 3.2.7 *Prikaz pasivnog sklopa modula rotacijskog diska*



16....zaštitna pločica

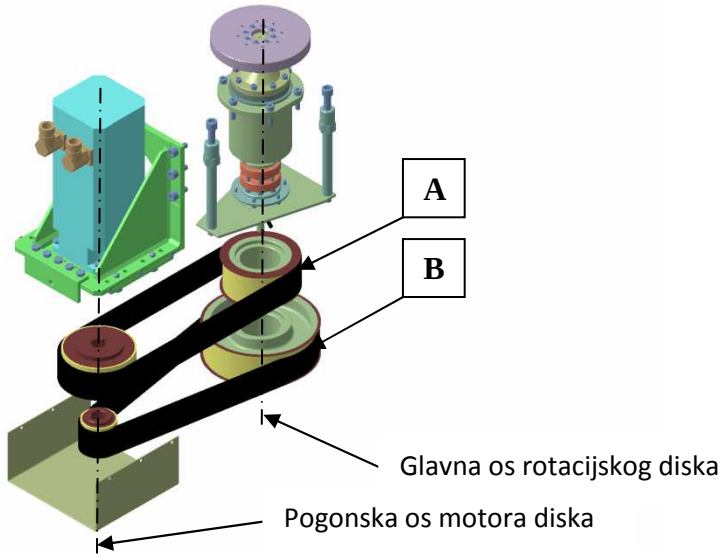
17 .... pomoćno vratilo

18 .... rotacijski disk

19 .... brtveni gumeni prsten

Slika 3.2.8 *Postavljanje aktivnog dijela modula diska na sklop*

Pomoćno vratilo se pomoću osam vijaka **M6** pričvrsti za glavno vratilo, a na njega se pomoću osam istih vijaka pričvrsti rotacijski disk. Ovakav sklop sa rotacijskim diskom čini aktivni sklop rotacijskog modula koji je spreman za rad na njemu. Rotacijski disk napravljen je od čelika za poboljšavanje i mora biti veoma krut jer na njega dolazi uzorak koji se ispituje. Da bi se uzorak mogao pritegnuti, na disku se nalazi osam rupa na jednom promjeru da se uzorak vijcima može pritegnuti za rotacijski disk.



Slika 3.2.9 *Prikaz modula rotacijskog diska sa oba diobena para remenica*

Slika 3.2.9 prikazuje modul rotacijskog diska zajedno sa oba moguća diobena para remenica i remena. Ako se želi da brzina vrtnje diska bude jednaka onoj na motoru, onda će se uzeti diobeni omjer ***i = 1*** kako bi se disku dala brzina koju ima motor. Tada će se morati paziti na moment tereta koji ne smije biti maksimalni. U tom bi slučaju pregorio motor. Za maksimalni moment se brzina mora reducirati tri puta kako bi motor ostao unutar graničnih varijabli. Tada će prijenosni omjer biti $i = 3$.

A ... diobeni omjer i = 1 => remenski par z_1 = 48, z_2 = 48

B ... diobeni omjer i = 3 => remenski par z_1 = 24, z_2 = 72

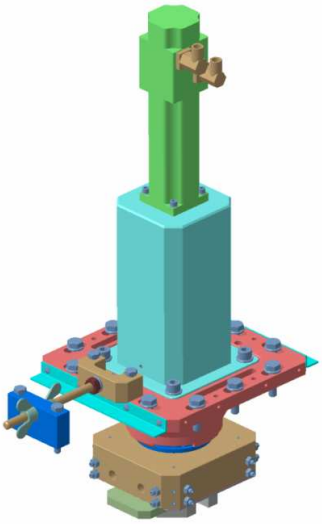
Promjena diobenog omjera brza je i jednostavna jer se samo promjene remenice i može se nastaviti s daljnjim radom. Zupčasti remen ostaje isti za oba slučaja diobenog omjera, samo se mora dobro zategnuti na odgovarajući način da optimalno prenosi zakretni moment, a da se pri tome elastično previše ne opterećuje.

3.3 MODUL ZA OSTVARIVANJE NORMALNE SILE PRITISKA

Za ostvarivanje sile trenja između dva sparena materijala nije dovoljno imati samo relativnu brzinu među njima već i normalnu silu pritiska tijela o tijelo. Zato je nužno napraviti modul koji će prihvaćati uzorak i sa njime stvarati pritisak na drugo tijelo koje je pričvršćeno na donji stol diska ili kolica ovisno o metodi ispitivanja. Ta se sila može ostvarivati na više načina tako da se postavi neki teret na vodilice te bi sama težina tereta stvarala silu pritiska, a moguće ju je ostvariti i preko neke prednapregnute opruge koja se prednapreže u onolikom iznosu kolika se sila želi dobiti. To su samo dva praktična načina, no tih načina ima još jako puno, pa je ovdje bitno da se ta sila u svakom vremenskom trenutku može smanjiti i povećati po volji.

Potrebna je dakle regulacija koja će nadzirati silu da bude u željenim granicama. To je potrebno iz razloga što se kod ispitivanja uzorka u svakome trenutku mijenjaju parametri ispitivanja i unosi poremećaj izvana u sustav. Poremećaj djeluje na normalnu silu tako da joj povećava i smanjuje iznos i kada se želi ta sila držati konstantnom neizbježno se mora uvesti regulacija. Regulacija ne bi bila potpuna da ne postoji povratna veza koja na početak vraća izvještaj o stanju na ˝terenu˝.

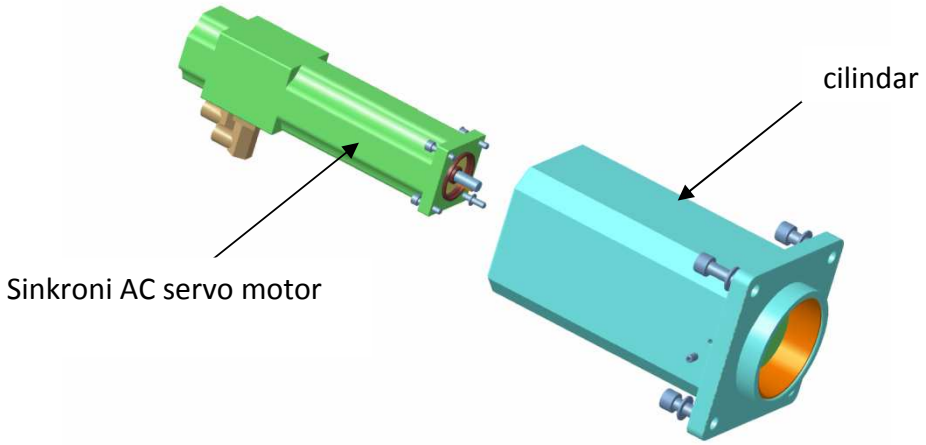
Ono što motri stanje terena su senzori sila koji moraju biti smješteni unutar glave na način da što efikasnije i bez greške sustav informiraju o sili koja se stvara u pojedinom trenutku. Regulator računala koji će primiti iznos te sile usporedit će je sa narinutom vrijednošću i na bazi toga će pojačati djelovanje na izlazu kako bi u idućem trenutku povećao njen iznos i smanjio grešku ili pak smanjio ako je u trenutku prije ona bila veća od narinute. Senzori sila ne smiju dozvoljavati pogreške zato se trebaju na što bolji način smjestiti na najbolje mjesto.



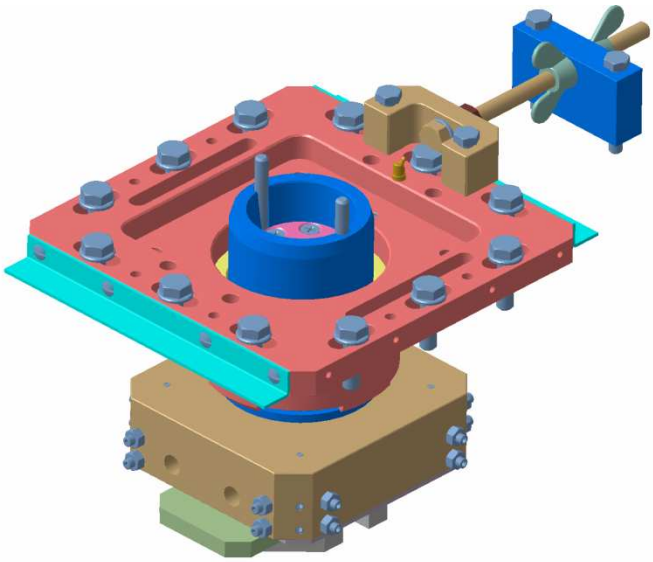
Slika 3.3.1 *Modul za ostvarivanje normalne sile pritiska*

Dakle ovaj modul služi kako bi pomoću senzora sila što bolje izmjerio njihov iznos u svakom trenutku te dao tu informaciju računalu koje će nakon toga djelovati na pogonski servo motor. Pogonski servo motor smješten je na samom modulu za ostvarivanje normalne sile i povezan je aktuatorom koji će, kad mu računalo dade signal, djelovati na način da smanji silu ili je poveća u idućem trenutku.

Time je zatvoren regulacijski krug, koji je zatvoren unutar samog modula i računala koji ga nadzire i regulira. Modul za ostvarivanje normalne sile sastoji se od dva osnovna podmodula. Prvi koji čini tijelo sustava je cilindar s motorom, a drugi dio je senzorska glava.



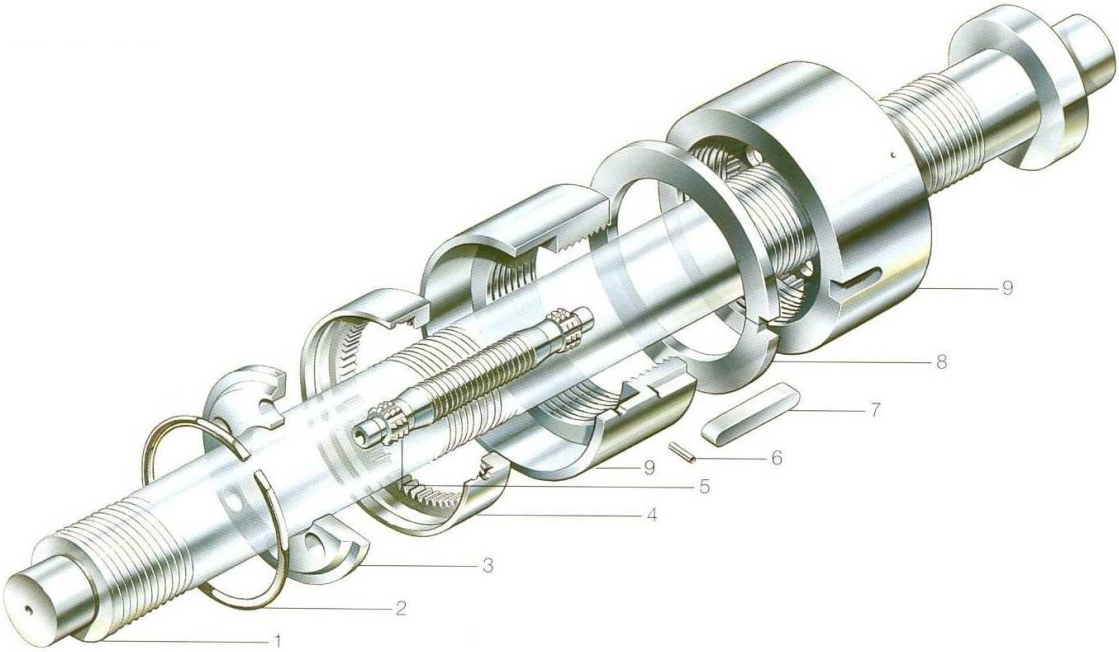
Slika 3.3.2 *Cilindar sa sinkronim AC servo motorom*



Slika 3.3.3 *Senzorska glava*

Senzorska glava se pomoću dva vijka i sustavom koničnog stošca spaja na klip cilindra te na principu klina čvrsto prijanja uz njega nakon stezanja vijaka.

Sinkroni AC servo motor stegnut je vijcima na gornje čelo cilindra te je na taj način fiksiran. Elastične podložne pločice koje idu s vijcima uvjetuju sigurnost da spoj ostane čvrst i siguran. Cilindar je kompaktan sklop koji u sebi ima pomičan klip koji unutar cilindra klizi gore – dolje zahvaljujući planetarnom navojnom vretenu koji mu to omogućuje. Planetarno navojno vreteno je dobro uležišteno unutar cilindra te nema mogućnosti nekih nepredviđenih oscilacija. Kako funkcionira planetarno navojno vreteno? Prije odgovora pogledajmo sliku 3.3.4:



Slika 3.3.4 *Planetarno navojno vreteno*

Dijelovi ovog planetarnog vretena su slijedeće:

1 .... navojno vreteno
2 .... sigurnosni prsten
3 .... ploča za vođenje
4 .... zubni vijenac
5 .... navojni valjak
6 .... sigurnosni zatik
7 .... pero
8 .... međuploča
9 .... navojna matica

Ovo navojno vreteno radi tako da se između dvije navojne matice (9) stavi međuploča (8). Nakon toga se postavi sa vanjske strane slobodnog kraja matice zubni vijenac (4), te ploča za vođenje (3) koja se osigura u svom ležištu sa sigurnosnim prstenom (2). Kako ploča za vođenje ima 6 rupa na čeonom dijelu u te rupe se uležište navojni valjčići (5) koji obodno legnu na unutrašnji dio matice svojim navojem, a zubima na prednjem i stražnjem obodnom dijelu legnu na unutrašnji dio zubnoga vijenca tako da s njime čini unutrašnji zupčani par. Na kraju se i sa druge strane postave zubni vijenac (4) i ploča za vođenje (3) koja se osigura sigurnosnim prstenom.

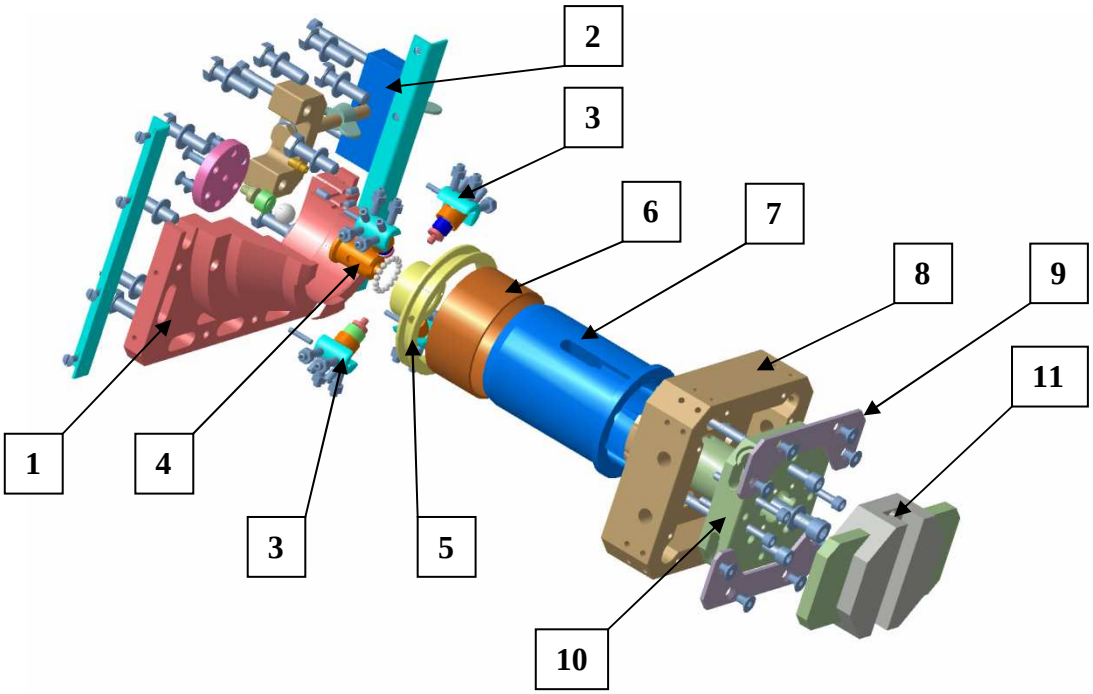
Ono što se dobilo je sklop koji glumi maticu koja se stavlja ovakva na navojno vreteno (1). Tako se matični sklop uklini perom na klip cilindra a navojno vreteno se uležišti na jednom kraju sa radijalno – aksijalnim dvorednim kugličnim ležajem dok mu je drugi kraj uležišten u matici koja klizi unutar kučišta cilindra kako se vreteno okreće. Vreteno je spojkom povezano na samo vratilo sinkronog AC servo motora te se vrti istim brojem okretaja kao i motor. Kada se sklop matice složi onda to izgleda kao na slici 3.3.5. Za tribometar se koristi vreteno tipa ***RGT 8.1.25 KL10***.

Slika 3.3.5 *Planetarno navojno vreteno tipa RGT 8.1.25 KL10*

Posebno kod ovog vretena je da se uz neku brzinu vrtnje vretena ova njegova matica giba duplo sporije u aksijalnom smjeru nego bi to radila obična klizna matica i giba se u suprotnom smjeru od obične klizne matice uz isti korak. Kako vreteno ima desnokretni navoj, radi vanjskog obodnog dodira sa navojnim valjčićima (5), oni moraju imati lijevi navoj. Oni vanjsku maticu (9) dodiruju iznutra tako da matica ima isto ljevokretni navoj. Kako valjčići jure oko vretena u smjeru njegovog uspona to znači kao da se zamišljeno vreteno vanjskog promjera kao i matica, okreće u tom smjeru što znači da matica ide suprotno, odnosno po pravilu ljevokretnog navoja. Ovo su standardni sklopovi **INA**-e koji se kao takvi i kupuju. Ugradnju ovoga sklopa unutar sklopa cilindra vrši tvrtka HS-TEC, tako da se više o samom sklopu unutar cilindra ne može puno reći. Vreteno ima promjer **8 mm**, te korak navoja **1 mm** što znači da prilikom 1 okreta vretena pomak matice u aksijalnom smjeru bude **0.5 mm**, tj. na pola manjeg iznosa od koraka.

Ukupni uspon navoja je **H = 25 mm**, što bi značilo **50 okretaja** motora. Više u svezi planetarnog navojnog vretena može se pogledati u prilogu **B2** na kraju ovog rada ili više o takvim vretenima u **literaturi [7]**.

Cilindar je od čelika i pomoću 4 vijaka se montira na glavni nosač senzorske glave (1) sl. 3.3.6. Senzorska glava je temelj ovog mjerenja. Ona ima ugrađene senzore za mjerenje normalne sile pritiska i za mjerenje sile trenja. Taj donji dio modula (senzorska glava) brzo i bez poteškoća se može skinuti i na ovo mjesto staviti neka druga glava koja ima npr. funkciju rengenskog ispitivanja materijala. Vertikalno gibanje je omogućeno preko planetarnog prijenosa, vođeno kroz kučište cilindra tako da se brzom promjenom ove glave dobiva u punom smislu druga vrsta stroja, što bi značilo da je senzorska glava centar ove priče o ispitivanju trenja. Senzorska je glava samo nastavak cilindra na koji se može vezati bilo koja glava sličnog spojnog karaktera.
Sama glava je veoma složene izvedbe no prije samog objašnjavanja pogledajmo slijedeću sliku:

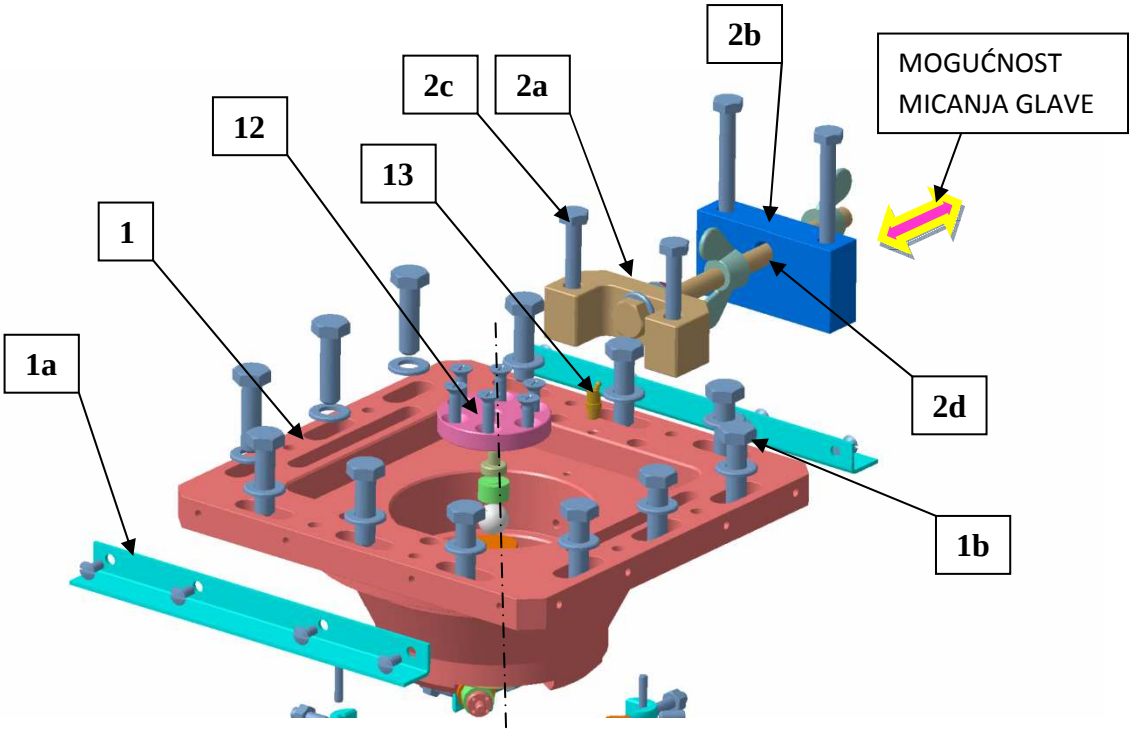


1 .... vanjski nosač senzorske glave (presjek)
2 .... sustav za fiksiranje glave
3 .... senzorski sklop
4 .... sustav za prednatezanje
5 .... odstojni prsten
6 .... klizni ležaj
7 .... cijevna spojnica
8 .... vanjski jednodijelni okov
9 .... štitnici
10 .... plutajući element
11 .... steznik uzorka

Slika 3.3.6 *Prikaz senzorske glave u rastavnom stanju*

Kako slika 3.3.6 prikazuje, sklop je jako složen pa će se promatrati u nekoliko koraka. Sastavljanje počinje od vanjskog nosača senzorske glave (1) na koji se postavljaju profilni oslonci (1a). Na nosač se postavlja 12 vijaka **M10** sa pločicama (1b) koji služe za pričvršćenje ovoga modula na klima komoru.

Kako prilikom procesa rada djeluju jake sile trenja u horizontalnom smjeru, unatoč 12 vijaka postoji mogućnost da se cijeli modul pomakne što bi moglo uzrokovati greške u ispitivanju, jer ono što je bitno, jest da je cilindar sa senzorskom glavom krut na nosaču klima komore. Zato se postavlja sustav za fiksiranje koji se sastoji od jarma (2a) koji je vijcima (2c) stegnut za vanjski nosač. Na nosač klima komore pritegne se oslonac (2b) kroz koji se provlači vijak za fiksiranje (2d). Jaram se pritegne maticom, te se sada može pomicati po aksijalnoj osi zajedno sa cijelim modulom kako prikazuje slika 3.3.7:

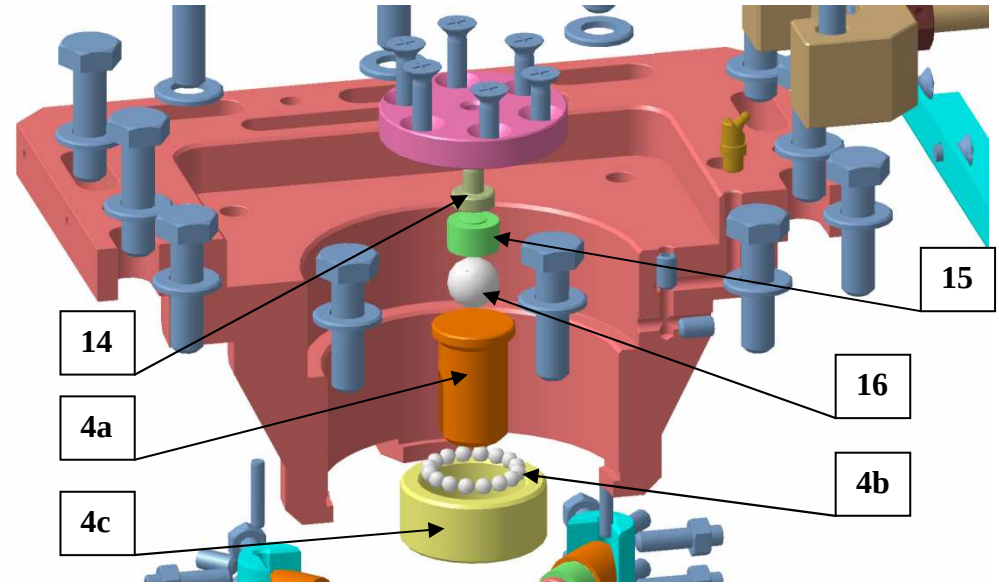


1a .... profilski oslonac
1b .... vijci s pločicama za stezanje nosača glave
2a .... jaram za fiksiranje glave
2b .... oslonac sustava za fiksiranje glave
2c .... vijci za stezanje jarma
2d .... vijak za fiksiranje glave
12 .... gornja pločica
13 .... mazalica

Slika 3.3.7 *Prikaz sklapanja senzorske glave – gornji elementi*

Fiksiranje se obavlja na način da se leptir-maticama pritegne modul na oslonac (2b) i na taj se način veže ovaj modul na kučište klima komore i ne dozvoljava mu nikakav pomak. Sa gornje strane još se montiraju gornja ploča (12) koja služi za prekrivanje senzorskog dijela sa gornje strane i mazalica (13) koja omogućuje podmazivanje unutrašnjosti cilindra kako postoji gibanje klipa spram kučišta cilindra. Slika 3.3.8 prikazuje kako se sklapa sklop senzora normalne sile.

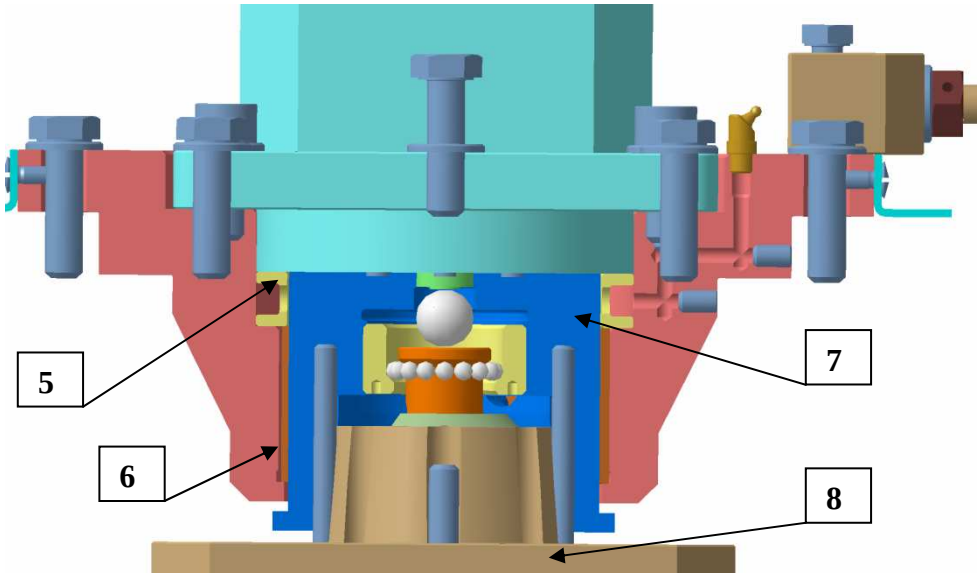
U provrt gornje ploče (12) stavi se oslonac vertikalnog senzora (14) koji je izrađen od zakaljenog čelika kako bi bio što tvrđi da se s vremenom ne deformira što bi značilo, budući da oslonac senzora ima sa senzorom s gornje strane kontakt u točki, nepreciznost mjerenja sile s vremenom. Na čelo oslonca postavi se senzor sile tipa **LC 307** (15) kojemu je kapacitet sile **5000 N**. Njegove čeone površine su sferne tako da sa kuglicom (16) koja dolazi sa donje strane senzora ima dodir u točki. Kuglica sa donje strane mora biti isto tako kaljena kao i oslonac senzora sa gornje strane senzora sile.



4a .... glava prednaprezanja
4b .... kuglični ležajni vijenac
4c .... matica prednaprezanja
14 .... oslonac vertikalnog senzora
15 .... tenzometarski senzor sile
16 .... kaljena kuglica

Slika 3.3.8 *Sklop senzora normalne sile*

Kuglicu pritišće sa donje strane glava prednaprezanja (4a) koja prednapreže senzor prilikom sklapanja tako da se ručno zakrene matica prednaprezanja (4c) koja je smještena unutar kučišta cijevne spojnice (7, slika 3.3.9). Unutar spojnice je navoj tako da se matica zakretanjem pomiče gore-dolje i time preko kugličnog ležajnog vijenca (4b), koji se zakreće s njome, priteže glavu prednaprezanja, odnosno senzor. Kuglični vijenac ovdje služi kao valjni ležaj.

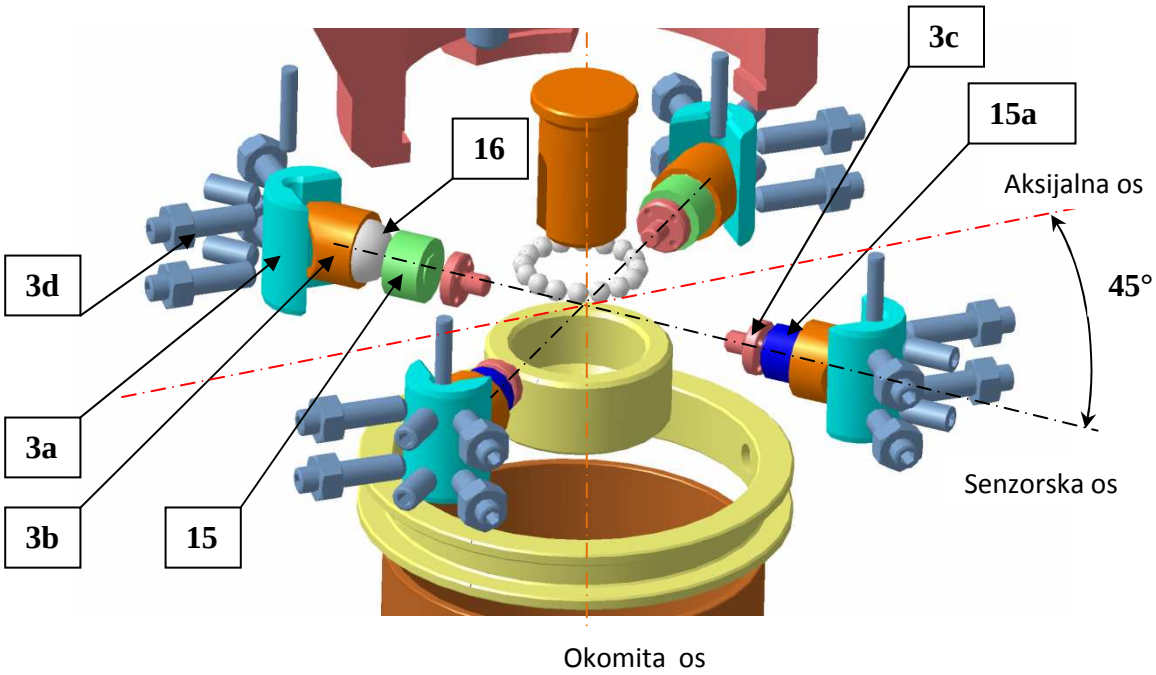


Slika 3.3.9 *Pogled kroz presjek na senzor vertikalne sile*

Čelična cijevna spojnica (7) može se pomicati zajedno sa klipom na koji se spaja pomoću dva dugačka vijka. Zato se sa njegove vanjske strane postavljaju odstojni prstenovi (5) kroz koji mast iz mazalice dolazi na mjesto relativnog gibanja. Iza toga dolazi klizni ležaj (6). To je prsten od kositrene bronce po kojemu klizi cijevna spojnica (7). Ležajni prsten i odstojni prsten zajedno su postavljeni na dosjed vanjskog nosača senzorske glave (1) sa njegove gornje strane. Cijevna spojnica (7) dolazi odozdo i sjeda tako na sklop da mu srednji promjer sjedne dosjedno oko senzora tako da ga bočno osigura. Nakon što matica prednaprezanja stegne senzor odozdo preko glave prednaprezanja, senzorski sklop normalne sile je fiksan i spreman za mjerenje.

Ispod cijevne spojnice dolazi vanjski jednodjelni okov (8) izrađen od poboljšanog visokolegiranog čelika koji služi kao kučište za horizontalne senzore sila. Kako cijevna spojnica i jednodjelni vanjski okov imaju koničnu strukturu, jedan izvana, drugi iznutra, te ih se pomoću 4 vijka međusobno spaja i priteže tako da vanjski konus legne na unutarnji. Taj je konus ***standardni konus za alatne strojeve***. Nakon toga pomoću dva dugačka imbus vijka pritegne se dosadašnji sklop senzorske glave na klip cilindra koji ima također konični vanjski dio i zatezanjem vijaka dobije se velika sila trenja koja drži spojene dijelove zajedno s vijcima. Ono što je ostalo za postavljanje je donji sklop senzorske glave, a tu spada senzorski sklop koji dolazi na plovak.

Pogledajmo sliku 3.3.10:

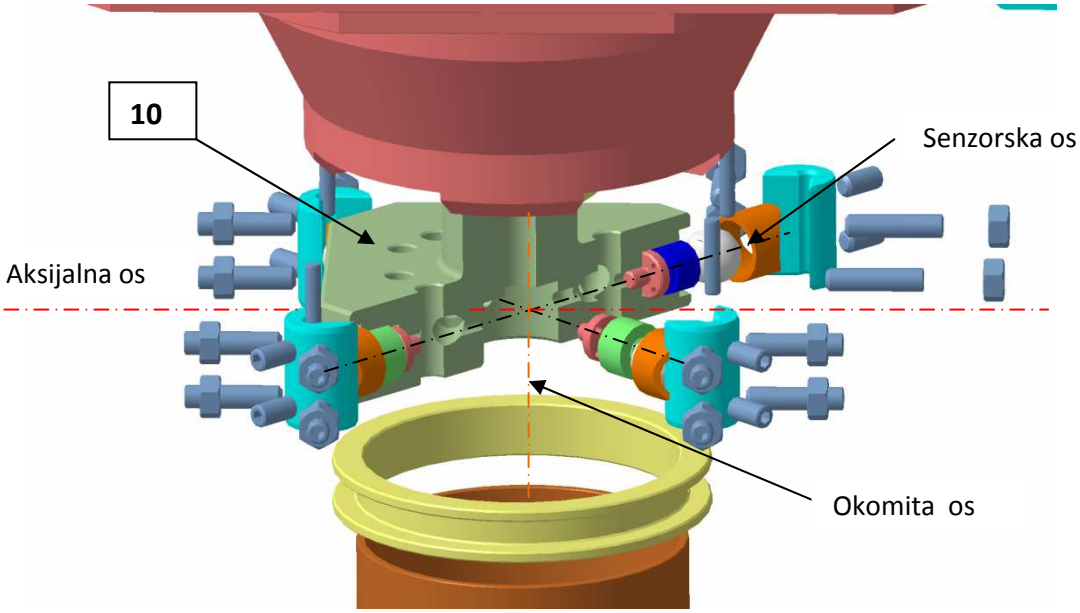


3a .... kaljeni kutnik
3b .... vodilica kugle
3c .... kaljeni oslonac senzora
3d .... vijci za regulaciju uležištenja
15a .... lažni senzor
15 .... tenzometarski senzor sile
16 .... kaljena kuglica

Slika 3.3.10 *Prikaz sklopa senzora koji mjere silu trenja*

Senzorski sklop načinjen je od nekoliko elemenata koji omogućuju da senzor bude dobro uležišten i da precizno mjeri silu trenja.

Sustav je načinjen od četiri senzorskih podsklopova koji su međusobno raspoređeni u krug pod **90°** oko okomite osi, **45°** zakrenuti od glavne horizontalne aksijalne osi. Svaki senzorski podsklop smješten je u svoje uležištenje koje se nalazi između plovka senzorske glave (10) i vanjskog jednokrilnog okova (8).

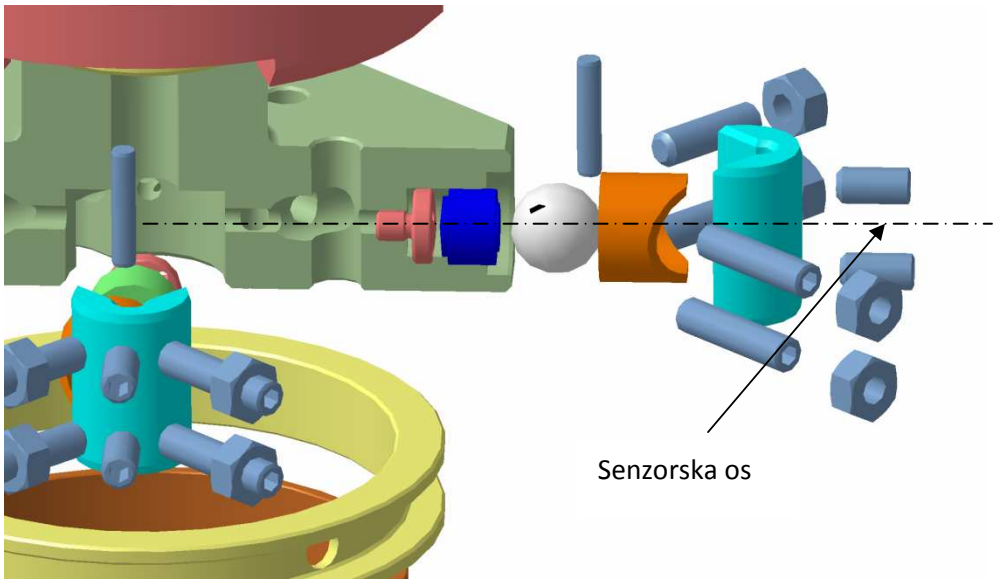


Slika 3.3.11 *Presjek plovka senzorske glave sa senzorskim podsklopovima*

Prvi element senzorskog podsklopa koji se umeće unutar provrta plovka (10) je kaljeni senzorski oslonac (3c, slika 3.3.10). To je kaljeni element koji dosjedno legne unutar svog sjedišta. Prednje čelo mu je sfernog oblika kako bi sa tenzometarskim senzorom sile (15) činio dodir u točki. Svi elementi ovoga podsklopa nalaze se na istoj osi. Broj horizontalnih senzora je 2, a kako postoje četiri oslonca radi preciznog vođenja na dvama osloncima su smješteni lažni senzori (15a) koji su po vanjskom obliku i masi ravnopravni pravim senzorima, no to su obični čelični kaljeni elementi kako se simetričnost sustava i vođenje ne bi narušili. Pravi senzori postavljeni su tako da su međusobno razmaknuti za 90°, a pod 45° su zakrenuti od aksijalne osi. Na taj način mogu mjeriti silu trenja u oba smjera, a uz to osiguravaju dobro uležištenje sustava. Sentor je sa druge strane poduprt kaljenom kuglicom (16) koja se nalazi unutar brončane vodilice (3b) koja osigurava kuglici uležištenje i vođenje. Brončana vodilica je u čvrstom dosjedu sa plovkom tako da je stabilna. Cijeli taj senzorski podsklop oslonjen je preko kuglice na kaljeni kutnik (3a) na koji je kuglica oslonjena na dvije točke sferne površine koje su razmaknute 90°.

Četiri kuglice oslonjene svaka na dvije točke čini stabilan sustav sa jednim stupnjem slobode gibanja. Kuglice prilikom spuštanja i dizanja klipa čine valjna tijela, budući da se plovak pomiče te je sastavni dio pokretnih dijelova modula, a vanjski je okov nepomičan, a upravo su na njegove kuteve postavljeni kaljeni kutnici po kojima se vrši koturanje kuglica unutar svoje vodilice (3b). Kutnik je napravljen od visokolegiranog čelika,a s njime i kuglice koje se ne bi smjele s vremenom nikako deformirati unatoč velikim oscilacijskim bočnim pritiscima prilikom ispitivanja.

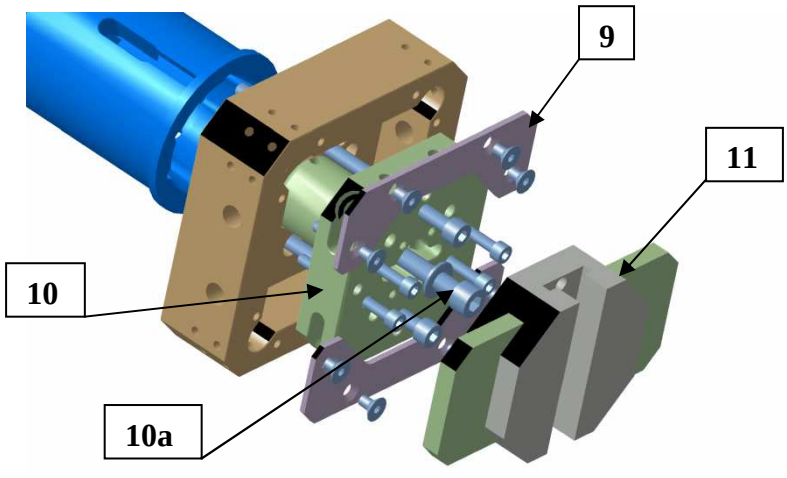
Svaki senzor, kako je postavljen pod 45° od aksijalne osi na kojoj nastaje sila trenja, mjerit će **70,71 %** njene stvarne veličine tako da će vrijednost koja ulazi u računalo, a to je ona zapažena na senzoru, morati biti povećana za koeficijent povećanja sile trenja koji iznosi **1,4142** kako bi se dobila ona stvarna sila trenja kao važan podatak. Plutajući plovak također je važan element koji ne smije dozvoliti nikakvu deformaciju unutar svojih dimenzija, iako je pri ispitivanju stalno oscilacijski opterećen. Zato se i on izrađuje od visokolegiranog čelika koji ima visoku trajnu dinamičku čvrstoću.



Slika 3.3.12 *Prikaz slaganja senzorskih elemenata u sklop*

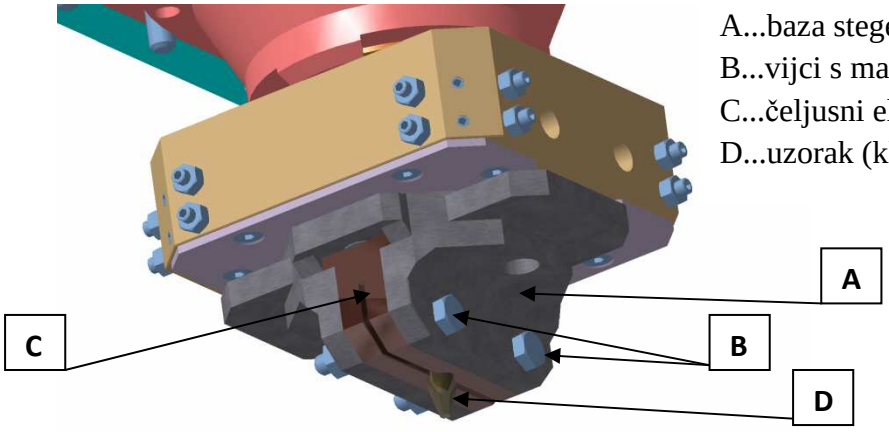
Kako bi kuglice što bolje ostvarile dvostruki dodir sa kaljenim kutnicima, kutnici se podešavaju pomoću svornih vijaka (3d, sl. 3.3.10), kojima su trostrano poduprti. Tim vijcima se dade podesiti kutnik veoma precizno, tako da se ostvaruje fino kotrljanje kuglice po kutniku bez udara koji bi utjecali na mjerenje. Nakon što se plovak (10) sa senzorskim podsklopovima postavi unutar jednodijelnog okova tada se imbus vijkom (10a, sl. 3.3.13), koji radi osiguranja ima još i elastičnu podložnu pločicu, pritegne plovak na glavu prednaprezanja (4a, sl. 3.3.8) koja ima navojni provrt **M10** sa unutrašnje strane. Na taj je način plovak sa svih 4 senzorska podsklopa (3, sl. 3.3.6), te sa glavom prednaprezanja (4a) ovješen na maticu prednaprezanja (4c) preko kugličnog vijenca (4b, sl. 3.3.8), te vođen preko 4 kuglice po kutnicima smještenim na vanjski okov senzorske glave. Kada bilo koja sila dođe na senzorsku glavu ona će bez ikakvih gubitaka preko svojih senzora sila izmjeriti vrijednost djelujuće sile na glavu na način da svaki senzor pokaže svoju komponentu te djelujuće sile.

Maksimalni vertikalni put koji klip sa senzorskom glavom može postići je **25 mm**. Taj put je ograničen sa ukupnim korakom planetarnog vretena koji je **25 mm**. Za ovaj slučaj mjerenja nije ni potreban veći vertikalni put.



Slika 3.3.13 *Prikaz slaganja donjeg sklopa senzorske glave*

Da bi se i mehanički osigurao plovak sa donje strane postave se dva simetrična štitnika (9) koji se pričvrste na plovak sa donje strane upuštenim imbus vijcima. Sada se može reći da je senzorska glava složena. Ono što još ide odozdo na nju, tj. na plovak je dakako stega (11) koja će čvrsto prihvatiti uzorak kako bi se mogao ispitivati. Zasad nema plana o univerzalnoj stegi koja bi mogla prihvatiti sve vrste uzoraka. Po potrebi će se izraditi potrebna stega za određenu vrstu uzoraka koji će se ispitivati na stroju. Stega može biti načinjena da može mehanički prihvaćati uzorak, no ona može biti i pneumatska i hidraulična, no ove dvije zadnje verzije bile bi suvišno skupe, jer bi se na stroj trebao uvesti pneumatski ili hidraulični sustav koji nije jeftin.



A...baza stege
B...vijci s maticama za stezanje
C...čeljusni element stezanja
D...uzorak (klin)

Slika 3.3.14 *Prikaz mehaničke stege sa uzorkom (klin)*

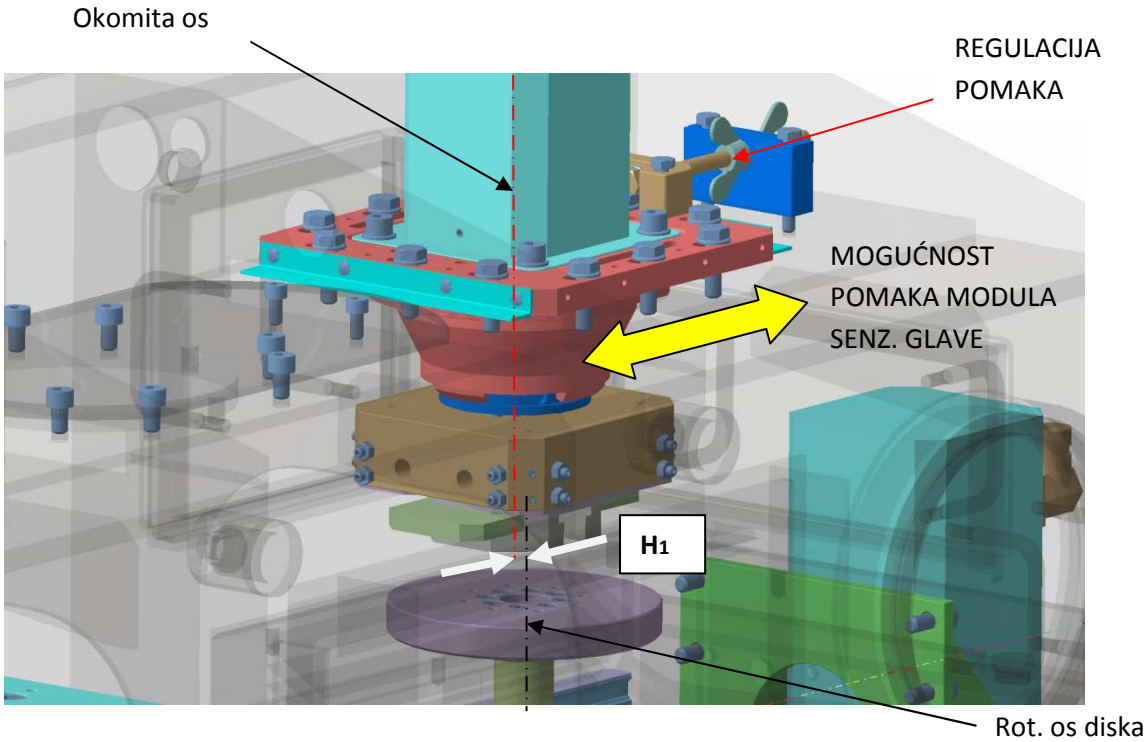
Slika 3.3.14 prikazuje jednu vrstu jednostavne mehaničke stege koja se sastoji od tri glavna dijela.

A .... baza stege
B .... vijci s maticama za stezanje
C .... čeljusni element stezanja
D .... uzorak (klin)

Stega se pritegne vijcima na samo čelo plovka, tj. njezina baza (A).

Čeljusni element je za svaki uzorak drugačiji i to točno onakav koji omogućuje fino prihvaćanje uzorka. Uzorci se tada stežu pomoću matičnih vijaka.

Ovo je jedna od jednostavnih opcija stezanja, no nije univerzalna.

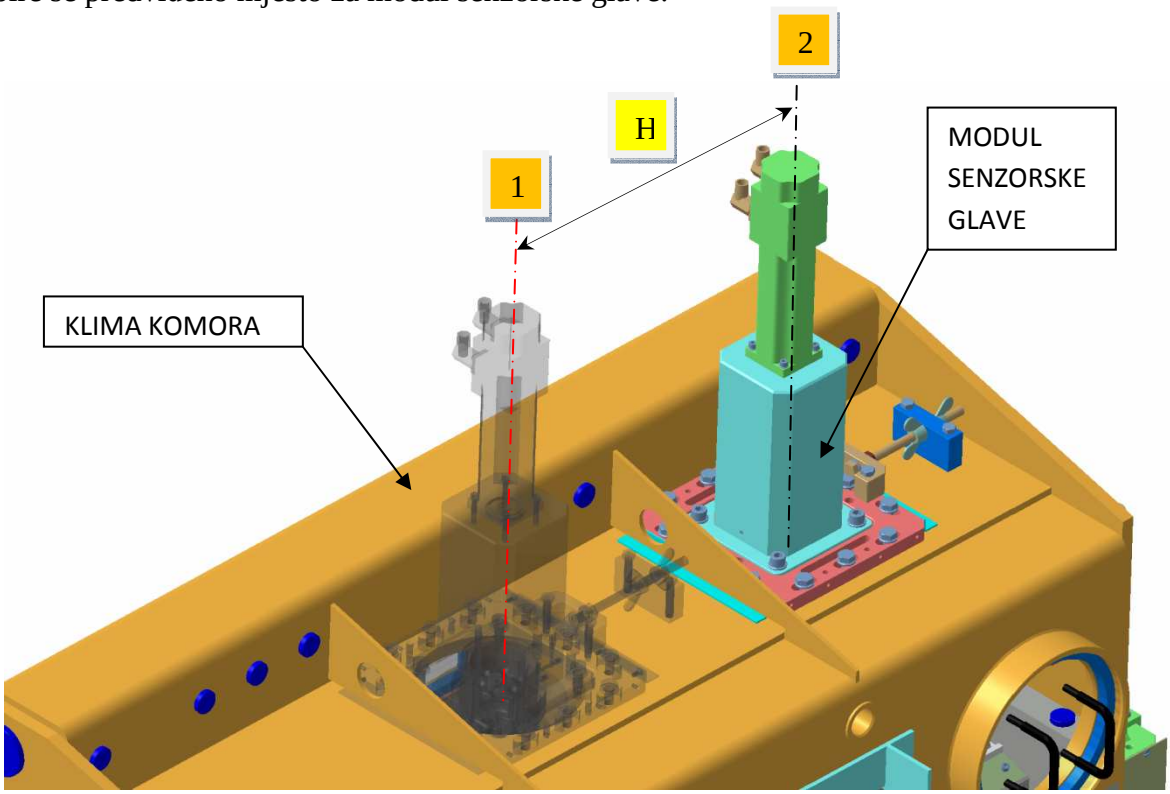


Slika 3.3.15 *Postav modula za ostvarivanje normalne sile na klima komoru*

Slika 3.3.15 pokazuje mogućnost regulacije pomaka modula senzorske glave duž aksijalne osi stroja u smislu da se podesi osni razmak $\mathbf{H_1}$ između okomite osi modula senzorske glave i rotacijske osi modula rotacijskog diska. Pomak modula senzorske glave je bitan kako bi se podešavao razmak spomenutih osi u smislu ***regulacije obodne relativne brzine uzorka na disku***. Kako se disk vrti određenim brojem okretaja, ako se želi dobiti veća relativna brzina među uzorcima, mora se povećati osni razmak. Maksimalna regulacija osnog razmaka je $\mathbf{H_1 = 20\ mm}$. Osni razmak se podesi prije samog početka rada, tako da uslijed rada bude konstantan.

Podešavanje osnog razmaka vrijedi samo pri radu sa rotacijskim diskom, dok kod rada sa linearnim modulom nema nikakvog podešavanja. Nakon podešavanja stežu se vijci kojima se modul senzorske glave čvrsto priteže na krov klima komore u za to predviđeno mjesto.

Već je spomenut pomak modula senzorske glave sa mjesta **1** iznad linearnog modula na mjesto **2** iznad rotacijskog diska. Pomak se odvija na način da se cijelom modulu otpuste vijci i cijeli se premjesti sa mjesta **1** na mjesto **2** kako prikazuje slika 3.3.16. Na krovu klima komore zato postoje dva identična mjesta razmaknuta osnim razmakom **H**, tako da ovisno o metodi koja se koristi, odabire se predviđeno mjesto za modul senzorske glave.

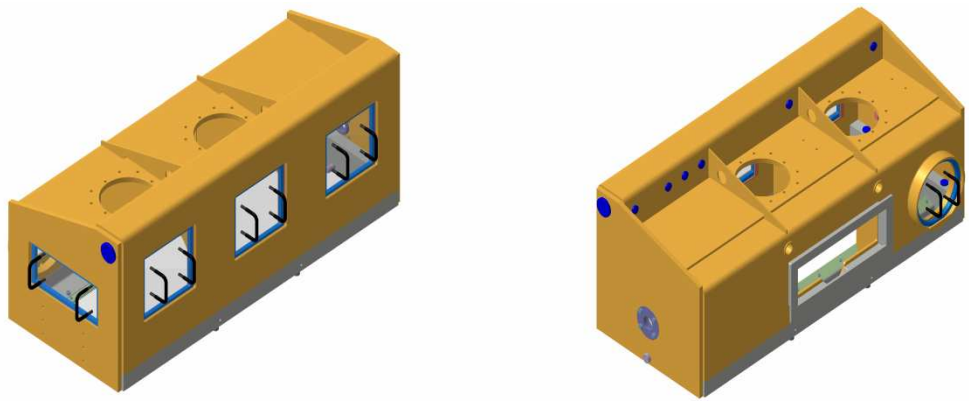


Slika 3.3.16 *Opcije za postavljanje modula senzorske glave na kučište klima komore*

Ovime je opisan konstruktivni dio ovoga modula, te njegove mogućnosti unutar ovoga tribometra. Sama senzorska glava ovoga tribometra je cijela osmišljena unutar Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu te je patent fakulteta. Mogućnosti mjerenja sila njome su velike i izuzetno je precizna jer su joj senzori postavljeni na takvim mjestima da se sile relativno ne gube disipacijom u vodilicama ili deformacijom prije no što dođu do senzora koji ih registrira. Vodilice su kotrljajuće i krute te je na taj način disipacijska energija gotovo jednaka nuli, te iskoristivost jako visoka.

3.4 KLIMA KOMORA I UREĐAJ ZA KLIMATIZACIJU KOMORE

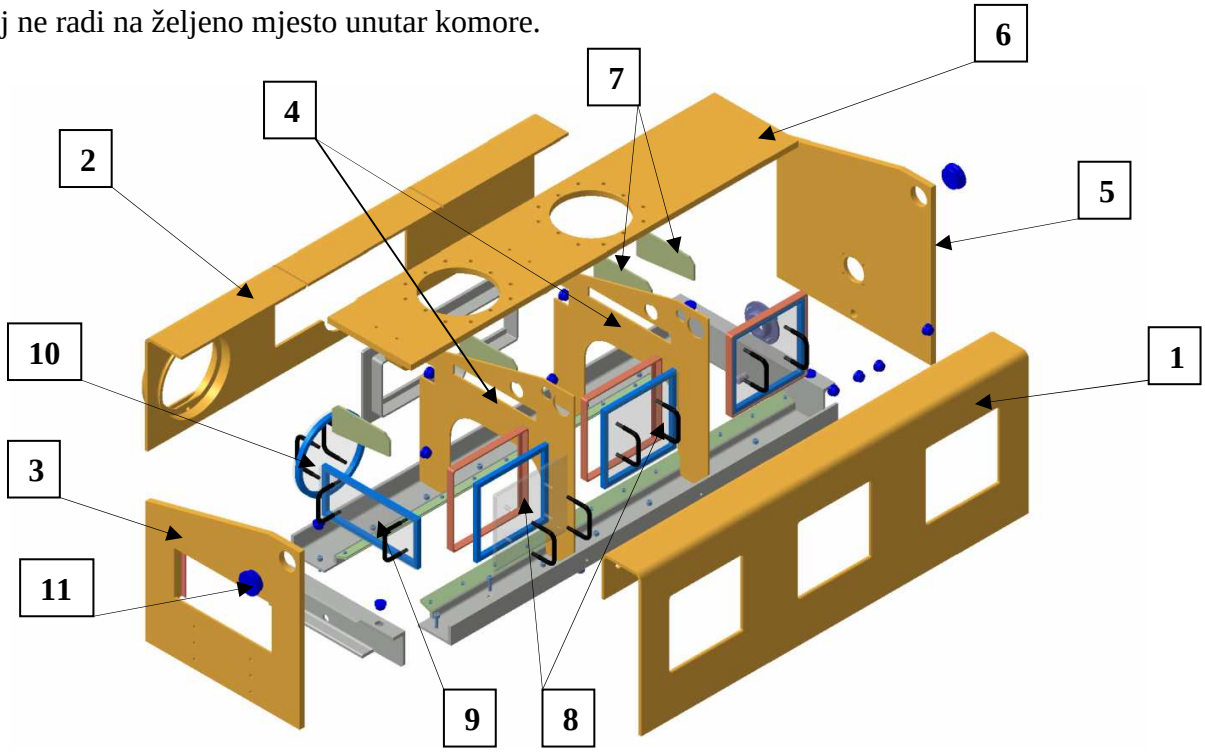
Ispitivanje trenja je postupak u kojemu se oslobađa toplina nastala trenjem između dvije ispitivane površine uzoraka. Ta toplina djeluje na sam materijal uzorka i na njegovu okolinu. Na materijal uzorka djeluje tako da prilikom povečanja temperature uzrokuje širenje samog materijala uzorka što utjeće na normalnu silu pritiska. Povećana temperatura unutar ispitivanog materijala uzrokuje strukturalne promjene što ponekad može biti čindbenik koji je nepovoljan za ispitivanje. Ispitivanja se puno puta odvijaju uz dodavanje ulja među dvije ispitivane površine kako bi se ispitivalo uz polusuho ili viskozno trenje. Neki put se ispitivanje vrši uz neko abrazivno sredstvo kako bi se ispitalo ponašanje površine uz to sredstvo ili kako bi se ustvrdilo koliko je to sredstvo efikasno za skidanje materijala pri ispitivanju npr. materijala za brušenje. Kako postoji opasnost od takvog ispitivanja da abrazivno sredstvo leti svuda okolo stroja usred ispitivanja, tako i ulja, masti i paste za ispitivanje isto tako špricaju uokolo stroja usred ispitivanja te onečišćuju okolinu stroja. Kada se sve ovo zbroji i doda se još temperatura koju bi voljeli nadzirati i regulirati, jasno je da se prostor ispitivanja mora odvojiti od svoje okoline. Zato se osmislila čvrsta, zatvorena i dobro izolirana komora koja će omogućiti pravilnu **regulaciju temperature rada bez vanjskih utjecaja**, te da okolina oko stroja bude **sigurna** i **čista**. Slika 3.4.1 prikazuje takvu komoru.



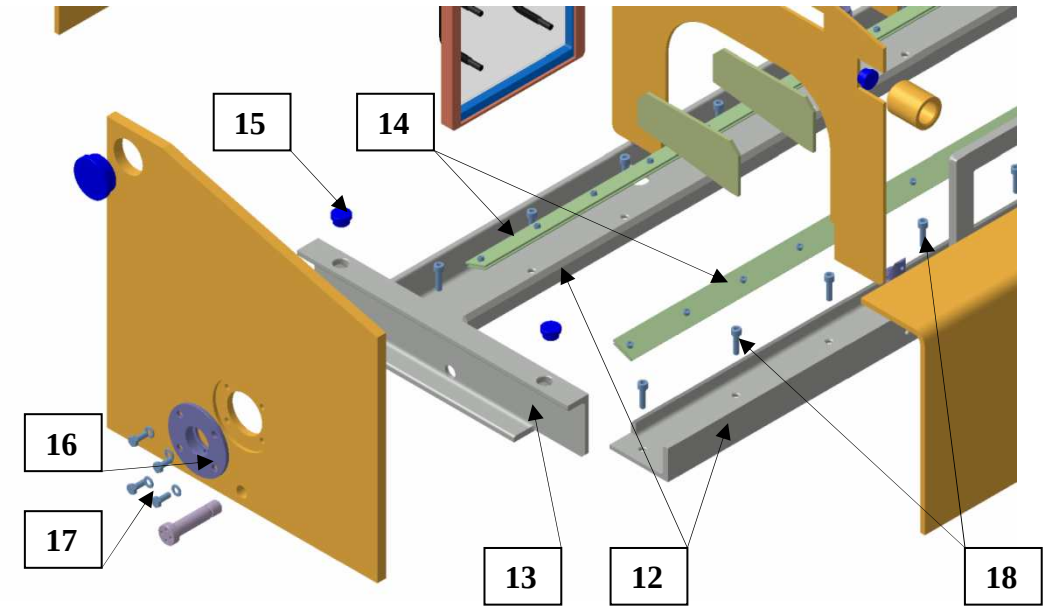
Slika 3.4.1 *Prikaz klima komore sa prednje strane i sa leđa*

Konstrukcija klima komore mora biti čvrsta, kruta i ne smije dozvoljavati jake vibracije. To je radi toga što je predviđeno da ona služi kao nosač, tj. postolje za modul senzorske glave koji mora biti, kako je opisano u prethodnom poglavlju, krute konstrukcije i ne smije radi samog mjerenja dozvoljavati pogreške. Zato se ovo kučište izrađuje od debelih čeličnih toplovaljanih limova i profila koji se međusobno zavaruju u zavarenu konstrukciju.

Komora mora dozvoljavati dostupnost ljudskih ruku na svako pojedino mjesto unutar komore bez muke, zato je na komori predviđeno 5 otvora kako bi se moglo doći u pojedinom trenutku, dok stroj ne radi na željeno mjesto unutar komore.

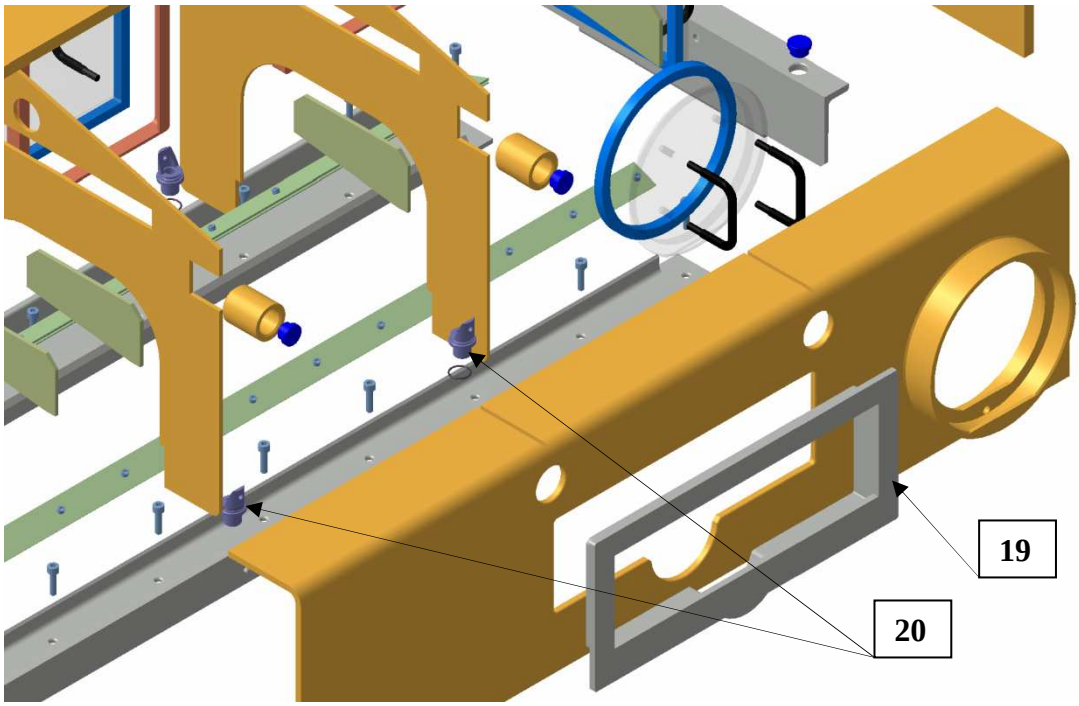


Slika 3.4.2 *Sastavljanje klima komore*



Slika 3.4.3 *Sastavljanje klima komore – uvećani prikaz sa boka*

1 .... prednji dio plašta
2 .... stražnji dio plašta
3 .... lijevi bok plašta
4 .... srednji poprečni nosači
5 .... desni bok plašta
6 .... krovni dio plašta
7 .... rebrasti nosači
8 .... prednji prozori
9 .... bočni prozor
10 .... stražnji okrugli prozor
11 .... gumeni brtveni čep - veći
12 .... uzdužni temeljni ˝U˝ profili
13 .... bočni temeljni ˝U˝profili
14 .... brtveni profili
15 .... gumeni brtveni čep - manji
16 .... brveni prsten za motku
17 .... vijci sa pločicama za stezanje prstena
18 .... imbus vijci za stezanje komore na postolje



19 .... okvir za klima uređaj
20 .... slivni šuplji vijci sa brtvom

Slika 3.4.4 *Sastavljanje klima komore – uvećani prikaz stražnjeg dijela*

Plašt komore čine dakle debeli čelični limovi koji se međusobno zavaruju. Spajaju se prednji dio (1), stražnji dio (2), bočni dijelovi (3, 5), poprečni nosači (4), te krovni dio plašta komore (6). Temeljni profili (12, 13) izrađuju se iz čeličnih toplovaljanih ˝U˝ profila koji su izbušeni odozdo kako bi se preko njih komora pričvrstila na postolje pomoću **16 imbus vijaka** (18). Ti profili se također međusobno zavaruju te se na njih navlači plašt i zavari se za temeljni obruč načinjen od profila.

Vratimo se plaštu. Radi njegovog dodatnog pojačanja krovnog dijela, zavaruju se dodatni rebrasti nosači (7) koji na taj način daju konstrukciji veću krutost. Prednji dio plašta ima izrezane rupe na koje se postavljaju prozori (8), a isto je učinjeno i sa lijevim bočnim dijelom plašta i sa stražnjim dijelom plašta kako bi se postavili bočni prozor (9), te stražnji okrugli prozor (10). Stražnji dio plašta ima još izrezanu rupu za postavljanje klima uređaja u nju. Svaki prozor je načinjen tako da ima svoju ramu, gumenu brtvu, te **PMMA** prozirnu ploču na koju se postavljaju ručke. Radi mogućnosti otvaranja prozora oni su postavljeni na panteve po kojima se otvaraju, a kako bi se zatvorili postavljena je brava. Pantevi i brave nisu prikazani na slici. Brtve na prozorima omogućuju dobru toplinsku izolaciju klima komore.

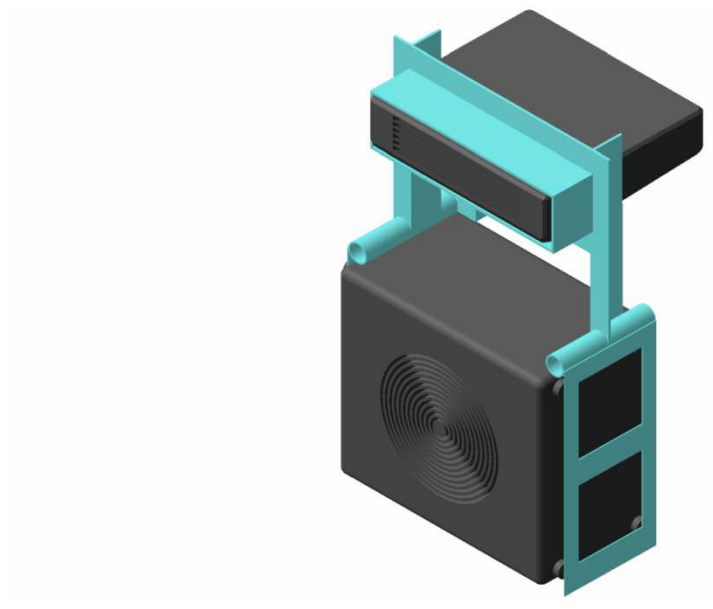
Kako je metal loš toplinski izolator, sa unutrašnje strane se postavlja na plašt dodatna ***stiropor*** (ekspandirani **PS**) toplinska i zvučna izolacija koja se tankim hladnovaljanim limovima zaštićuje iz nutra tako da se dobije sendvič stiropor između metalne oplate.

Da bi se omogućilo istjecanje ulja i drugih tekućina koje se upotrebljavaju u procesu rada iz komore, morali bi se na donji dio komore, koji dolazi tik do monobloka kolica linearnog modula na postolju, postaviti sa svake strane gumeni brtveni profili (14) koji konusno legnu između monobloka i temeljnog uzdužnog profila komore i stežu se vijcima kako bi brtvili.

Desni bok plašta na sebi ima provrt na koji se postavi brtveni prsten (16) načinjen od sipasa ***Mo (PA 66 + MoS_2)*** koji ima jako dobra ležajna svojstva. Taj se prsten pričvršćuje vijcima (17) na sam plašt komore, a kroz njega će kasnije ići motka linearnog aksijalnog modula, tako da osim brtvljenja ovaj prsten mora imati dobra ležajna svojstva. Na klima komoru moguće je postaviti još niz nekih dodatnih elemenata za koje se treba predvidjeti mjesto, pa je zato na plaštu načinjeno nekoliko provrta na koje se za sada radi izolacije stavljaju gumeni čepovi (11, 15).

Na stražnji dio oplate, na mjesto gdje dolazi klima uređaj, u rupu koja je načinjena mora se postaviti okvir klima uređaja (19) koji se zavaruje sa unutrašnje strane. Na njega fiksno dolazi klima uređaj.

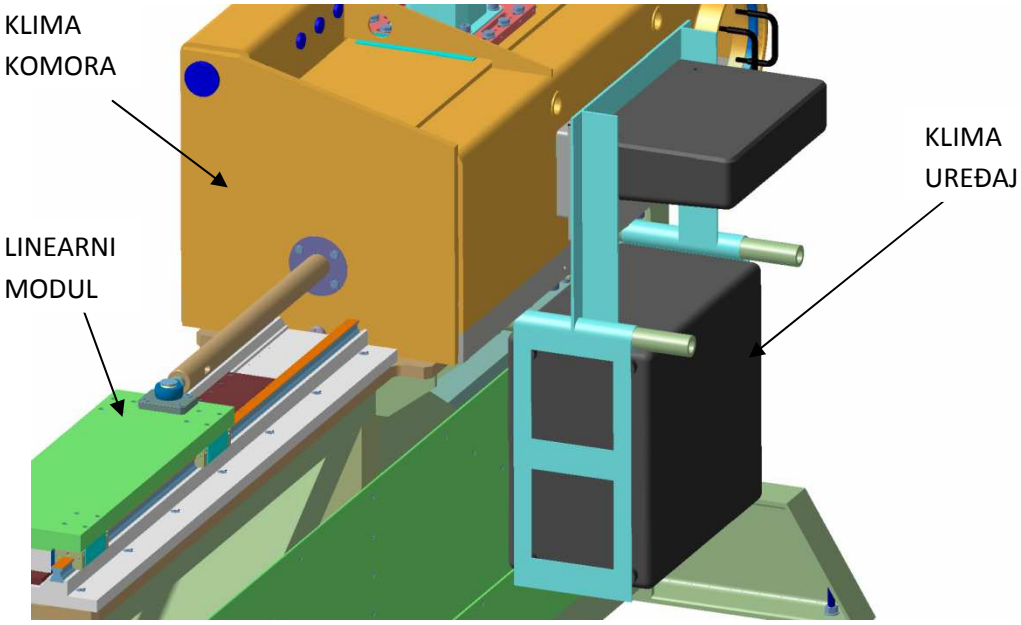
Kako bi tekućine, među kojima su najčešće ulja, izveli iz samoga stroja, postavljena su 4 plastična (**PA**) slivna šuplja vijka (20) kroz koje tekućina sa radnog mjesta izlazi van. Slivni vijci su zategnuti na temeljne profile klima komore i imaju brtveni prsten kako bi brtvili tekućinu. Na njih se s vanjske strane stave plastična crijeva koji tu tekućinu odvode u za to predviđeni spremnik. Sa stražnje strane na komoru dolazi klima uređaj kojeg prikazuje slika 3.4.5.



Slika 3.4.5 *Prikaz klima uređaja sa nosačem*

Kako je tribometar još u procesu izgradnje, nije se puno zalazilo u područje hlađenja i grijanja klima komore, pa ne mogu napisati ništa o samom klima uređaju osim da je kao i svi klima uređaji načinjen od sekcije za hlađenje i grijača za grijanje. Ovisno o načinjenom programu hlađenja i grijanja koji se napravi na računalu koji kontrolira tribometar, ovaj će klima uređaj grijati ili hladiti klima komoru.

U klima komori su postavljeni toplinski senzori koji registriraju temperaturni tok te daju informaciju kakvo je stanje u komori i na bazi toga regulator računala ocjenjuje da li će prema programu još grijati ili hladiti klima komoru. Broj toplinskih senzora u komori biti će nekoliko, od kojih će jedan mjeriti temperaturu same komore, te još nekoliko koji će mjeriti temperaturu uzoraka i temperaturu tekučine za podmazivanje i hlađenje.



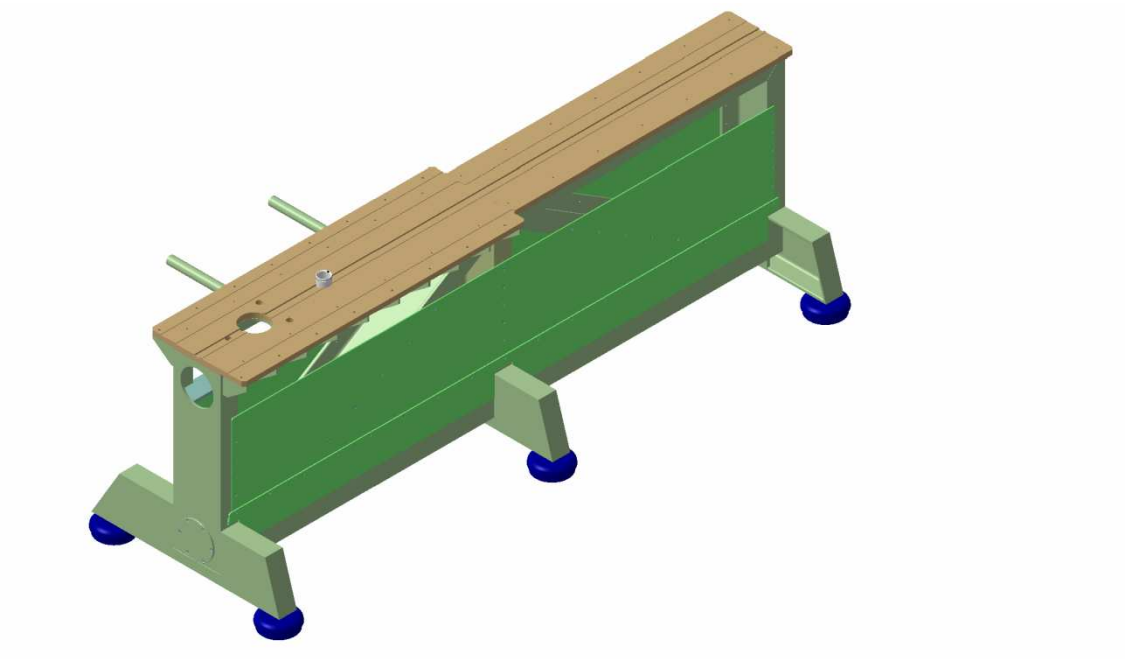
Slika 3.4.6 *Klima komora i klima uređaj smješteni na tribometru*

Slika 3.4.6 prikazuje klima komoru i uređaj smještene na sam tribometar. Lijepo se vidi i kako motka linearnog modula ulazi u komoru kroz brtveni prsten.

Ovime je opisan modul klima komore i klima uređaja koji su u principu dva različita modula, no funkcija im je povezana.

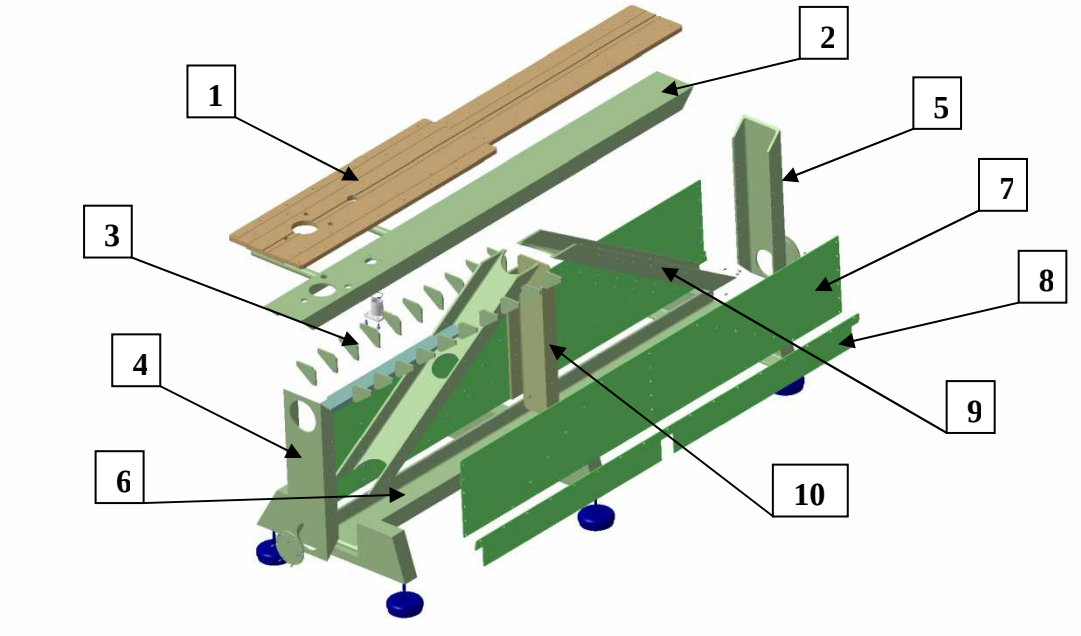
3.5 POSTOLJE TRIBOMETRA

Svi do sad opisani moduli imaju neku svoju primarnu funkciju koja je direktno povezana sa zadatkom tribometra. Postolje ima sekundarnu funkciju, a to je da na sebe veže ostale module, te svojom krutošću i prigušenjem vibracija osigura tribometru željenu točnost i brzinu. Postolje dakle mora biti čvrste konstrukcije, mora biti prilično glomazno da što bolje upije vibracije, te mora biti kruto i stabilno kako se ne bi pomicalo u prostoru tokom rada stroja, te kako ne bi došlo do progiba pokojeg elementa stroja na mjestima gdje djeluje sila. Postolje mora stabilno sjesti na pod bez da se koleba uslijed djelovanja procesa. Slika 3.5.1 prikazuje kako je osmišljeno postolje za ovaj tribometar.

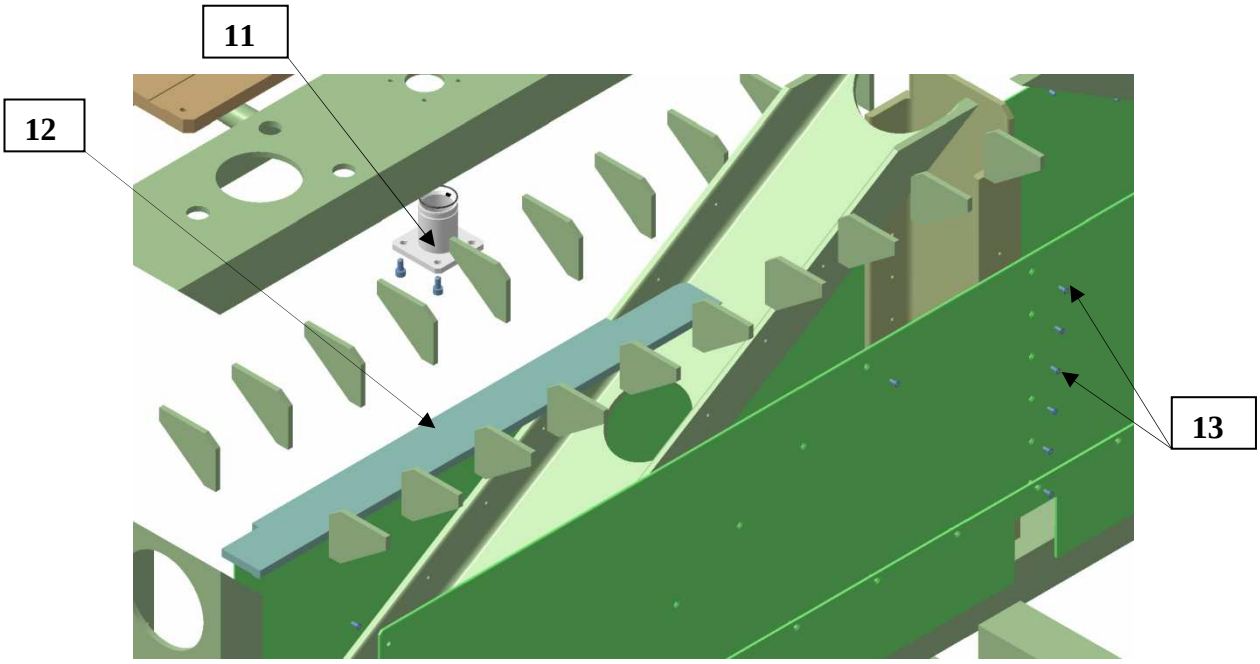


Slika 3.5.1 *Postolje tribometra*

Kako u procesu ispitivanja djeluju podosta velike sile postolje je izrađeno u skladu s time, veliko i glomazno. Konstrukcija postolja je napravljena od vruće valjanih čeličnih ˝**U - 20**˝ profila prikazanih na slici 3.5.2. Donji profil (6) na krajevima se iskosi **45°** te se zavari zajedno sa dva bočna profila (4, 5) koja su isto tako zarezana na krajevima pod **45°**. Zatim se odozgo postavi gornji profil (2) isto tako zakošen da sjedne između dva bočna profila te se zavari. Dobivena je rama. Nakon toga se pripremi srednji bočni profil (10), stavi se vertikalno u sredinu rame i zavari odozdo za donji, a odozgo za gornji profil. Sada se radi pravila stabilnosti konstrukcije pripreme još dva kosa profila (9) kako bi se umetnula između srednjeg i bočnih profila od jednog prema drugom kutu. Kada se ona dva zavare dobiva se stabilna i kruta rama.

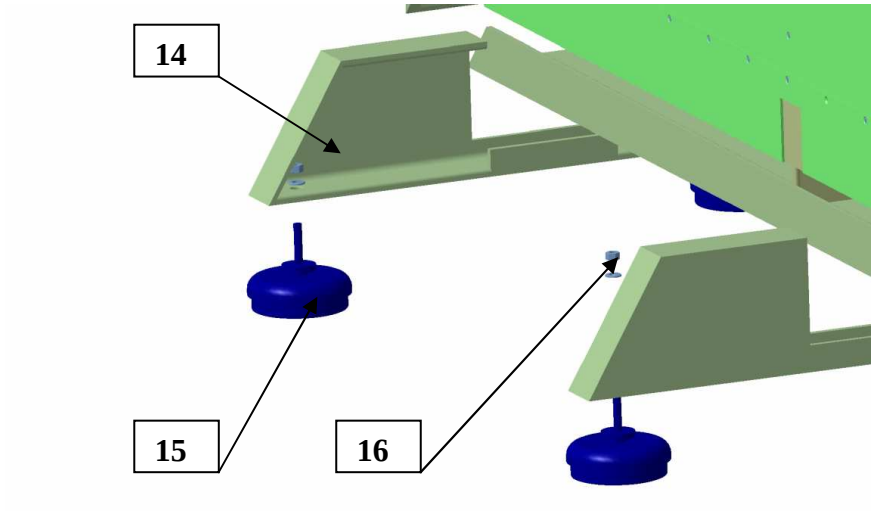


Slika 3.5.2 *Prikaz sklapanja postolja tribometra*



Slika 3.5.3 *Prikaz sklapanja postolja tribometra - srednji dio*

1 .... radni stol
2 .... gornji profil
3 .... rebrasti nosači
4 .... lijevi bočni profil
5 .... desni bočni profil
6 .... donji profil
7 .... zaštitna ploča
8 .... profil zaštitne ploče
9 .... kosi profili
10 .... srednji bočni profil
11 .... sifonska cijevna spojnica
12 .... podupora za pojačanje
13 .... vijci zaštitne ploče
14 .... podnožni profili
15 .... noga
16 .... matica za pričvršćenje noge



Slika 3.5.4 *Sklapanje podnožja postolja*

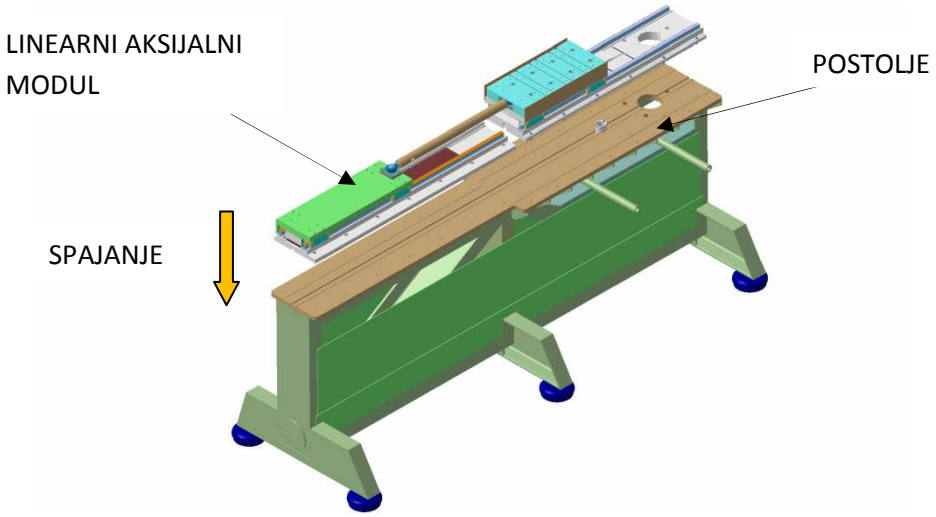
Nakon što se rama postolja sklopi i zavari, na nju se odozdola postave tri podnožna profila (14) te se zavare za samu ramu. Na te nožne profile dolaze noge (15) napravljene od neke plastične mase kako bi što bolje prigušile vibracije stroja. Broj nogu na stroju je **6** i kod svih je visina podesiva preko navojnog dijela noge koji kada se podesi, zategne se maticom (16) i time je riješen problem stabilnosti stroja na neravnom podu. Gornji profil rame mora imati izbušene dvije rupe od kojih manja služi za postavljanje sifonske cijevne spojnice (11) po kojoj se cijedi glavnina tekučina sa monobloka kolica kroz cijev van stroja u predviđeni spremnik. Sifonska spojnica pričvršćuje se za gornji profil sa 4 vijka i na nju se postavi gumeni brtveni prsten koji brtvi tekućinu koja dolazi odozgo. Veći provrt na gornjem profilu služi da se krozanj provuče modul rotacijskog diska.

Kako bi se klima uređaj mogao pričvrstiti na tribometar zavarene su još dvije okrugle cijevi za gornji profil na koje će ući nosač klima uređaja, te tako biti smješten na stroju. Radi ukrute rame, dodatno se ispod klima komore postavi podupora za pojačanje (12), a to je čelični ˝**L**˝ profil. Da bi se mogla postaviti klima komora i linearni aksijalni modul na postolje potreban je radni stol (1), tj. šira ravna čelična ploča izrađena sa rupama kako bi se na nju mogla pričvrstiti klima komora i linearni aksijalni modul. Radni stol mora imati brušenu gornju površinu nasjedanja, kako ne bi došlo do štetnih vibracija modula usred neravnina. Radni se stol odozdola zavaruje na gornji profil rame, a dodatnim se rebrastim nosačima (3) ukruti na uzdužnim rubovima. Ti nosači su od čeličnih limova i zavaruju se na ramu s jedne strane i radni stol s druge.

Kako rama ne bi bila goli kostur, postavi se s jedne i sa druge strane na njezina lica zaštitna ploča (7). To je tanki čelični lim pričvršćen upuštenim vijcima (13). Odozdo svake ploče stavi se profil zaštitne ploče koji ju ukručuje sa donje strane rame. Ovime se postupak slaganja postolja završio.

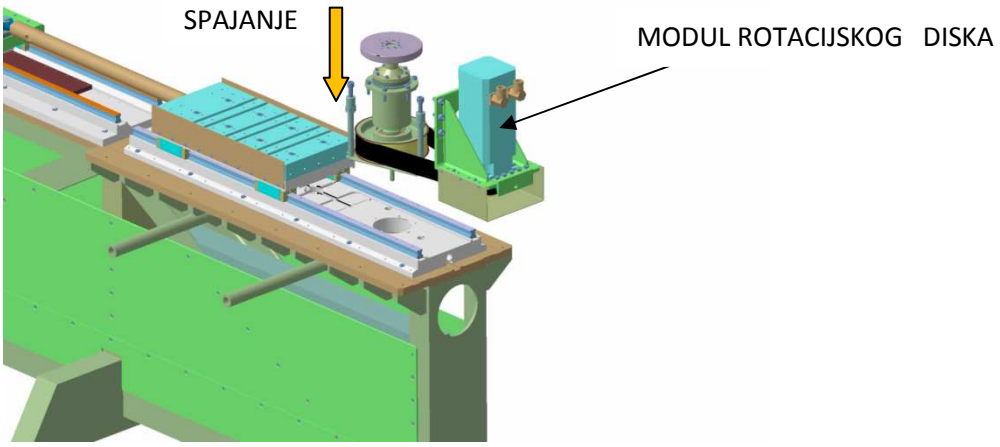
3.6 SKLAPANJE TRIBOMETRA

Nakon što su svi moduli potrebni za rad tribometra opisani konstrukcijski i funkcionalno, ostalo je u još samo u par crta prikazati kako i kojim redoslijedom se oni postavljaju na tribometar. Redoslijed slaganja je bitan u smislu da se stroj što prije složi bez muke kako ne bi došlo do toga da se moraju pojedini moduli rastavljati kako bi ih uopće mogli složiti. Na postolje stroja, koje se dobro namjesti kako bi stabilno leglo na pod, prvo se odozgora postavi linearni aksijalni modul kako prikazuje slika 3.6.1:



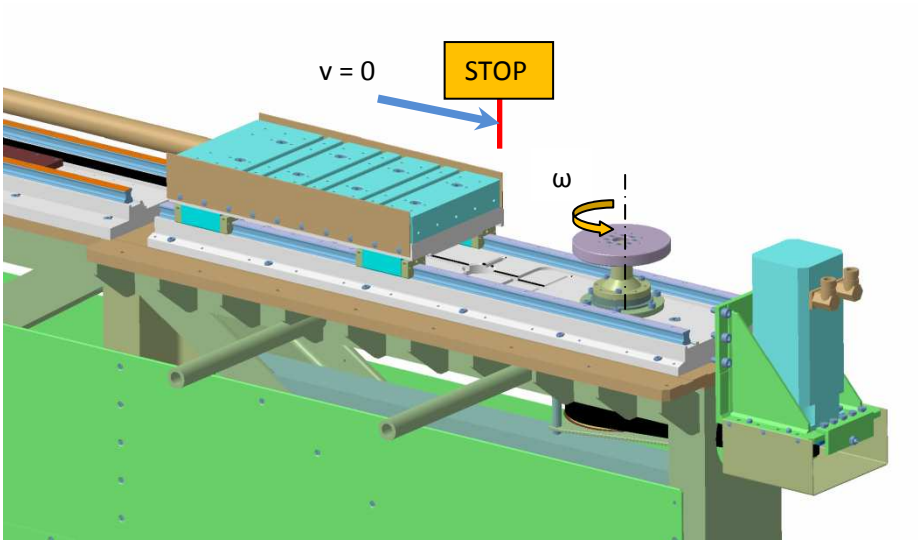
Slika 3.6.1 *Postavljanje linearnog aksijalnog modula na postolje*

Kako linearni modul čine dva dijela spojena motkom, tako će se svaki dio postaviti posebno bez motke jer se inače neće moći postaviti klima komora ako motka ostane spojena. Linearni se modul na radnu ploču postolja spaja imbus vijcima **M10** preko monoblokova. Zatim slijedi postavljanje modula rotacijskog diska kako prikazuje slika 3.6.2:



Slika 3.6.2 *Postavljanje modula rotacijskog diska na postolje*

Postavljanje ovog modula je malo otežano jer ga se ne može staviti u komadu na postolje. Da bi ga se moglo postaviti na tribometar, potrebno je skinuti remen i gonjenu remenicu sa modula, te nosač rotacijskog senzora zajedno sa vijcima, kako bi se sklop rotacijskog diska skupa sa diskom odozgo proveo kroz provrt na radnoj ploči postolja i linearnog modula kako prikazuje slika 3.6.2. Na monobloku kolica linearnog modula sa gornje se strane zavinu vijci modula rotacijskog diska i na taj se način spoji taj modul sa postoljem. Nakon toga se sa donje strane postolja umontiraju gonjena remenica i senzorski nosač postavljen na nosač sa odstojnicima, te se odozgo preko monobloka kolica linearnog modula, sa tri vijka odstojnici pričvršćuju na monoblok kolica. Ostatak ovoga modula, a to je motorni dio sa nosačem, stavi se na tribometar nakon postavljanja klima komore, gdje se pričvrsti sa 6 imbus **M8** vijaka direktno bočno na klima komoru. Na kraju se postavi i zategne zupčasti remen i postupak je gotov.



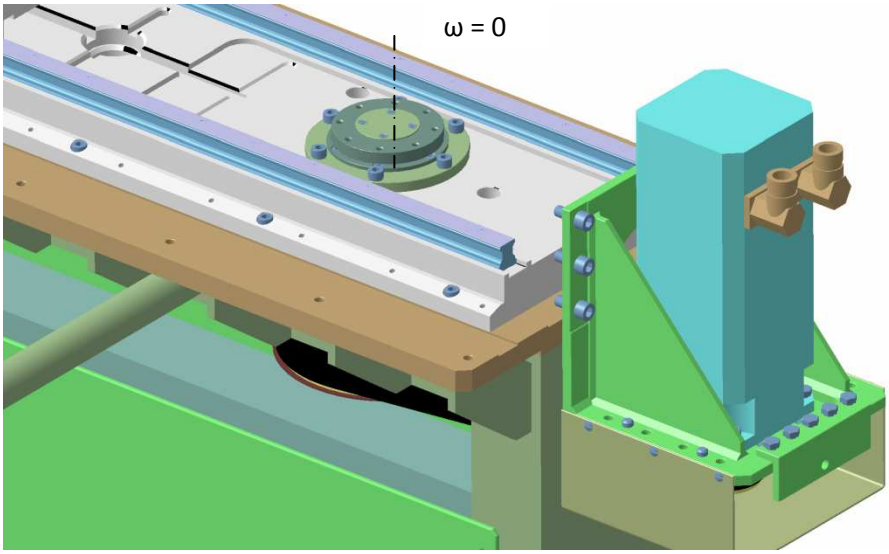
Slika 3.6.3 *Modul rotacijskog diska postavljen na postolju – aktivno stanje*

Već je rečeno kako modul rotacijskog diska može biti u aktivnom stanju (sl. 3.6.3) i u pasivnom stanju (sl. 3.6.4).

Pasivno stanje je ono stanje rotacijskog diska kada on ne odvija nikakav rad već se ispitivanje vrši na linearnom modulu, pa radi smetnje diska na monobloku kolica, skine se sam disk i pomoćno vratilo na kojemu je postavljen.

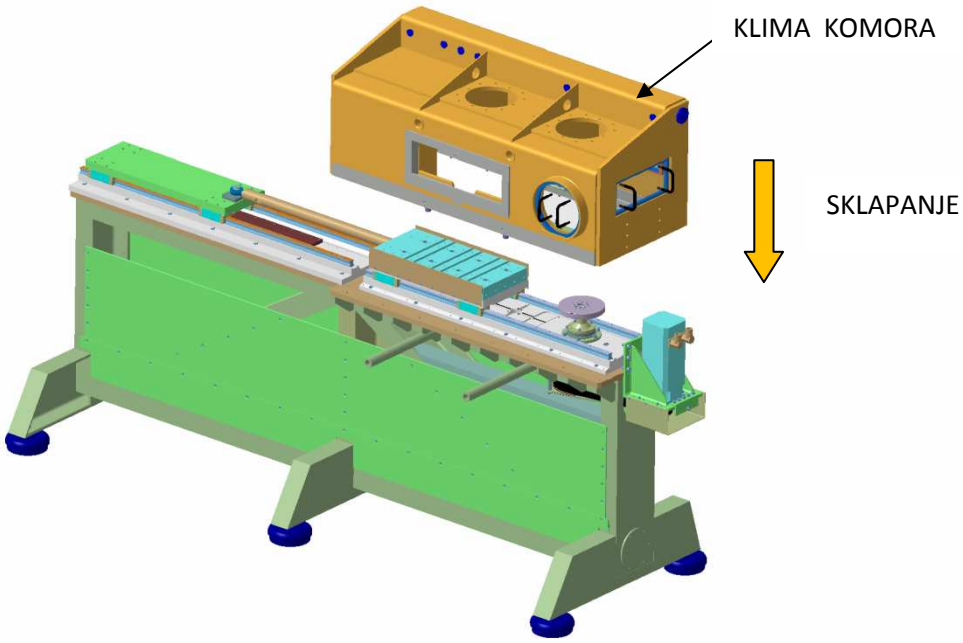
Aktivno stanje posjeduje sve elemente tog modula i u funkciji je kada se rad odvija na rotacijskom disku. Tada linearni modul stoji.

Zajednički rad je nepredviđen jer ne postoje dva modula senzorske glave, a i da postoje, radi samog diska koji je na putu ispred linearnih kolica, linearni bi modul u tom slučaju mogao napraviti najveći korak od **150 mm** kako se ne bi zabio u disk. Moguće je, dok se rad odvija na rotacijskom disku, da se na mjesto **1** iznad linearnog modula postavi neki drugi mjerni uređaj sa nekim kraćim uzorkom te se ispituje. To bi bio paralelan rad na ovome stroju koji je moguć, ali kako rekoh ne sa maksimalnim korakom linearnog modula koji iznosi **400 mm**.



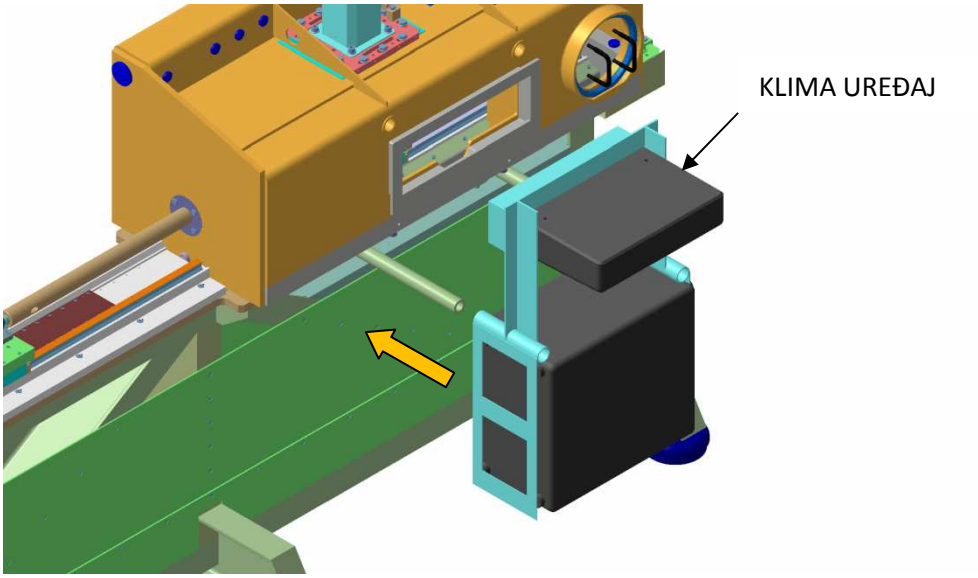
Slika 3.6.4 *Modul rotacijskog diska postavljen na postolju – pasivno stanje*

Sada nakon dijela modula rotacijskog diska, postavi se klima komora sa gornje strane na postolje stroja kako prikazuje slika 3.6.5:



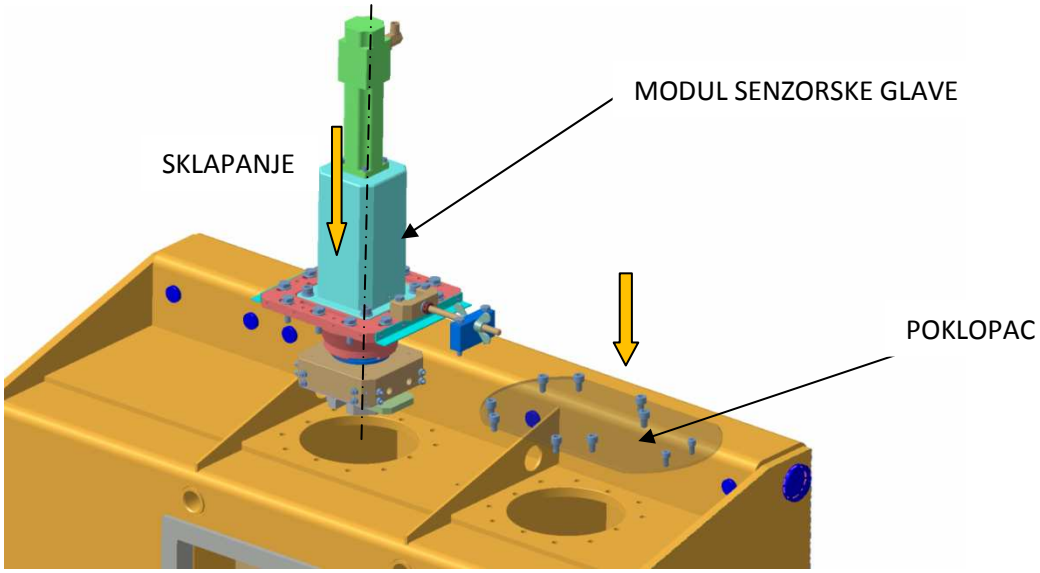
Slika 3.6.5 *Postavljanje klima komore na postolje tribometra*

Klima komora se odozgora postavi na postolje, te se iznutra pomoću **6 komada imbus M10 vijaka** sa svake strane pričvrsti na radnu ploču postolja. Ono što je veoma bitno je to da sve brtve na rubnim dijelovima modula sjednu kako treba. Kada se komora postavi, dva rastavljena dijela linearnog modula (kolica i motorni sklop) povežu se kroz rupu komore motkom te dodatno namjeste. Motorni sklop rotacijskog modula zatim se, kako je već rečeno, postavi i pričvrsti na bok komore. Sada se nakon toga na komoru postavlja klima uređaj na način prikazan slikom 3.6.6:



Slika 3.6.6 *Postavljanje klima uređaja na tribometar*

Kako slika opisuje, uređaj se postavi na nosače postolja i sjedne ravno u rupu na klima komori. Gornja kutija je izvršni element, a donja pogonski element klima uređaja. Međusobno su ti elementi spojeni sa crijevima za rashladni medij i ožičenjem koje nije slikovno prikazano.

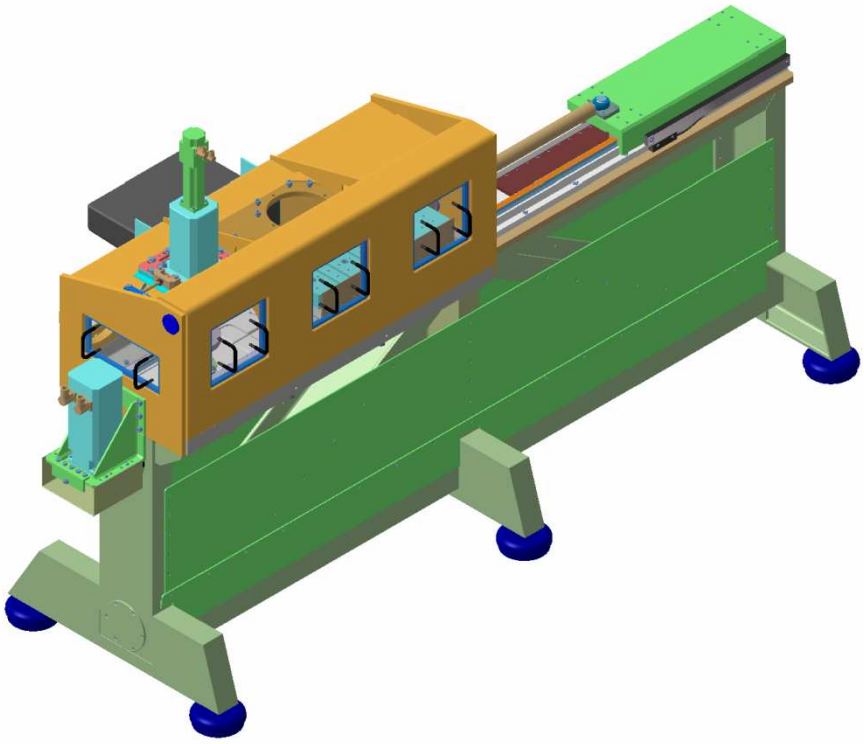


Slika 3.6.7 *Postavljanje modula senzorske glave na klima komoru*

Na kraju se na tribometar postavlja modul senzorske glave koji, ovisno o metodi ispitivanja, se postavi na mjesto **1** (iznad linearnog modula) ili na mjesto **2** (iznad rotacijskog modula).

Modul se mora oprezno postavljati jer je jako osjetljiv uređaj. On se sa **12 komada M10 vijaka** steže na krov klima komore nakon što mu se podesi korak pomoću aksijanog fiksatora. Kako druga rupa na koju ne ide modul senzorske glave ne bi ostala otvorena, prekrije se poklopcem koji se vijcima pričvrsti.

Na kraju ovoga poglavlja gdje je manje – više opisana građa stroja, važni dijelovi, te funkcija pojedinog modula, pokazat će se gotov model tribometra. Ovaj tribometar je s obzirom na ostale tribometre kud i kamo masivnije građe, ali zato dobro svojom masom upija vibracije i postiže puno veću točnost.



Slika 3.6.8 *Prikaz modela gotovog tribometra*

4. POGONI TRIBOMETRA

Na početku ovog rada već je rečeno kako ovaj stroj raspolaže sa tri osi gibanja. Jedna je linearna aksijalna os kojom se giba linearni aksijalni modul, druga je rotacijska os po kojoj se vrti rotacijski modul, a treća os je linearna okomita os po kojoj se giba modul senzorske glave. Kako bi se ostvarivalo to gibanje moraju postojati pogonski strojevi koji će osiguravati to gibanje. Tri osi gibanja jednako je tri pokretačka stroja. Sva tri pogonska stroja su sinkroni servo motori koji su povezani u regulacijski krug kako bi davali onakvo gibanje kakvo im opisuje program računala koji ih nadzire. Dva motora bit će rotacijska AC servo motora, dok će jedan biti linearni servo motor koji će direktno bez pretvorbe gibanja pogoniti linearni aksijalni modul. Rotacijski motori pogone rotacijski disk i modul senzorske glave.

4.1 LINEARNI MOTOR ZA OSTVARIVANJE HORIZONTALNOG PRAVOCRTNOG GIBANJA

Princip linearnog motora isti je kao i princip izmjeničnog trofaznog sinkronog rotacijskog motora. Ovdje isto postoji stator i rotor, samo preslikani na ravninu. Kod sinkronih rotacijskih motora primarni su namoti postavljeni na stator dok rotor ima sekundarni namot kojim teće istosmjerna struja za dobivanje elektromagneta koji takav slijedi izmjenično rotacijsko polje i na taj se način vrti. Kod manjih snaga takvog motora rotor može biti izrađen od permanentnog magneta pa mu stoga ne trebaju namoti, niti četkice preko kojih se struja prenosi na rotor sa kučišta, a ono što je najvažnije takav stroj ne mora imati ispravljač kojim se iz mrežne izmjenične struje dobiva istosmjerna struja napajanja.

Kod linearnog motora na tzv. rotoru (pokretni dio) smješten je primarni namot. Taj dio linearnog motora naziva se **primar** ili primarna jedinica. Ta se jedinica postavlja na nosač koji mora biti konstruiran tako da se ta jedinica lako može učvrstiti vijcima na njega. Osim toga taj nosač sa primarom mora biti smješten na neke vodilice kako bi se moglo omogućiti gibanje uzduž njih. Statorski dio linearnog motora naziva se **sekundar** ili sekundarna jedinica, a ona je zapravo skup permanentnih magnetskih pločica smještenih na neku bazu. Jedna pločica je jedinična magnetska pločica sa svojim polovima, a ovisno o dužini puta gibanja, te pločice su posložene po dužini jedna pored druge i njima se prekriva čitava staza gibanja tako da se dobiva magnetska pruga.

Kako je primar na svome nosaču koji na sebi ima vagonete vodilica, a sekundar na nekoj bazi na kojoj su pričvrćene vodilice, kada se vagoneti stave na vodilice, primar bi morao doći točno iznad sekundara sa minimalnim zračnim razmakom kao kod rotacijskih motora, a to je manje od pola milimetra.

Vodilice moraju biti kotrljajuće kako bi ispunile zahtjev točnosti, brzine i smanjene disipacije energije. Linearni aksijalni modul tribometra ima isti takav linearni motor. Kako se primar ne bi pregrijavao na neke jače motore koji rade s većim iznosima nazivne struje je priključeno hlađenje koje može biti prisilno pomoću gibajuće zračne struje ili vodeno hlađenje koje je puno efikasnije budući da voda ima velik toplinski kapacitet. Slabiji ovakvi motori imaju prirodno hlađenje pomoću zraka.

Kako bi znali kakav je motor potreban za tribometar mora mu se izračunati snaga koju treba imati, te na bazi toga bira se prvi motor sa većom nazivnom snagom. Za proračun se uzimaju sljedeći parametri:

Maksimalna sila motora..... $\mathbf{F_{max} = 2500\ N}$
Sila otpora (trenje)..... $\mathbf{F_f = 500\ N}$
Masa gibajućeg sklopa (procjena)..... **m = 40 kg**
Maksimalna brzina..... $\mathbf{v_{max} = 2\ m/s}$

Prema zadanim podacima lako se izračunava maksimalna snaga motora pri maksimalnoj sili:

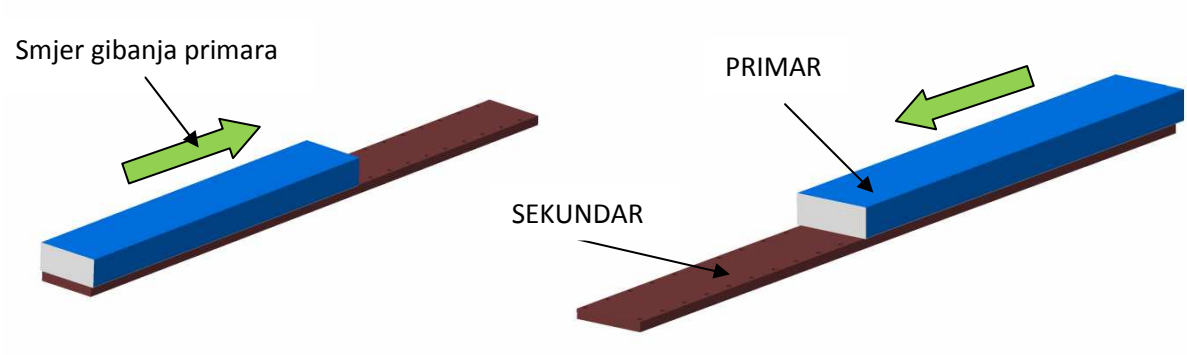
$$P_{lm,max} = F_{max}\, v_{max} = 2500 \cdot 2 = 5000\ W = \mathbf{5\ kW}$$

Gledajući ove podatke koji su zadani, mora se odabrati motor čija se maksimalna sila vrti oko zadanog broja maksimalne sile F_{max}, a isto tako čija je maksimalna brzina kod maksimalne sile približno jednaka v_{max} .

Izabire se sinkroni linearni motor marke **SIEMENS** sa vodenim hlađenjem tipa **1FN3 100 - 5WC00 – 0AA1.** Podaci ovoga motora su slijedeći:

Nazivna sila..... $\mathbf{F_N = 1125\ N}$
Maksimalna sila..... $\mathbf{F_{max} = 2750\ N}$
Max. brzina pri max. sili..... $\mathbf{v_{maxFmax} = 109\ m/min = 1{,}817\ m/s}$
Max. brzina pri nazivnoj sili..... $\mathbf{v_{maxFN} = 255\ m/min = 4{,}25 m/s}$
Nazivna struja..... $\mathbf{I_N = 11\ A}$
Max. struja..... $\mathbf{I_{max} = 29{,}5\ A}$
Napon napajanja primara..... $\mathbf{U_{ZK} = 600\ V}$

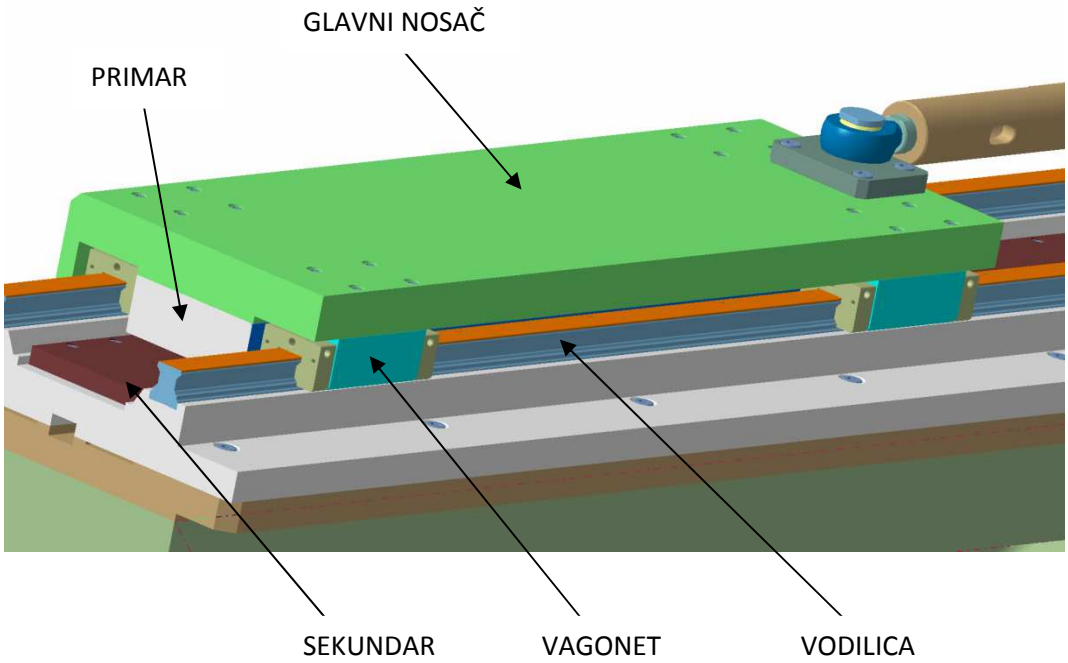
Ostali tehnički podaci o motoru mogu se naći u prilogu **A1** na kraju ove knjige. Najbolje se je držati nazivnih podataka kako bi što bolje iskorištavali stroj. Slika 4.1.1 prikazuje primar i sekundar ovoga motora.



Slika 4.1.1 *Prikaz primara i sekundara u gibanju*

Opisano je u prošlom poglavlju kako se giba linearni modul kojega pogoni ovaj linearni motor, tako da o tome ne treba reći više ništa.

Slika 4.1.1 prikazuje odnos između primara i sekundara pri gibanju u jednom smjeru pa zatim u drugom. Kako se reklo, sekundar je magnetska tračnica koju primar počinje slijediti kada ga ukopčamo na struju. Režim gibanja zadaje se na računalu, zato se ovaj motor i naziva servo motor. Upravljanje ovim motorom na tribometru jedna je druga tema koja u ovome radu neće biti opisana. Cijeli linearni motor postavljen na vodilice sa svim potrebnim elementima prikazuje slika 4.1.2. Sustav kugličnih vodilica već je opisan, a dodatne karakteristike biti će navedene u prilogu.



Slika 4.1.2 *Linearni motor*

Kako postoji vodeno hlađenje primara, tako se mora osigurati dovoljna količina rashladne vode kako se motor ne bi pregrijao. Početna temperatura na ulazu ne bi smjela biti iznad **35 °C** kako bi se osiguralo što efektivnije hlađenje uz manju količinu rashladne vode. Gornja temperatura motora ne bi smjela prelaziti **120 °C** da se ne bi oštetila izolacija na namotima. Pri višim temperaturama dolazi do povećanja otpora na bakru namota pa iznos maksimalne sile pada. Protok rashladne vode koji je nužan za dobar rad motora je **2,5 l/min** što vodu zagrijava na izlazu za nekih **7,6 °C**. Ono na što se mora paziti je to da se osigura meka voda u sustav kako ne bi došlo do pojave kamenca unutar samog sustava za hlađenje motora. Hlađenje je smješteno oko samog primara tako da dobro i efikasno hladi namote motora. Ono što je još dobro znati za ovaj motor je njegovo maksimalno ubrzanje i put koji prijeđe da postigne maksimalnu brzinu uz maksimalno ubrzanje. Prema danim parametrima za ovaj motor maksimalno ubrzanje tereta iznosi:

$$a_{max,acc} = \frac{F_{max} - F_f}{m} = \frac{2750 - 500}{40} = \mathbf{56{,}25\, m/s^2 = 5{,}73g}$$

Iz toga slijedi potreban put uz ovo ubrzanje do maksimalne brzine:

$$s_{acc} = \frac{v_{max}^2}{2a_{max,acc}} = \frac{1{,}817^2}{2 \cdot 56{,}25} = \mathbf{29{,}4mm}$$

Prilikom zaustavljanja mase sa maksimalne brzine od **1,817 m/s** pri maksimalnoj sili, usporenje može biti znatno kraće budući da sada sile otpora djeluju u smjeru sile kočenja. Prema tome maksimalna retardacija iznosi:

$$a_{max,ret} = \frac{F_{max} + F_f}{m} = \frac{2750 + 500}{40} = \mathbf{81{,}25m/s^2 = 8{,}2g}$$

Iz toga slijedi potreban put za zaustavljanje:

$$s_{stop} = \frac{v_{max}^2}{2a_{max,ret}} = \frac{1{,}817^2}{2 \cdot 81{,}25} = \mathbf{20{,}3mm}$$

Radi toga ukupan put potreban za ubrzanje mase do brzine od **1,817 m/s**, te naknadno usporenje iste mase do zaustavljanja jednako je približno **50 mm**.

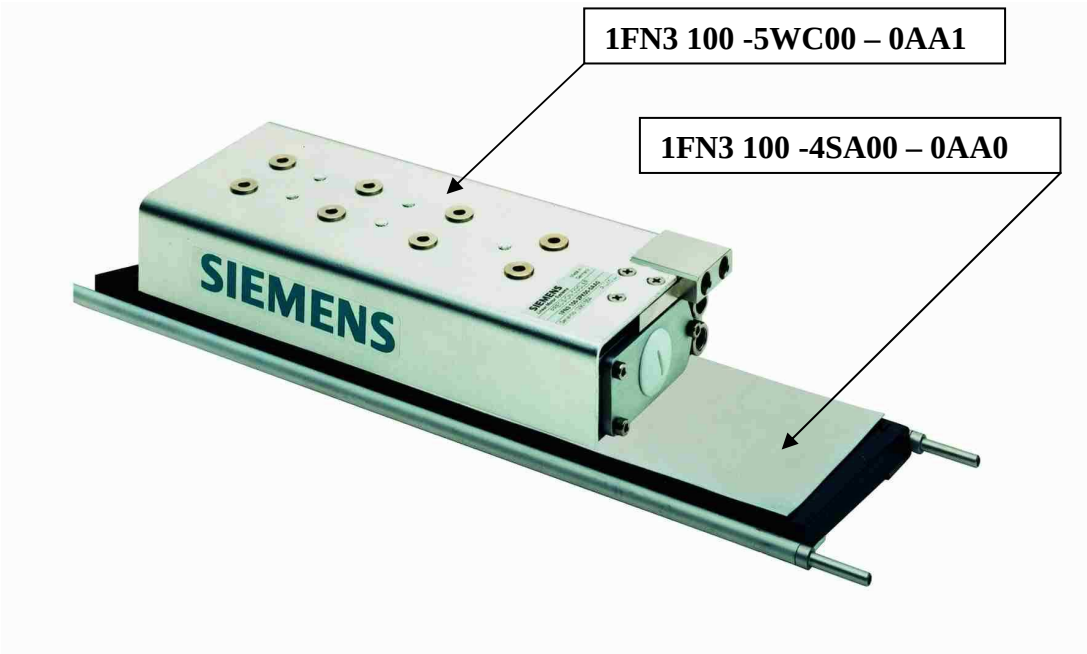
Ako bi se u obzir uzela maksimalna akceleracija/retardacija prema HS-TEC-u od kojih se nabavlja ovaj cijeli modul, od **2,5g**, potreban put za ubrzanje/zaustavljanje bi iznosio:

$$s_{acc/stop,2,5g} = \frac{v_{max}^2}{2a_{HS-TEC}} = \frac{1{,}817^2}{2 \cdot 2{,}5 \cdot 9{,}81} = \mathbf{67{,}3mm}$$

Prema ovome ukupna dužina ubrzanja i usporenja bila bi otprilike jednaka **135 mm**. Prema ovome proračunu uz **aktivni dio staze koji iznosi 400 mm,** na ubrzanje i usporenje, ako je ono maksimalno, otpada **50 mm** puta, a ako se ravnamo po maksimalnom ubrzanju i usporenju koje predlaže HS-TEC, taj dio puta iznosi **135 mm**. Iz toga se vidi da maksimalna moguća dužina puta konstantne maksimalne brzine od **1,817 m/s** bila bi **350 mm**, s time da bi ovdje motor bio jako opterećen.

Prema HS-TEC-u ova stacionarna maksimalna dužina puta bila bi **265 mm** gdje bi motor postizao maksimalnu brzinu uz nešto manju silu kako bi ubrzavao i usporavao **sa 2,5g**. Možemo se ravnati da se pri maksimalnoj brzini može postići put konstantne brzine između tih vrijednosti, no ne i iznad gornje vrijednosti **350 mm**.

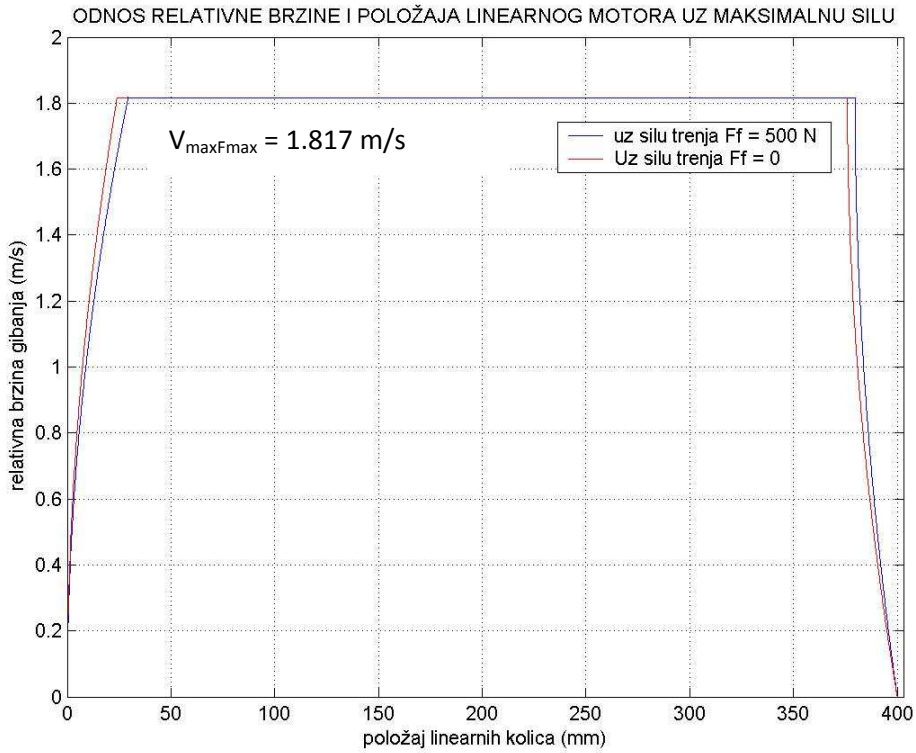
Na kraju ovoga opisa linearnog motora slikovno bih prikazao realni izgled ovoga tipa motora koji se koristi na tribometru. Na slici 4.1.3 prikazane su dvije vrste ovakvih motora. Ovdje se koristi gornji od prikazanih primara motora tip **1FN3 100 -5WC00 – 0AA1.** Tip sekundara koji se koristi, a koji dolazi kao par ovdje prikazanom primaru je tip **1FN3 100 -4SA00 – 0AA0.**



Slika 4.1.3 *Stvarni prikaz linearnog motora – primar*

Važno je ovdje još spomenuti frekvencijski pretvarač brzine koji se koristi. On se uzima za snagu od **5 kW**, a to je max snaga linearnog motora. Preko tog pretvarača dobivaju se razne brzine motora uz istu struju na ulazu u pretvarač.

Kako se ponaša relativna brzina gibanja prema položaju linearnog motora uz konstantnu maksimalnu silu motora $\mathbf{F_{max}}$ **= 2750 N** može se vidjeti na slici 4.1.4. Ovdje su prisutna maksimalna usporenja i ubrzanja motora kada je motor opterećen (sila trenja maksimalna $\mathbf{F_f}$ **= 500 N**) i kada nije opterećen ($\mathbf{F_f}$ **= 0 N**).



Slika 4.1.4 *Odnos relativne brzine i položaja linearnog motora uz maksimalnu silu*

Više o ovim motorima može se naći u prilogu **A1** na kraju ovog rada ili u **literaturi [8]**.

4.2 SINKRONI AC SERVO MOTOR ZA OSTVARIVANJE ROTACIJE MJERNOG DISKA

Kako je bilo opisano u poglavlju 3.2 na ovome tribometru da bi se ostvarivale metode ispitivanja prsten na disku i klin na disku, mora postojati rotacija diska koji na sebi ima pričvršćen jedan od uzoraka u obliku diska na podlozi. Rotacijski disk pričvršćen je na vertikalno postavljeno vratilo, a pogoni ga sinkroni AC servo motor. Poželjno je imati motor maksimalne snage kao što je linearni motor, a to je **5 kW** iz razloga frekvencijskog pretvarača koji je snage **5 kW**, a motori koji su jači puno su skuplji, a ujedno je skuplji i pretvarač. Frekvencijski pretvarač služi za promjenu brzine motora. Iz tog razloga, kako se ne bi mijenjala brzina motora sa **6000 min^{-1}** na brzinu pri kojoj bi se ostvarivala maksimalna sila trenja na disku **F_{fmax} = 500 N** koja bi se kretala u iznosima koji su i preko 3 puta niži od nazivnih vrijednosti, omogućuje se da ovaj modul ima redukciju preko zupčastog remena i remenica. Jedna vrsta prijenosa će omogućiti prijenosni omjer **i = 1** koji će prenositi sa motora na disk učestalost vrtnje od 6000 o/min, dok će druga vrsta prijenosa omogućiti redukciju brzine sa prijenosnim omjerom **i = 3**, tako da će na disku učestalost vrtnje biti od **2000 o/min** uz istu nazivnu učestalost vrtnje na motoru koji je **6000 o/min**. Na taj se način na motoru postiže maksimalna sila bez velikih gubitaka i bez korištenja motora veće nazivne snage. Veličine koje se traže za ovaj motor su slijedeće:

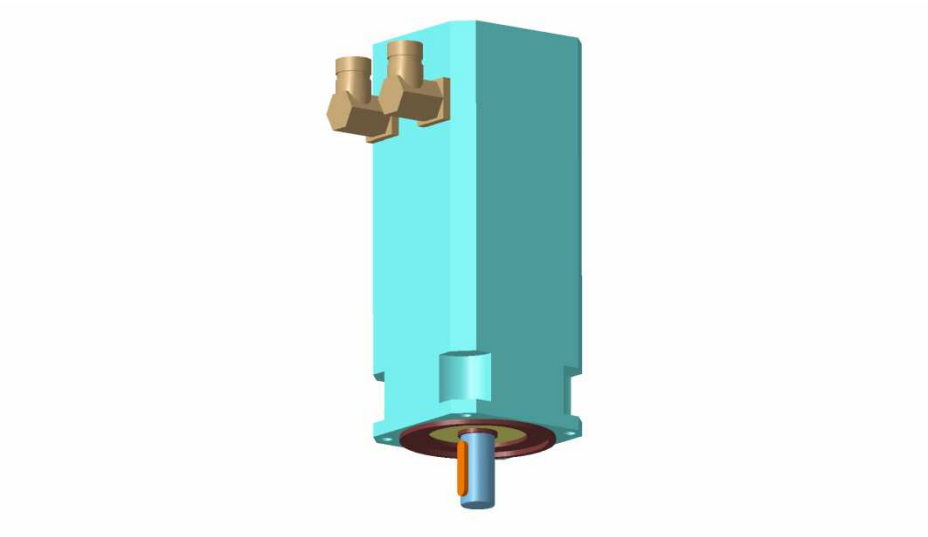
Maksimalna sila trenja.....	**$F_{f,max}$ = 500 N**
Raspon brzina.....	**v = 0...10 m/s**
Učestalost vrtnje motora.....	**n = 0...2000 o/min**
Maksimalna snaga.....	**$P_{max}=F_{f,max}v_{max}=500 \cdot 10 = 5\ kW$**
Promjer diska.....	**d = 160 mm**
Debljina diska.....	**b = 8 mm**
Radni radijus diska.....	**r_{activ} = 20...70 mm**

Motor koji je izabran je tipa **SIEMENS 1FT6 062 6WK7** koji ima slijedeće performanse:

Učestalost vrtnje motora.....	**n = 6000 o/min**
Nazivna snaga motora	**P_N = 6,2 kN**
Pokretni moment.....	**M_0 = 10,2 Nm**
Nazivni moment.....	**M_N = 9,8 Nm**
Nazivna jakost struje.....	**I_N = 12,7 A**
Broj parova polova.....	**P = 3**
Moment inercije.....	**J = 8,5 · 10^{-4} kgm^2**
Masa motora.....	**m_m = 9,5 kg**
Jakost struje kratkog spoja pri M_0.....	**I_0 = 12,9 A**
Protok rashladne vode.....	**$Q_{RV,min}$ = 5 l/min**

Ovako velika učestalost vrtnje odabire se radi toga da se disk pokoji put može vrtjeti ovom brzinom uz manje opterećenje. Time se proširuje rad ovog modula na mogućnost da se disk vrti kao i motor sa učestalošću vrtnje od **6000 o/min**, ili da se redukcijom ta učestalost smanji na **2000 o/min**, čime se omogućuje rad sa maksimalnim momentom. Ovaj motor ima također vodeno hlađenje kako bi omogućio maksimalnu iskoristivost motora. Pripremljena voda bez puno klora sa najmanjim protokom od **5 l/min** protiće kroz motor i time mu hladi primarni namotaj kako otpor bakra ne bi porastao sa temperaturom i time pala iskoristivost. Voda se ne smije zagrijati iznad **7 °C** na izlazu iz motora, a najviša temperatura ulaska vode je **35 °C**, kako se motor ne bi pregrijao iznad dopuštenih **120 °C**.

Ovaj motor ima ugrađeni inkrementalni enkoder, tako da ima veliku prednost jer se ne mora misliti na ugradnju drugog enkodera koji će mjeriti položaj i brzinu vrtnje ovoga motora. Ugrađeni enkoder ima **1 V_{pp}** i **2048 pulseva/okretaj** što bi značilo da kutni razmak po koraku mu iznosi **10,5'** što je veoma malo. Sam model motora prikazuje slika 4.2.1:



Slika 4.2.1 *Sinkroni AC servo motor tipa* ***SIEMENS 1FT6 062 6WK7 – model***

Svi detaljni podaci u svezi ovog motora prikazani su u prilogu **A2** na kraju ovog rada. Reduktor se izrađuje prema maksimalnoj snazi koju on prenosi, a to je **5 kW**. Kako je navedeno, motor može podnijeti nazivnu snagu od **6,2 kW** koja je blizu maksimalne, no ovaj se motor neće u potpunosti iskorištavati jer je odlučeno radi ekonomskih razloga korištenje 5 kW – mogućnost frekvencijskog pretvarača, tako da se neće ići na prelaženje snage od 5 kW kako se ne bi uništio pretvarač.

Ovaj se motor sa vijcima čeono pričvršćuje za nosač motora od čelične konstrukcije tako da je motor stabilan na svom postolju i ne uzrokuje prevelike vibracije koje bi narušile krutost stroja.

Pogledajmo sada proračun koji nam pokazuje limite ispitivanja na ovome modulu. Ako se uzme maksimalna učestalost vrtnje diska od 2000 o/min što bi značilo korištenje prijenosnog omjera i = 3, tada bi brzine klizanja na krajnjim radijusima iznosile:

$$v_{sliding1}(r_1 = 20\ mm) = \frac{\pi \cdot n_{2000}}{30} \cdot r_1 = \frac{\pi \cdot 2000}{30} \cdot 0{,}02 = \mathbf{4{,}189 m/s}$$

$$v_{sliding2}(r_2 = 70\ mm) = \frac{\pi \cdot n_{2000}}{30} \cdot r_2 = \frac{\pi \cdot 2000}{30} \cdot 0{,}07 = \mathbf{14{,}661\ m/s}$$

Ako se u obzir uzme maksimalna sila trenja, tada potrebni moment na ploči za krajnje radijuse iznosi:

$$M_{disc1}\ (r_1 = 20mm) = F_{f,max} \cdot r_1 = 500 \cdot 0{,}02 = \mathbf{10\ Nm}$$
$$M_{disc2}\ (r_2 = 70mm) = F_{f,max} \cdot r_2 = 500 \cdot 0{,}07 = \mathbf{35\ Nm}$$

Kako je ovo prijenosni omjer **i = 3** , tako je na motoru približno slijedeće stanje:

$$M_{mot1}\ (r_1 = 20mm) = \frac{M_{disc1}}{3} = \mathbf{3{,}33\ Nm}$$
$$M_{mot2}\ (r_2 = 70mm) = \frac{M_{disc2}}{3} = \mathbf{11{,}67\ Nm}$$

Nazivni moment motora je preslab da bi mogao svladati ovaj okretni moment na gornjem radijusu r_2 stoga se neće vršiti ispitivanje na krajnjem radijusu sa maksimalnom silom trenja od **500 N**, nego će se ona ovdje smanjiti, kako se ne bi ugrožavao motor. Kako je nazivni moment jednak **9,8 Nm**, tako će se prema njemu odrediti koji je najveći radijus gdje se taj moment održava uz maksimalnu silu trenja:

$$r_{Fmax} = \frac{3 \cdot M_N}{F_{max}} = \frac{9{,}8 \cdot 3}{500} = \mathbf{59mm}$$

Brzina klizanja na ovome će radijusu biti:

$$v_{sliding3}(r_{Fmax} = 59\ mm) = \frac{2000 \cdot \pi}{30} \cdot r_{Fmax} = \mathbf{12{,}36\ m/s}$$

Ova brzina je malo previsoka jer bi voljeli koristiti brzinu klizanja do **10 m/s**. Radijus kod kojega se ta brzina postiže je:

$$r_{v_{max}} = \frac{10 \cdot 30}{2000 \cdot \pi} = \mathbf{48\ mm}$$

Moment opterećenja motora će na ovom radijusu biti:

$$M_{mot3}(r = 48\ mm) = \frac{F_{f,max} \cdot r}{i} = \frac{500 \cdot 0{,}048}{3} = \mathbf{8\ Nm}$$

Ovo je pokazatelj da se, ako se želi ostvariti maksimalna klizna brzina od **10 m/s**, mora koristiti maksimalni radni radijus **48 mm** na kojemu se smije koristiti maksimalna sila trenja od **500 N**, gdje se dobije moment trenja od **8 Nm**, što je ispod nazivnog, znači motor ovdje može raditi bez poteškoća.

Maksimalna sila trenja moći će se koristiti do radijusa $\boldsymbol{r_{Fmax} = 59\ mm}$ iza kojeg će se hiperbolično morati smanjivati. Smanjenje sile trenja na maksimalnom radijusu biti će:

$$F'_{f,r2} = \frac{3 \cdot M_N}{r_2} = \frac{9{,}8 \cdot 3}{0{,}07} = \mathbf{420N}$$

Dakle, **od radijusa 59 mm do 70 mm** sila trenja se linearno smanjuje do iznosa **420 Nm**.

Maksimalna snaga motora morala bi se ispitati za krajnji slučaj na najveći radijus, te za radijus $\boldsymbol{r_{Fmax} = 59\ mm}$ na kojemu se kod maksimalne sile trenja upotrebljava najveća klizna brzina od **12,36 m/s**.

$$P\ (r_2 = 70\ mm) = v_{sliding2} \cdot F'_{f,r_2} = 14{,}661 \cdot 420 = \mathbf{6{,}158\ kW}$$
$$P\ (r = 59\ mm) = v_{sliding3} \cdot F_{f,max} = 12{,}36 \cdot 500 = \mathbf{6{,}180\ kW}$$

Radna snaga za radijus **48 mm** gdje je brzina klizanja **10 m/s** je sljedeća:

$$P\ (r = 48\ mm) = 10 \cdot F_{f,max} = 10 \cdot 500 = \mathbf{5{,}000\ kW}$$

Problem koji se ovdje događa je to da se ne može, unatoć tome što motor može upotrebljavati snage veće od 5 kW, koristiti veću snagu radi frekvencijskog pretvarača pa već kod ovog radijusa prema snazi od 5 kW smanjivat će se hiperbolično sila trenja prema maksimalnom radijusu. Tako će na radijusu $\mathbf{r_2}$ **= 70 mm** maksimalna sila biti:

$$F_{f,r_2} = \frac{P}{v_{sliding2}} = \frac{5000}{14{,}661} = \mathbf{341\ N}$$

U slučaju kada bi se mijenjao pretvarač na veću snagu, tada bi se na maksimalnom radijusu smjela upotrijebiti maksimalna sila trenja od **420 N**, no budući da ovaj pretvarač to ne omogućuje, sila trenja na najvećem radijusu neće smjeti biti veća od **341 N**.

U slučaju prijenosnog omjera **i = 1**, maksimalna sila trenja koja bi se ovdje smjela upotrijebiti na najmanjem radijusu je slijedeća:

$$F_{f,\max\,(i=1)} = \frac{P}{v_{sliding\ 1(i=1)}} = \frac{P}{\omega_{mot} \cdot r_1} = \frac{5000 \cdot 30}{6000 \cdot \pi \cdot 0{,}02} = \mathbf{398\ N}$$

Ova sila će se morati hiperbolično smanjivati sa povećanjem radijusa na iznos kod najvećeg radijusa:

$$F_{f,\min\,(i=1)} = \frac{P}{v_{sliding\ 2(i=1)}} = \frac{P}{\omega_{mot} \cdot r_2} = \frac{5000 \cdot 30}{6000 \cdot \pi \cdot 0{,}07} = \mathbf{114\ N}$$

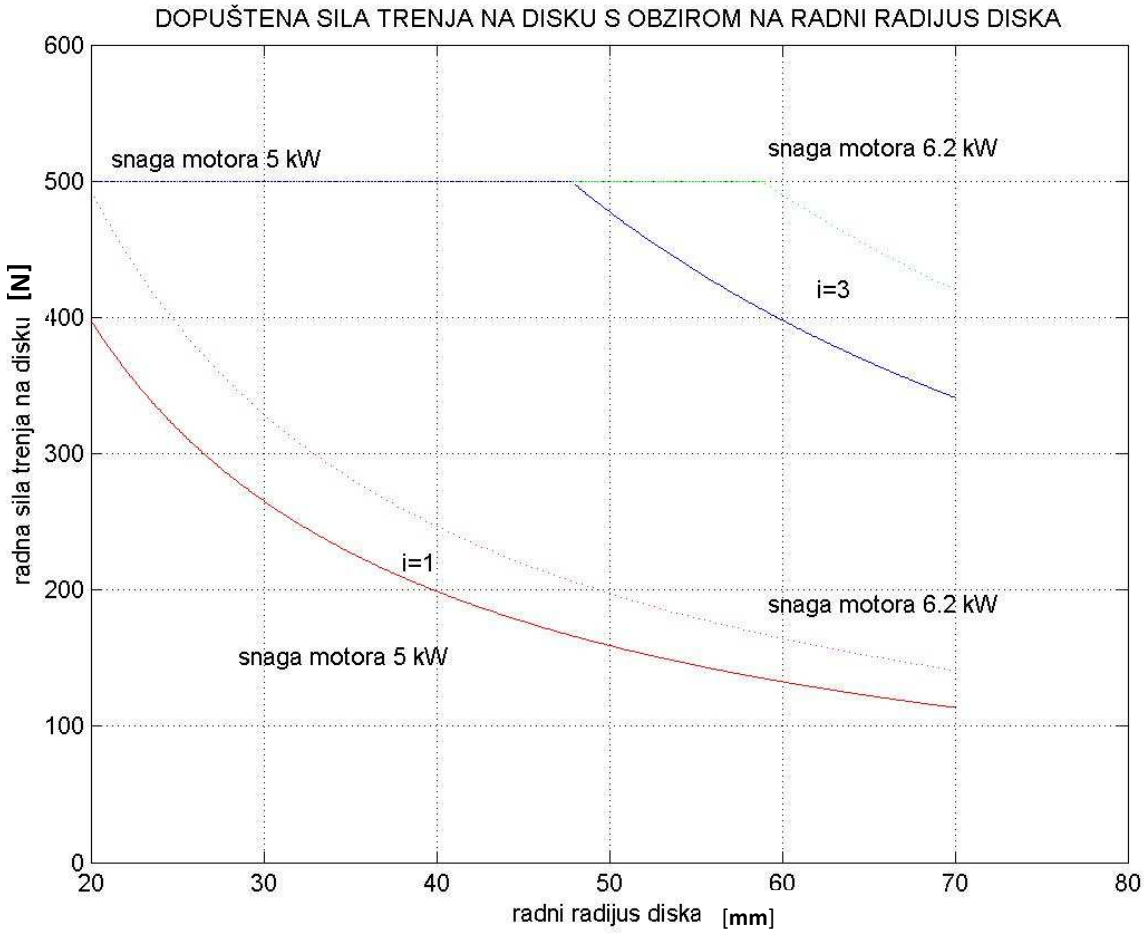
U slučaju promjene frekvencijskog pretvarača na veću snagu, ovaj bi motor mogao prenijeti svoju ukupnu snagu od **6,2 kW**, pa bi pri prijenosnom omjeru **i = 1** mogao prenašati slijedeću silu:

$$F'_{f,\max\,(i=1)} = \frac{P_N}{v_{sliding\ 1(i=1)}} = \frac{P_N}{\omega_{mot} \cdot r_1} = \frac{6200 \cdot 30}{6000 \cdot \pi \cdot 0{,}02} = \mathbf{493\ N}$$

Ova sila će se morati hiperbolično smanjivati sa povećanjem radijusa na iznos kod najvećeg radijusa:

$$F'_{f,\min\,(i=1)} = \frac{P_N}{v_{sliding\ 2(i=1)}} = \frac{P_N}{\omega_{mot} \cdot r_2} = \frac{6200 \cdot 30}{6000 \cdot \pi \cdot 0{,}07} = \mathbf{141\ N}$$

Na temelju ovog proračun, dijagramski prikaz ovisnosti maksimalne sile trenja na radnom disku s obzirom na radijus prikazuje slijedeća slika:



Slika 4.2.2 *Dijagramski prikaz ovisnosti maksimalne sile trenja na disku o radnom radijusu za oba prijenosna omjera*

Na dijagramu se vide pune hiperbole i uz njih malo manje vidljive isprekidane hiperbole.

Pune krivulje su krivulje maksimalnih sila pri snazi **5 kW** koju određuje odabrani frekvencijski pretvarač. Ako bi ga se ikada zamijenilo jaćim koji bi mogao podnijeti snagu motora, onda bi maksimalna sila trenja mogla dostizati vrijednosti prikazane isprekidanom krivuljom. Iz dijagrama za izračunate vrijednosti vidljivo je kako kod diobenog omjera **i = 1** se ne može postići željena vrijednost sile trenja od **500 N**. Više o ovim motorima može se naći u prilogu **A2** na kraju ovoga rada ili u **literaturi [9]**.

Realnu sliku ovoga motora prikazuje slika 4.2.3:

Slika 4.2.3 *Sinkroni AC servo motori marke* ***SIEMENS - tip 1FT6 062 6WK7 (srednji)***

Obratimo malo još pozornost na klinasti remen koji prenosi snagu i gibanje sa motora na gonjeno vratilo. Prikaz klinastog remena i izgled remenica za takve remene naveden je na slikama 4.2.4 i 4.2.5. Remen pripada skupu remena **HTD** (High-Torque Drive) koji je otporan na elastične deformacije koje sa sobom usred velikih sila nose veću nepreciznost. Ono što ću navesti je da je ovo remen veličine **1120 x 8M x 50 sa 140 zubi**. Specifikacije u svezi remena i remenica nalaze se u prilogu **B3** na kraju ovoga rada.

Slika 4.2.4 *Zupčasti remen tipa HTD*

Slika 4.2.5 *Remenice za zupčaste remene*

Kako su ovi remeni, iako veoma otporni na elastičnu deformaciju, relativno elastično deformabilni, tako ne mogu prenositi točan položaj diska na motorni enkoder koji to registrira. Zato će se morati koristiti još jedan rotacijski enkoder direktno povezan na vratilo diska kada će se odvijati precizno mjerenje na tribometarskom disku.

4.3 SINKRONI AC SERVO MOTOR ZA OSTVARIVANJE NORMALNE SILE PRITISKA NA UZORAK

Modul tribometra koji ostvaruje normalnu silu pritiska na uzorak radi tako da sinkroni AC servo motor, spojen preko spojke na planetarno vreteno, pretvara rotacijsko gibanje u translacijski vertikalni pomak klipa unutar cilindra koji svojim vertikalnim pomakom van cilindra stvara normalnu silu na čelo klipa koja proizlazi kao reakcija na aktivne sile na uzorak. Bira se sinkroni AC servo motor, iako se kanilo ići na istosmjerni motor. Maksimalna normalna sila koja se misli ovdje primijeniti bila bi $\mathbf{F_{N,max}}$ **= 1600 N**. Kako bi se prema ovoj sili znalo koji je okretni moment motora, mora ga se izračunati.

$$M_t = \frac{F_N \cdot P_z}{2 \cdot \pi \cdot \eta_1} \cdot 10^{-3} = \frac{F_N \cdot (P_z + k_R \cdot d_0)}{2 \cdot \pi} \cdot 10^{-3}$$

$$\eta_1 = \frac{1}{1 + \frac{k_R \cdot d_0}{P_z}}$$

Vreteno koje se odabralo za rad na tribometru ima slijedeće karakteristike:

Navojni korak..... $\mathbf{P_z = 1\ mm}$
Nazivni promjer vretena..... $\mathbf{d_0 = 8\ mm}$
Korak matice po okretaju vretena..... $\mathbf{P_m = 0{,}5\ mm}$
Faktor trenja vretena..... $\mathbf{k_R = 0{,}038}$

η_1 je stupanj korisnosti vretena pri zatezanju, tj. za povećanje normalne sile.

$$M_t = \frac{1600 \cdot (1 + 0{,}038 \cdot 8)}{2 \cdot \pi} \cdot 10^{-3} = \mathbf{0{,}332\ Nm}$$

Okretni moment je potreban moment motora za ostvarenje normalne sile pritiska na uzorku.

Birani motor je sinkroni AC servo motor tipa **SIEMENS 1FT6 024 6AK7** sa karakteristikama:

Moment inercije motora..... $\mathbf{J_m = 0,34 \cdot 10^{-4}\ kgm^2}$
Masa motora..... $\mathbf{m_{om} = 2,1\ kg}$
Jakost struje kratkog spoja pri M_0..... $\mathbf{I_0 = 1,25\ A}$
Učestalost vrtnje..... **n = 6000 o/min**
Nazivna snaga ..... $\mathbf{P_N = 310\ W}$
Pokretni moment..... $\mathbf{M_0 = 0,8\ Nm}$
Nazivni moment..... $\mathbf{M_N = 0,5\ Nm}$
Nazivna jakost struje..... $\mathbf{I_0 = 0,9\ A}$
Broj pari polova..... **P = 3**

Kako je ovdje nazivni moment nešto veći od izračunatog okretnog momenta potrebnog da se ostvari željena normalna sila pritiska na uzorak, može se prema nazivnom momentu izračunati kolika će biti stvarna normalna sila kada bude djelovao nazivni moment motora:

$$F_{N,real} = \frac{M_N \cdot 2 \cdot \pi \cdot \eta_1}{P_z \cdot 10^{-3}} = \frac{M_N \cdot 2 \cdot \pi}{(P_z + k_R \cdot d_0) \cdot 10^{-3}}$$

$$F_{N,real} = \frac{0,5 \cdot 2 \cdot \pi}{(1 + 0,038 \cdot 8) \cdot 10^{-3}} = \mathbf{2409\ N}$$

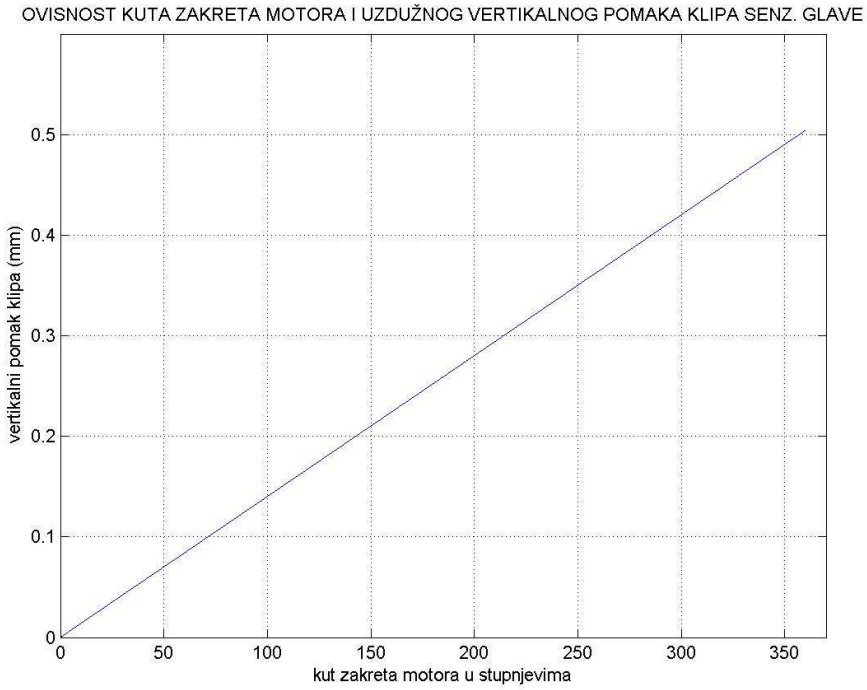
Korak matice planetarnog vretena nije jednaka koraku navoja na glavnom vretenu, već je upola manja te radi toga postoji efekt na maticu kao da imamo maksimalnu učestalost vrtnje od **3000 o/min**. Kinematika gibanja ovoga vretena i matice nije ista kao i kod klasičnog vretena i matice, već matica ide u suprotnom aksijalnom smjeru za isti uspon vretena, tako da se ovdje motor mora vrtjeti suprotno kako bi zatezao maticu, nego bi se vrtio da je u igri klasično vreteno i matica npr. trapezno navojno vreteno i matica. Motor je male snage spram motora iz iste skupine koji pokreće rotacijski disk, pa se ovaj motor hladi na prirodan način.

Motor tipa **SIEMENS 1FT6 024 6AK7** prikazuje slika 4.3.1. Ovaj motor ima ugrađeni isti enkoder kao i motor rotacijskog diska pa se ne mora ugrađivati dodatni enkoder za mjerenje brzine i položaja vretena. Ono što bi bilo interesantno je to koliki je pojedini položaj klipa s obzirom na neku nultočku, te vertikalna brzina u pojedinom trenutku, a kako enkoder mjeri brzinu i položaj samog motora, ovo se mora izračunati, te u računalo staviti kao funkciju s kojom se množi očitana vrijednost sa enkodera da bi se dobio podatak brzine i položaja klipa.

Pokretna nul-točka bila bi na vrhu samoga plovka na mjestu stezanja čeljusti, a fiksna nul-točka bila bi maksimalni gornji položaj plovka, odnosno max. udaljenost vrha plovka senzorske glave od stola kolica. Klip cilindra za **1 okretaj motora** napravi **0,5 mm** uzdužno čime je koeficijent nagiba pravca slijedeći:

$$k_{om} = \frac{0{,}5mm}{360°} = 1{,}4 \cdot 10^{-3} mm/°$$

Slika 4.3.1 *Sinkroni AC servo motori marke* ***SIEMENS - tip 1FT6 024 6AK7 (najmanji s desna)***



Slika 4.3.2 *Dijagramski prikaz ovisnosti zakreta motora i vertikalnog pomaka klipa*

Ovaj motor vijcima je čeono pričvršćen na cilindar okomitog modula tako da je na krutom postolju. Što se upravljanja tiće krug upravljanja mu mora biti povezan sa krugom upravljanja ostalih motora jer ovaj motor indirektno utjeće na silu trenja preko normalne sile, a sila trenja utjeće na rad ostalih motora. Više o ovome motoru može se saznati iz priloga **A3** na kraju ovoga rada ili iz **literature [9]**.

5. SENZORI TRIBOMETRA

Senzori su uređaji koji prate određenu veličinu i njene promjene bilježe kao informaciju, te tu informaciju predaju računalu u obliku nekog električnog signala. Postoje razne vrste senzora, a napravljeni su kako bi mogli izvještavati što se događa na njihovom mjernom polju koje je važno za neku vrstu rada, Na temelju toga se može napraviti regulacija sustava i samoispravljanje sustava temeljem regulacije. Dakle senzori su mjerni uređaji, špijuni koji za svaku promjenu na mjernome polju izvještavaju računalo koje prema zadanom programu i izvješću sa mjernog polja, utjeće na stazu na pravi način i time ravna sustav kako ne bi skrenuo sa željenog smjera.

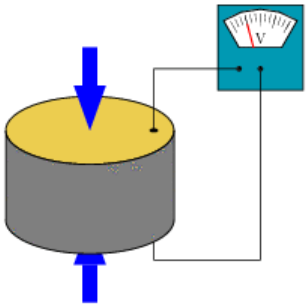
Na ovome se tribometru upotrebljavaju tri različite vrste senzora. Prvi su senzori sila kojih na ovome stroju ima tri komada. To su tenzometarski senzori koji su izgrađeni od Winstonovog mosnog spoja sa 4 tenzometarske trake. Sila koja djeluje na senzor narušava mosni spoj tako da dolazi do neravnoteže mosta tj. pojavljuje se napon neravnoteže mosta proporcionalan sili. Druga vrsta senzora na ovome stroju su senzori mjerenja brzine i položaja. Kako postoji relativno gibanje između neka dva tijela, tako postoji mogućnost da se taj pomak, ali i brzina izmjere. Ovi senzori na ovome stroju za mjerenje brzine i položaja su enkoderi i to inkrementalni i apsolutni. Inkrementalni enkoder mjeri pomak spram prethodne točke, dok apsolutni registrira ukupan pomak spram neke fiksne točke koja se naziva nul-točka. Treća vrsta senzora su senzori za mjerenje temperature. Kako postoji proces mjerenja koji oslobađa toplinu koja utjeće na sam proces mjerenja, tako moraju radi toga postojati senzori koji će izvještavati računalo o promjeni temperature. Termoparovi su jedni od tih senzora, dok su drugi mjerne sonde koje rade na sličan princip.

Svi ovi senzori su kako je rećeno povezani sa računalom. Tako će računalo u svakom trenutku dobivati svježe informacije kakva je temperatura uzorka, koja je normalna sila na uzorak, koja je sila trenja, kojom brzinom trenutno ide linearni motor i sl. Senzorski signal je analogni, a računalo će uzorkovanjem uzimati podatke stanja u nekom sitnom vremenskom intervalu koje će se isprojektirati kasnije.

Senzori na stroju su poput očiju, ušiju i nosa čovjeka, te je nemoguće precizno navođenje stroja bez njih. U ovome poglavlju će biti svaki od senzora ovoga stroja pomno razrađeni kako bi se mogla shvatiti njihova važnost postojanja na tom stroju.

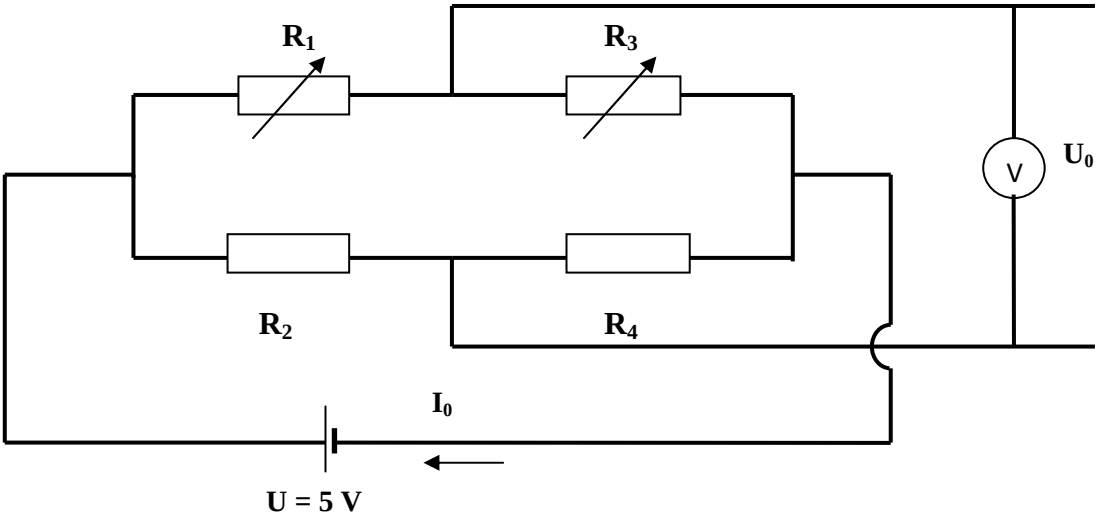
5.1 SENZORI MJERENJA SILA

Mjerenje sile na ovome stroju primarni je dio ovoga mjerenja, jer ovaj stroj je izrađen kako bi mjerio silu trenja i njeno ponašanje usred različitih uvjeta rada stroja. Ovo mjerenje vrši se tenzometarskim senzorima čiji se princip rada može vidjeti na slici 5.1.1:



Slika 5.1.1 *Shema rada tenzometarskog senzora*

Ovaj senzor radi na slijedeći način. Četiri tenzometarske trake spojene su u Wheatstonov most prema slici 5.1.2. Svaka tenzometarska traka reagira na pojavu sile deformacijom trake koja rezultira promjenu električnog otpora unutar nje.



Slika 5.1.2 *Shema djelovanja tenzometarskog senzora*

Na slici 3.1.2 vidi se shema rada senzora. Ovo je polovinski most što bi značilo da je tenzometarska traka na dva otpornika dok su ostala dva nepromjenjiva otpornika. Ovdje vrijedi zakon mosta prije djelovanja sile:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

Ako to vrijedi tada su padovi napona između otpora R_1 i R_3 jednaki pa je razlika potencijala u sredini nula. Zato voltmetar u drugom strujnom krugu pokazuje nulu. Svi otpornici su na početku istog otpora. Ako se most podvrgne opterećenju, tenzometarske će trake promijeniti otpor i tako narušiti ravnotežu mosta pa će većom silom djelovanja i ravnoteža biti proporcionalno više narušena. Kako je ravnoteža mosta narušena tako se javlja razlika potencijala radi promjene pojedinog otpora linearno ovisna promjeni otpora:

$$U_0 = \left(\frac{R_3}{R_1 + R_3} - \frac{R_4}{R_2 + R_4}\right) \cdot U = \left(\frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R - \Delta R} - \frac{R}{R + R}\right) \cdot U$$

$$U_0 = \left(\frac{R + \Delta R}{2R} - \frac{1}{2}\right) \cdot U = \frac{\Delta R}{2R} \cdot U = \boldsymbol{k\Delta R}$$

k je linearni koeficijent omjera napona napajanja i dva puta iznosa otpora. Iz formule se vidi da jednom od dva promjenjiva otpornika povećanjem sile otpor raste, dok drugome pada. To je iz razloga što se jedan postavi na vlačno mjesto, a drugi na tlačno. Tribometar ima tri ovakva senzora smještena unutar senzorske glave. Dva senzora mjere silu trenja, jedan u jednom, drugi u drugom smjeru, a treći senzor mjeri normalnu silu i postavljen je na okomitu os, dok su prva dva senzora smještena u horizontalnoj ravnini i pod **45°** su razmaknuta od aksijalne osi. Senzori moraju unutar kučišta biti dobro uležišteni kako ne bi štetne vibracije utjecale na tok mjerenja. Horizontalni senzori smješteni su unutar dva sklopa vodilica. Kako je tih vodilica 4 komada unutar dvije vodilice su lažni senzori kako se ne bi narušila simetričnost.

Razlog postavljanja senzora pod kutem od 45° od aksijalne osi je taj što je vođenje plovka ostvareno na način da su vodilice postavljene pod 45° od glavnih osi kako sila trenja ne bi slučajno utjecala na krutost sustava. Ovakvo vođenje omogučuje veliku krutost i zato se primjenjuje na senzorskoj glavi. Senzor na taj način mjeri kako je već prije rečeno **70,71 %** sile trenja koja se ostvaruje radi zakreta osiju, te koeficijent s kojime se množi unutar računala ovaj iznos mora biti **1,4142** kako bi se u prikazu dobila stvarna sila trenja. Svi senzori su istog modela **LC 307 – 1K** čiji je kapacitet **5000 N**. Važni podaci prikazani su u tablici 5.1.

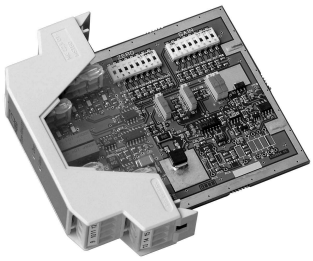
KAPACITET [N]	5000
MOSNI OTPOR PRIJE NAPREZANJA [Ω]	350
UZBUDA [V]	5
IZLAZNI NAPON [mV/V]	1.5
TOČNOST [%]	75
TEMPERATURNO PODRUČJE MJERENJA [K]	-54...121

Tablica *5.1* *Glavne karakteristike senzora sile*

Slika 5.1.3 *Tenzometarski senzor sile - model* ***LC 307 – 1K***

Vanjska oplata ovih senzora je nehrđajući čelik sfernih površina na mjestima gdje će doći do pritiska. To je radi toga da se dobije koncentrirana sila u jednoj točki koja će elastično deformirati senzor prilikom pritiska. Bočni dosjed mora biti prijelazan tako da senzor uđe lagano, ali bez zračnosti unutar ležišta kako se ne bi mogao pomicati unutar njega. Senzor se ne smije izložiti velikom impulsu sile jer bi se prilikom toga mogao uništiti ili drastično oštetiti i više ne bi mogao točno mjeriti silu. Veliki impulsi sila dovode do trenutačnih vrijednosti sile koji u kratkom vremenu ostvaruju silu koja je nekoliko puta veća od maksimalne dopuštene koja je ovdje **300 %** veća od zadanog kapaciteta, a radi sigurnosti senzora uzima se vrijednost **150 %** viša od kapaciteta zadanog senzora. Kabel koji povezuje senzor sa karticom pojačala je četverožični od kojih su dvije žice input, a dvije output, odnosno dvije žice su napajanje mosnog spoja, a dvije su detektori pojave neravnoteže mosta, tj. napona koji ide na izlaz. Samo mjesto postavljanja senzora i princip ugradnje već je objašnjen u poglavlju 4, tako daovdje neće biti opisan. Spomenuo bih još pojačalo na kojega je priključen ovaj senzor sile kako bi ovaj mali napon od max 7,5 mV pojačao na neku na neku veću vrijednost koja bi se mogla uzorkovati na računalu. Specifikacija cijele kartice pojačala, te senzora bit će u prilogu **C2** na kraju ovog rada ili u **literaturi [11]**.

O samom senzoru sile može se više saznati u prilogu **C1** ili u **literaturi [10]**.



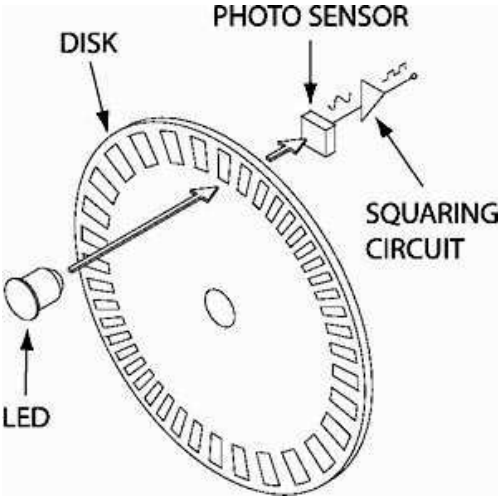
Slika 5.1.4 *Pojačalo senzora sile tipa* ***RM 4220***

Ova kartica daje senzoru napon napajanja U, te prima sa njega napon odziva U_0, kojega pojačava na veću vrijednost koja se može uzorkovati.

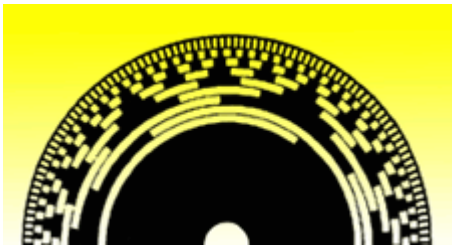
5.2 SENZORI MJERENJA BRZINA I POLOŽAJA

Senzori brzina i položaja koriste se kako bi se u svakom trenutku znalo na kojem se mjestu nalazi gibajući element stroja i koja mu je trenutačna brzina. Podaci o trenutnim brzinama i položajima pokretnih dijelova modula, važni su za regulaciju sustava, budući da je sila trenja ovisna o brzini kod viskoznog trenja prilikom takvog ispitivanja trenja. Kako postoje tri pokretačke osi gibanja, odnosno tri motora koji ih pokreću, tako svaka os ima senzor brzine i položaja koji mjeri njen položaj i brzinu. Za ovo mjerenje odabrani su apsolutni enkoderi. Kako postoji linearni modul kojeg pogoni linearni motor, tako je potrebno imati linearni enkoder pomoću kojega se može mjeriti pomak ovoga modula, te njegova brzina. Apsolutni enkoder za razliku od inkrementalnoga mjeri apsolutni pomak od neke nul-točke, dok inkrementalni mjeri pomak od prethodne točke. Rotacijski moduli koriste rotacijske enkodere i to integrirane unutar sklopa motora. Ti enkoderi mjere brzinu vrtnje i zakret motora u pojedinom trenutku. Tako se pri odabiru motora može za pojedini tip motora odabrati senzor brzine i puta, u ovom slučaju izabrani su motori sa inkrementalnim enkoderom. Točan izgled i način sklapanja tih enkodera unutar motora ne znam jer je to sve zajedno jedan sklop, no ono što se može znati je da taj enkoder radi sa **sin/cos 1 Vpp 2048 pulseva/okretaju**. To bi značilo da mu je korak kuta **360/2048 = 10, 5´ = 3,07 · 10^{-3} rad**.

Kako postoji reduktor koji na modulu rotacijskog diska snagu i gibanje prenosi preko zupčastog remena, iako relativno dobre krutosti, remen je elastičan, te kod iznimno preciznih mjerenja za tzv. ˝Breakaway˝ eksperimente (eksperimente odvajanja) nužno je točno mjeriti deformaciju u tribo sloju. Zato se direktno na vratilu diska postavlja još jedan apsolutni rotacijski enkoder koji se vrti točno jednakom brzinom kao i vratilo, čija torzijska krutost ne dolazi u pitanje. Svi ovi enkoderi su optički. Neće se zalaziti duboko unutar same strukture no dobro je vidjeti kako otprilike stvar funkcionira. No prije toga pogledajmo sliku 5.2.1:



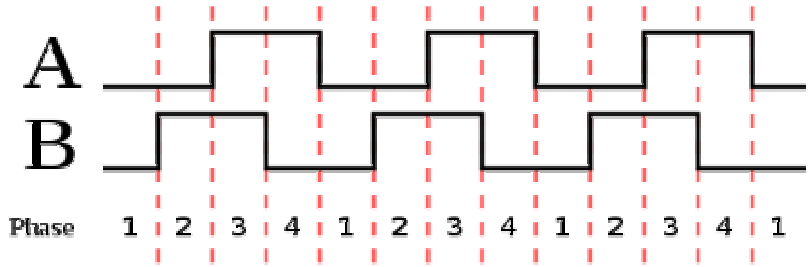
Slika 5.2.1 *Princip rada enkodera*



Slika 5.2.2 *10-bitni kodni disk*

Led dioda senzora ima usmjereno svjetlo preko objektiva koje prolazi kroz kodni disk koji se okreće zajedno sa elementom čiji se položaj mjeri. Ovo ne mora biti disk, već može biti traka u slučaju mjerenja linearnog elementa. Jedan 10-bitni kodni disk je prikazan na slici 5.2.2. On daje korak razlučivosti od **0,351°**. Budući da se želi velika točnost uzima se višebitni disk na kojemu se može isčitati finiji korak, tako da se odredi položaj sa velikom točnošću. Npr. 12 bitni disk daje kutni korak od **0,088°** što je velika preciznost. Svaki korak koda je jedinstven i neponovljiv tako da vrijedi ta kombinacija bitova samo za taj korak. Svijetlo prolazi samo kroz transparentni dio mreže (bijelo), a kroz puni dio polja (crno) svijetlost ne prolazi.

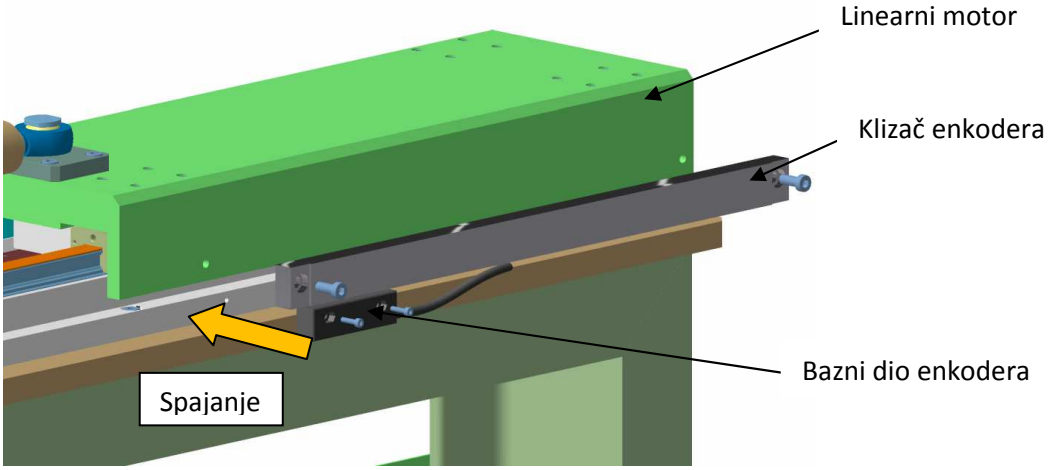
Iza ploče se nalazi fotočelija od n-bitnih fotodioda. Taj niz dioda prihvaća svijetlost u raznoj kombinaciji. Svaka kombinacija daje drugačiji napon koji ulazi u računalo. Prema tom naponu određuje se koji je položaj diska. To je princip apsolutnog encodera. Brzinu mjeri na način da mjeri vrijeme, pa preko intervala u kojemu se mijenjaju naponi izmjeri brzinu kao razliku potencijala kroz vrijeme intervala. Princip inkrementalnog enkodera je slijedeći: dvije rešetkaste ploče od kojih je jedna nepokretna ,a druga se kreće sa zadanim pokretnim elementom, obasjane su usmjerenim svjetlom sa LED diode. Na nepokretnoj rešetkastoj ploči postoje 4 polja rešetaka koja su odvojena jedna od drugih razmakom. Kako svijetlost prolazi kroz 4 polja rešetaka na jednoj rešetkastoj ploči, te kroz pokretnu rešetku koja se kreće, u svakome trenutku se dobiva od svakoga polja sinusoidni oblik signala. Takva 4 sinusoidna signala svjetla pomaknuta za fazni kut od 90° se očitavaju na fotočeliji koja jakost svjetla pretvara u napon. Dobiveni napon je isto sinusoidni koji odlazi na zbrajanje. Zbrajaju se dva polja međusobnog faznog razmaka 180° tako da se dobivaju dva sinusoidna ulazna signala pomaknuta za 90°. Ta dva signala ulaze u uređaj za dobivanje kvadratnog signala prikazanog na slici 5.2.3:



Slika 5.2.3 *Izlazni signal inkrementalnog enkodera*

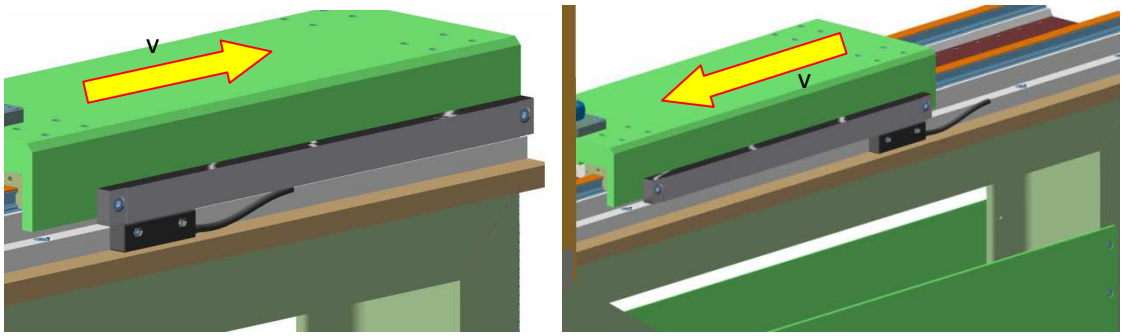
Valna duljina titraja signala A povezana je sa duljinom nekog puta na mjernoj stazi. Želi li se od jedne do druge točke doći po toj stazi mora se taj put podijeliti sa valnom duljinom signala da bi se dobio broj ponavljanja titraja. Na taj se način dolazi iz točke 1 u točku 2.

Smjer kretanja se određuje sa zbrojem oba signala gdje, ako se krene sa jednoga mjesta u lijevo ili desno ne dobivamo jednak binarni zbroj, a ta nejednakost definira smjer gibanja. Tribometar ima dakle četiri enkodera koja mjere brzinu i položaj njegovih pokretnih modula. Praćenje linearnog modula osigurava linearni apsolutni enkoder prikazan na slici 3.2.4. Sastoji se od dva dijela. Jedan dio je fiksni i postavlja se na nepomični dio, dok je drugi dio klizač te se postavlja na gibajući dio stroja.



Slika 5.2.4 *Montiranje linearnog apsolutnog enkodera na linearni modul*

Enkoder se pričvršćuje vijcima na svoje predviđeno mjesto. Ravnina linearnog motora na koji se pričvršćuje klizač mora ujedno biti i ravnina monobloka na koji se pričvršćuje bazni dio enkodera. Preko baznog dijela je enkoder žicom priključen na računalo. Ovaj apsolutni linearni enkoder koji se postavlja na tribometar je tip **LC 481**. Njegova dužina odabire se prema željenoj duljini mjerenja ovim enkoderom, ovdje je njegova dužina **420 mm**. Njegove dimenzije i način prikapčanja na računalo prikazano je u prilogu **C3** na kraju ovog rada, a više o ovome senzoru može se saznati u **literaturi [12]** i **[13]**. Uslijed gibanja linearnog motora lijevo – desno, klizač enkodera će zajedno sa njime putovati, dok baza stoji na mjestu.



Slika 5.2.5 *Prikaz ponašanja linearnog enkodera uslijed rada linearnog motora*

Unutar klizača enkodera nalazi se kodna traka koja je nepokretna s obzirom na klizač, a zaštićena je izvana sa oplatom od aluminija. Na bazu se vežu svi ostali elementi koji se trebaju relativno gibati spram kodne trake. Kučište enkodera mora biti zaštićeno od vlage i prašine u zraku kako bi se mjerenje držalo pod kontrolom jer je ovaj optički sustav jako osjetljiv te je potrebno na njega paziti.

Slika 5.2.6 *Rotacijski enkoder*

Slika 5.2.7 *Linearni enkoder* ***LC 481***

Kako je već spomenuto, radi elastičnosti remenskog prijenosa na modulu rotacijskog diska potrebno je postaviti rotacijski inkrementalni enkoder direktno na vratilo rotacijskog diska. Kako ovaj enkoder još nije točno izabran, ne mogu puno napisati o njemu već ću istaknuti da se planira staviti enkoder sličan ovome kojeg prikazuje slika 5.2.6, a to je enkoder bez vratila koji se postavlja na vratilo promjera **12 mm**. Ima više tipova ovakvih sličnih enkodera no najbliži bi za izabrati bio inkrementalni enkoder tipa **ERN 480**, **1 V_{PP}**, **5 V**. Prikaz postavljanja ovakvog enkodera prikazan je u poglavlju 4 kod opisa rotacijskog modula. Ovaj će se senzor staviti naknadno, ako to bude potrebno. Inkrementalni enkoder motora diska biti će za sada dovoljno precizan za mjerenja koja se planiraju na ovome stroju. Mjesto postavljanja ovoga enkodera je točno osigurano i dovoljno ga je samo postaviti nakon što se izabere i nabavi.

Motor senzorske glave ima isti inkrementalni enkoder integriran unutar motora kao i motor rotacijskog diska.

Više o rotacijskom inkrementalnom enkoderu može se naći u prilogu **C4** , a općenito o rotacijskim enkoderima u **literaturi [14]**.

5.3 SENZORI MJERENJA TEMPERATURE

Senzori temperature na tribometru koriste se iz tog razloga što se usred tribološkog ispitivanja oslobađa energija u obliku topline koja reagira povišenjem temperature uzoraka i maziva koji se pri tom koriste pri ispitivanju, te zraka unutar komore. Ta oslobođena toplina djeluje na silu trenja direktno i indirektno.

Direktno djeluje tako što povišenjem temperature nekog materijala dolazi do utjecaja na materijal i na samu površinu trenja, te se mijenja faktor trenja, kojemu kod ispitivanja npr. dva metala pada vrijednost. Indirektno toplina na trenje djeluje preko normalne sile. Kako tijelo pri povišenju temperature dobiva na volumenu, ako će se zakočiti regulacija normalne sile, uslijed povećanja volumena tijela ispitivanja porasti će normalna sila, a time i sila trenja. Zato je važno mjeriti temperaturu kako bi se moglo doći do saznanja kako se točno ponaša sila trenja uz primjerice linearno povišenje temperature uz F_N = konst. Klima komora je projektirana da drži temperature između **-20 i 60 °C**, što ne znači da se ne smiju prijeći ove vrijednosti. Na tribometar će se za ispitivanje temperature postaviti nekoliko termoparova. Kako još nije točno odlučeno gdje će ići koji termopar, ne mogu točno opisati način ugradnje, ali se zato zna da će dva termopara ići direktno na uzorke, tj. umontirat će se po jedan direktno negdje kod stezača uzorka, što je par milimetara udaljeno od samog mjesta trljanja dvaju materijala gdje se oslobađa toplina.

Slika 5.3.1 *Princip djelovanja termopara*

Temperatura naravno pada sa udaljenošću od same točke ispitivanja, no ako se dovoljno senzor približi na samo nekoliko milimetara, mjerenje će biti dovoljno kvalitetno, a može se radi preciznosti odrediti koliki je odnos pada temperature od same ispitne točke do tog mjesta ispitivanja, pa se izmjerena vrijednost prikaže sa faktorom pojačanja da bi se dobio precizniji iznos. Termopar je inače senzor koji je sastavljen od dviju žica međusobno spojenih na jednom kraju. Na tom kraju kada se zagrijava spoj događa se to da na drugome kraju između žica dolazi do razlike potencijala i taj napon je to veći što je viša temperatura. Osim što će se mjeriti temperatura obaju uzoraka, mjerit će se i temperatura maziva koje će biti između dva tijela koja se ispituju.

Taj senzor također ne smije biti daleko od mjesta ispitivanja kako temperatura ne bi suviše pala do senzora i time narušila preciznost mjerenja.

Ovdje će se koristiti dvije vrste termoparova, od kojih je jedna vrsta tzv. sonda kojoj je mjerno mjesto pipac od nehrđujućeg čelika unutar kojeg se nalazi termopar-spoj, dok druga vrsta termopara ima ispitno mjesto u obliku tanke izolirane trake koja se nalijepi posebnim ljepilom na mjesto ispitivanja temperature. Unutar tog tankog izoliranog sloja nalazi se spojno mjesto materijala termopara. Tip sonde koji se ovdje upotrebljava je ***OMEGA TC-T-NPT-U-72***, dok je tip termopara sa izoliranom trakom ***OMEGA SA 1XL-T***.

Termopari u obliku trake postavljat će se direktno na ispitne uzorke i na mjesta kojima se cijedi tekućina za podmazivanje i hlađenje, dok će se sonde upotrebljavati za mjerenje temperature same komore. Ovi termoparovi mogu mjeriti temperaturu i do **315 °C**.

Detaljnija specifikacija i prikaz ovih senzora nalazi se u prilogu **C5** na kraju ovoga rada ili u **literaturi [15]** i **[16]**. Budući da promjenom temperature senzor reagira sa promjenom napona koji je reda veličine **1 mV**, taj se signal treba pojačati na red veličine **1V** kao bi se mogao dalje obrađivati. Za to služi pojačalo za termoparove tipa ***OMEGA DRF-TCT*** sa **24 V_{DC}** napajanjem i sa outputom od **0-10 V_{DC}**, mjerenja temperatura do **200 °C**. Više o njemu može se vidjeti u prilogu **C6** ili **literaturi [17]**.

6. KARAKTERISTIKE PARAMETARA TRIBOMETRA

U ovome poglavlju bit će riječ o parametrima opisivanog tribometra. Svojstva parametara i njihova dinamika veoma su važni jer utjeću na mjerenje koje je centar pažnje ovoga mjernog uređaja. Svi se parametri tribometra mogu mjeriti, a time i upravljati, te se određeni parametri mogu fiksirati dok se promatraju neki drugi parametri koji se mijenjaju tokom rada. Na taj se način može postići to da se dobije točna ovisnost određenih parametara o drugim parametrima sustava. Radi tih se nepoznanica radio ovaj stroj i glavni mu je zadatak pronaći ovisnost i veze između pojedinih veličina koje se ovdje mjenjaju. Glavni parametri tribometra su slijedeći:

1. ***položaj linearnog motora***
2. ***brzina linearnog motora***
3. ***ubrzanje linearnog motora***
4. ***sila linearnog motora***
5. ***kut zakreta diska***
6. ***obodna brzina diska***
7. ***učestalost vrtnje diska***
8. ***sila trenja***
9. ***normalna sila pritiska***
10. ***temperatura uzoraka***

Postoji još parametara, no ovi navedeni su najbitniji parametri tokom ispitivanja procesa mjerenja na ovome stroju. Ovdje će biti opisano ponašanje određenih parametara u ovisnosti o vremenu ili o nekom drugom spomenutom parametru tokom rada tribometra. Veoma je zanimljiv utjecaj temperature na uzorke, te plastična deformacija uzoraka. Zato će se ova cjelina promatrati u idealnom procesu gdje nema utjecaja deformacija i temperature, te nakon toga uz njihovu prisutnost. Ovdje će biti prikazane stvari u onolikom razmjeru koliko su dosad poznate. Neke stvari možda neće biti skroz točne radi drugih utjecaja za koje se do sad ne zna ili se samo nagađaju. Zato postoji ovaj tribometar koji će ih definirati mjernim pokusom s velikom točnošću.

6.1 KARAKTERISTIKE PARAMETARA UZ KONSTANTNU TEMPERATURU I ZANEMARIVANJE PLASTIČNE DEFORMACIJE UZORAKA

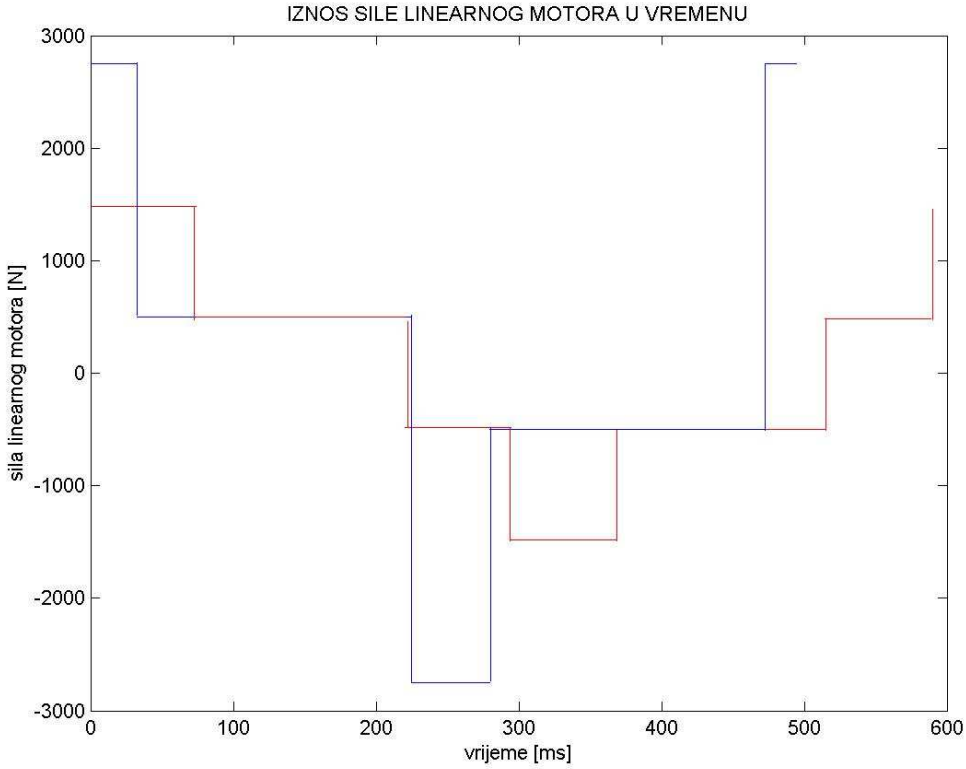
Opisujući proces ispitivanja trenja već se do sad moglo primijetiti da je veoma zahtjevan proces uz puno dinamike. Svaki proces gdje postoji trenje dviju površina uz neku relativnu brzinu, oslobađa toplinu uz porast temperature. Ranije opisano temperaturno djelovanje kod nekih materijala je veće, dok je kod nekih manje značajno. Takav proces trenja popračen je i deformacijama površina, bilo da se radi o trošenju pa su značajne plastične deformacije i skidanje materijala, no isto tako su interesantne i elastične deformacije, pogotovo kod veoma elastičnih materijala kao što je guma. Elastična deformacija dodatno pojaćava normalnu silu na djelujuću površinu.

U ovome dijelu će se deformacije i temperaturni utjecaj zanemariti i proces ispitivanja trenja će se promatrati kao da tih utjecaja uopće nema.

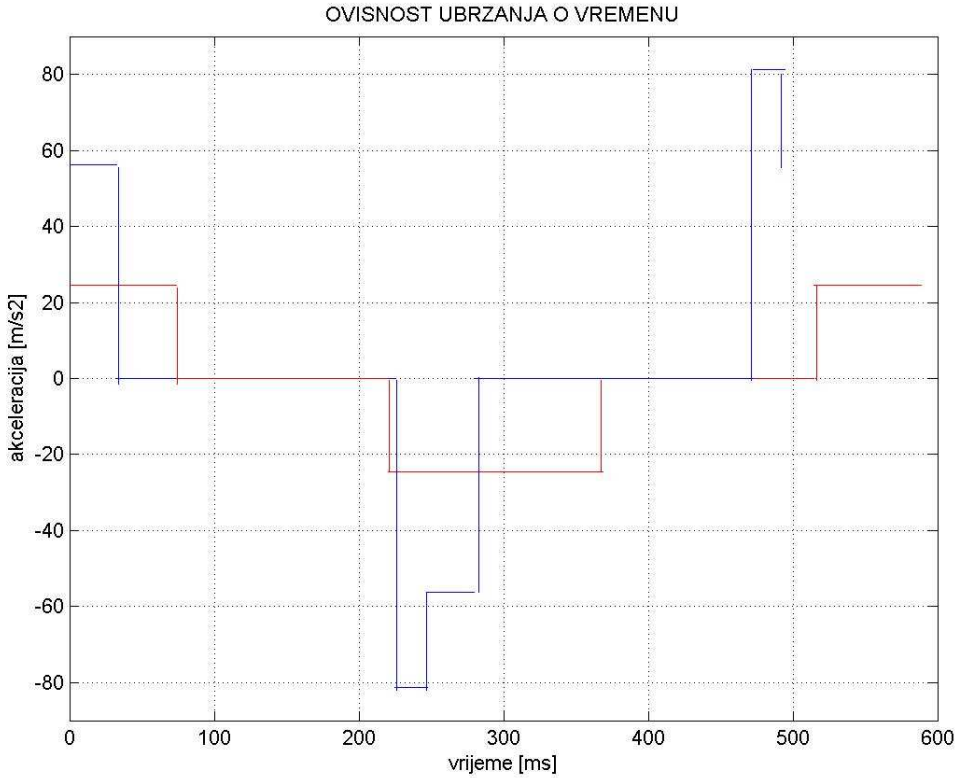
Krenimo vidjeti što se događa dok je u radu linearni aksijalni modul. On u toku rada na stazi ukupne dužine dužine **400 mm** titra čas na jednu, čas na drugu stranu. Pri tome neprestano ubrzava, dostiže neku brzinu na kojoj obavlja rad i zatim usporava na nulu te mijenja smijer kretanja. Sila motora se pri tom može mijenjati ili biti stalna tokom rada procesa. Normalna sila trebala bi ostati konstantna, kao i sila trenja. Da li postoji kakav utjecaj još koji bi utjecao na njih osim deformacije površine i promjene temperature, ne može se znati unaprijed. Slika 6.1.1 prikazuje neke od mogučnosti korištenja sile motora tokom procesa. Sila označena plavom bojom je maksimalna sila koja djeluje na proces pri maksimalnom ubrzanju uz maksimalnu silu trenja. Vidljivo je kako sila smanjuje iznos na iznos maksimalne sile trenja u toku stacionarnog rada motora. Stacionaran rad motora je rad kada nema prisutne akceleracije i retardacije.

Na slici 6.1.2 prikazano je ponašanje akceleracije u vremenu. Plava boja prikazuje režim akceleracije kod djelovanja maksimalne sile, dok crvena prikazuje akceleraciju 2,5g koja je preporučena od strane HS-TEC-a. Iz slika je vidljivo da kod djelovanja stalne sile motora u periodu ubrzanja, ubrzanje će mjenjati svoj iznos u tom periodu, no ako se želi da postoji stalno ubrzanje, onda će sila na motoru mijenjati iznos u tom periodu. Kada ne bi postojalo opterečenje tj. sila trenja koja je konstantna u ovome slučaju, tada bi akceleracija točno slijedila silu motora.

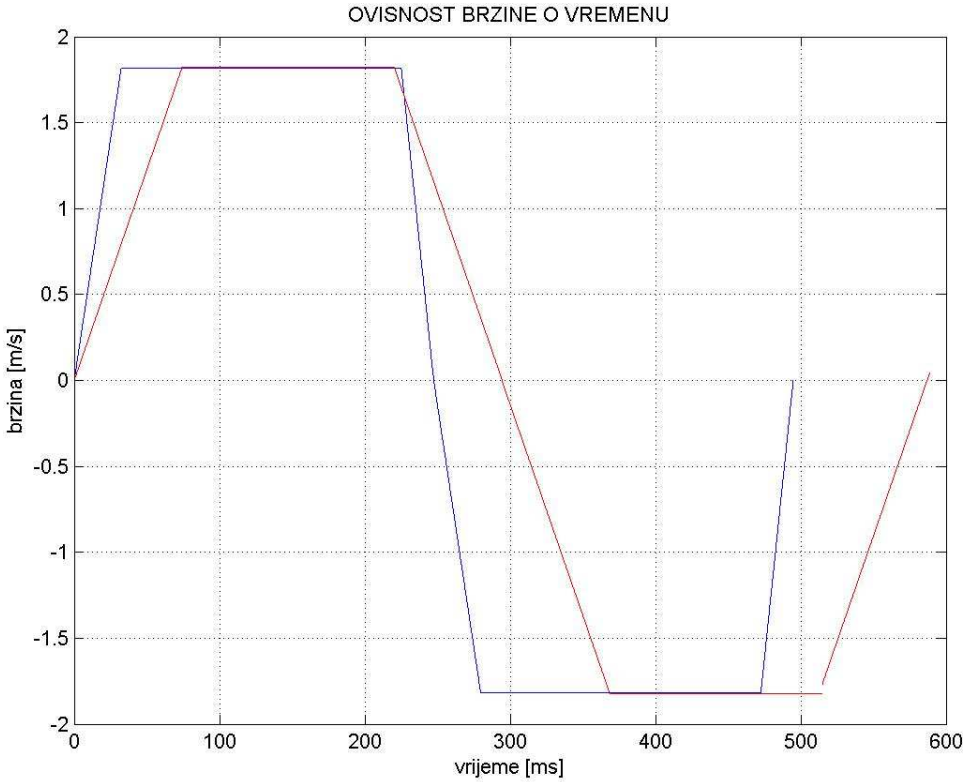
Kod maksimalne sile $\mathbf{F_{max}}$ **= 2750 N**, brzina ne smije prijeći iznos od **1.817 m/s** jer bi pregorio motor, pošto je snaga motora 5 kW. Kada bi motor ubrzavao dalje sa ovom akceleracijom iznad ove brzine uz maksimalnu silu, postojala bi opasnost za namote, pa to treba izbjegavati. Slika 6.1.3 prikazuje ponašanje brzine pri maksimalnoj akceleraciji i maksimalnoj sili motora. Crvenom bojom je prikazana krivulja koja vrijedi za maksimalno ubrzanje preporučeno od strane HS-TEC-a.



Slika 6.1.1 *Ovisnost sile linearnog motora o vremenu*



Slika 6.1.2 *Ovisnost ubrzanja linearnog motora o vremenu*



Slika 6.1.3 *Ovisnost brzine linearnog motora o vremenu*

Ovi tri dijagrami (slika 6.1.1 , 6.1.2 i 6.1.3) prikazuju ovisnost brzine, akceleracije i sile motora o vremenu. Plave krivulje i pravci prikazuju maksimalne iznose u vremenskom intervalu za maksimalan put **800 mm**, dakle put **400 mm** u oba smjera. Veća ubrzanja od ovdje prikazanih moguća su samo uz neopterećen motor, a to ovdje i nije toliko interesantno budući da se promatra sustav tokom obrade. Ovi dijagrami bazirani su na podacima izračunatim u ***poglavlju 4***. Ako će se ići na rad motora sa manjim silama, onda će i ubrzanje biti manje uz istu silu trenja koja se drži maksimalnom. Dakle većom akceleracijom od plave linije prikazane na prethodnim slikama se ne ide. Prikazani maksimalni limit (plavo) i gornji preporučeni limit (crveno) su krajnje vrijednosti koje se gotovo i ne koriste, ali može se dogoditi da je stroju potrebna snaga pri ispitivanju pa dotiće krajnje vrijednosti. Slika 6.1.4 prikazuje ovisnost položaja mjernih kolica, a time i linearnog motora o vremenu. Plava krivulja prikazuje režim pod djelovanjem maksimalnih parametara (sile motora, ubrzanja, brzine), dok crvena prikazuje režim koji preporučuje HS-TEC. Ono što se nije spomenulo je to da po HS-TEC režimu, budući da je sila motora manja, može se prijeći na višu brzinu od one koju dozvoljava režim pri djelovanju maksimalne sile.

Maksimalna brzina po HS-TEC režimu bila bi:

$$v_{HS-TEC,max} = \frac{P_{lm,max}}{F_{HS-TEC,max}}$$

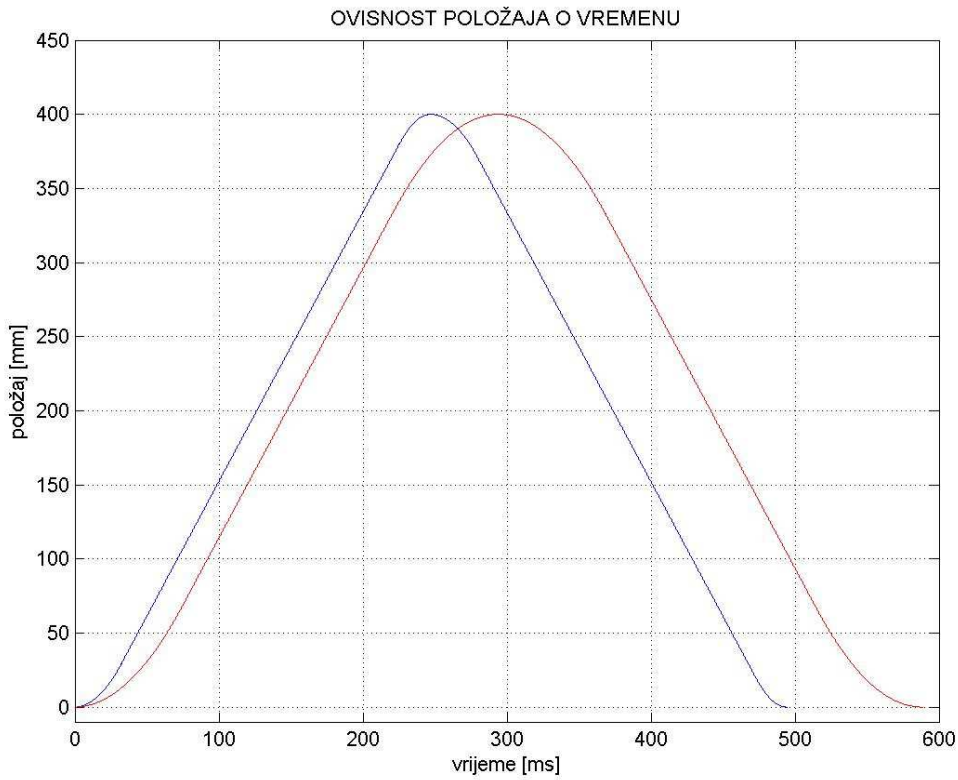
$F_{HS-TEC,max}$ - *maksimalna sila pri HS-TEC režimu rada*

$P_{lm,max}$ - *maksimalna snaga linearnog motora*

$$F_{HS-TEC,max} = m \cdot a_{HS-TEC} + F_{f,max} = 40 \cdot 24.525 + 500$$

$$\boxed{F_{HS-TEC,max} = 1481\ N}$$

$$v_{HS-TEC,max} = \frac{5000}{1500} = 3.34\ m/s$$



Slika 6.1.4 *Ovisnost položaja mjernih kolica linearnog modula o vremenu*

Maksimalna dobivena brzina koju može podnijeti motor prema režimu rada HS-TEC-a koji preporučuje maksimalno ubrzanje **2,5g**, gdje je ***g*** gravitacijska konstanta zemlje, je **3.34 m/s**.

Da bi motor došao do ove brzine, uz preporučeno ubrzanje od 24.525 m/s^2, motor bi morao prijeći put od:

$$s_{acc,HS-TEC} = \frac{v^2{}_{HS-TEC,max}}{2 \cdot a_{HS-TEC}} = \frac{3.34^2}{2 \cdot 24.525} = \mathbf{227.4mm}$$

Uz ovaj put ubrzanja, ako zbrojimo put usporavanja koji bi uz istu retardaciju trebao iznositi isto ovoliko, maksimalni put motora morao bi biti oko **450 mm**, plus što bi se moralo dodati još dio puta gdje bi sustav bio u stacionarnom stanju u kojem bi se promatrala sama obrada, znači najmanje bi staza trebala biti dugačka **500 mm**, a stvarna staza ima **400 mm**, dakle ovaj sistem ne bi uspio u potpunosti jer staza nije dovoljno dugačka. Ako bi sustav ovako ubrzavao, a usporavao jaćom retardacijom, motor bi bio u opasnosti da pregori jer bi izašao van svoje maksimalne snage.

Kolika je to maksimalna brzina postiziva sa ovim motorom uz zadane uvjete potrebno je izračunati. Ne smije se dakle prijeći snaga motora koja je 5 kW, niti se može produžiti put kretanja koji je 400 mm. Maksimalno ubrzanje će se za početak uzeti da je ono preporučeno od strane HS-TEC-a, a to je **24.525 m/s^2** . Stacionarni put bi morao iznositi najmanje **20 mm** kako bi se na tom dijelu puta moglo nešto ispitivati. Sada se treba izvršiti interacija kako bi se dobila maksimalna brzina, a da se ne premaši maksimalna snaga.

$$\boxed{\boldsymbol{P}_{lm,max} = \boldsymbol{F}_i \cdot \boldsymbol{v}_i}$$

Gdje su: **F**$_i$ - *maksimalna sila kod maksimalno moguće brzine na linearnom modulu*

v$_i$ - *maksimalna postiziva brzina na linearnom modulu tribometra*

Za najmanji stacionarni put $\mathbf{s_{stac,min}}$ **= 20 mm**, maksimalni put ubrzanja bio bi $\mathbf{s_{acc,max}}$ **= 190 mm**.

Sada vrijede formule:

$$F_i = m \cdot a_i + F_{f,max}$$

$$v_i = \sqrt{2 \cdot a_i \cdot s_{acc,max}}$$

$$F_{i1} = m \cdot a_{HS-TEC} + F_{f,max} = 40 \cdot 24.525 + 500 = 1481\ N$$

$$v_{i1} = \sqrt{2 \cdot 0.19 \cdot 24.525} = 3.053\ m/s$$

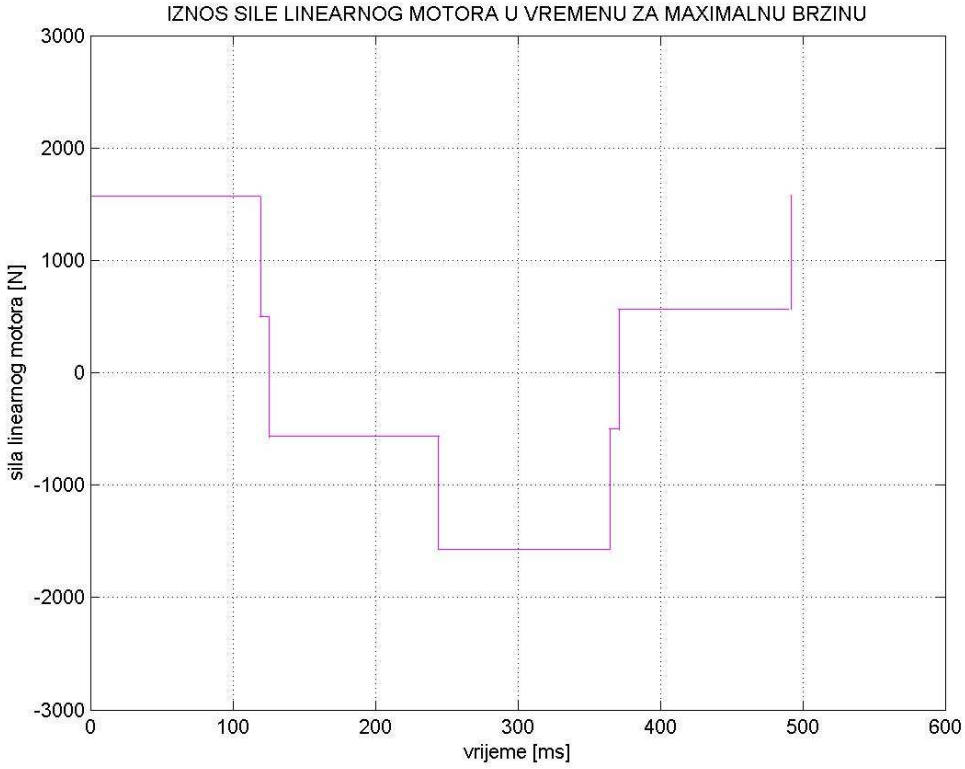
$$P_{i1} = 1481 \cdot 3.053 = 4521W < P_{lm,max}$$

Ako se ponovi interacija i uzme maksimalna akceleracija $\mathbf{a_{i2}}$ **= 26.7 m/s^2**, tada vrijedi:

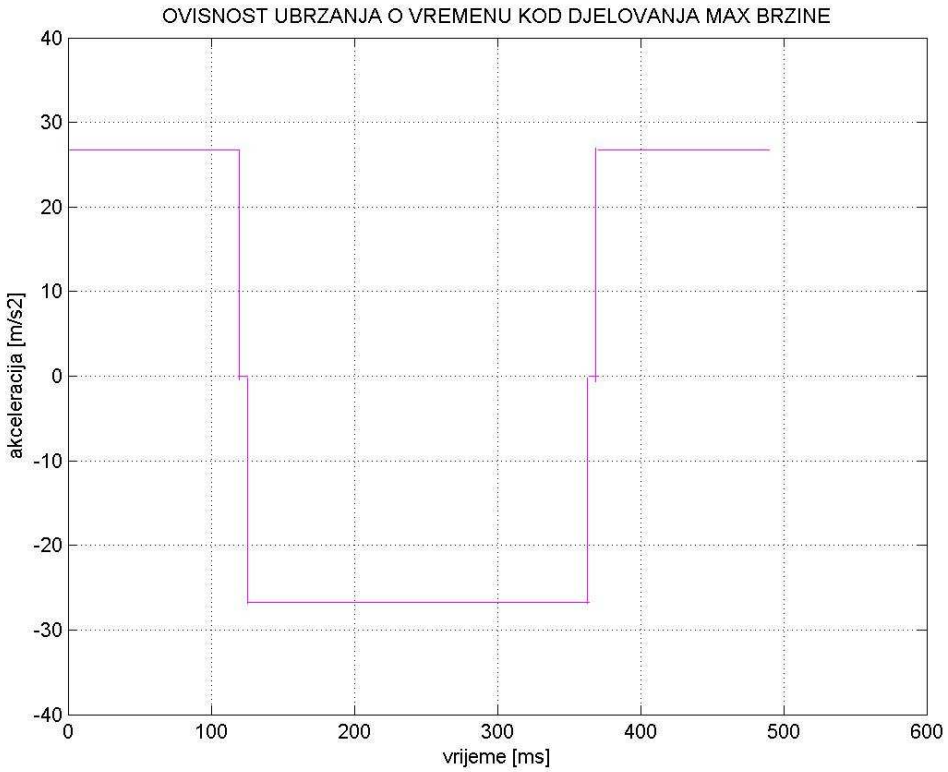
$$F_{i2} = m \cdot a_{i2} + F_{f,max} = 40 \cdot 26.7 + 500 = \mathbf{1568\ N}$$

$$v_{i2} = \sqrt{2 \cdot 0.19 \cdot 26.7} = \mathbf{3.185\ m/s}$$

$$P_{i2} = 1568 \cdot 3.185 = 4994\ W \cong P_{lm,max}$$



Slika 6.1.5 *Ovisnost sile linearnog motora o vremenu za max. stac. brzinu*



Slika 6.1.6 *Ovisnost akceleracije linearnog motora o vremenu za max. stac. brzinu*

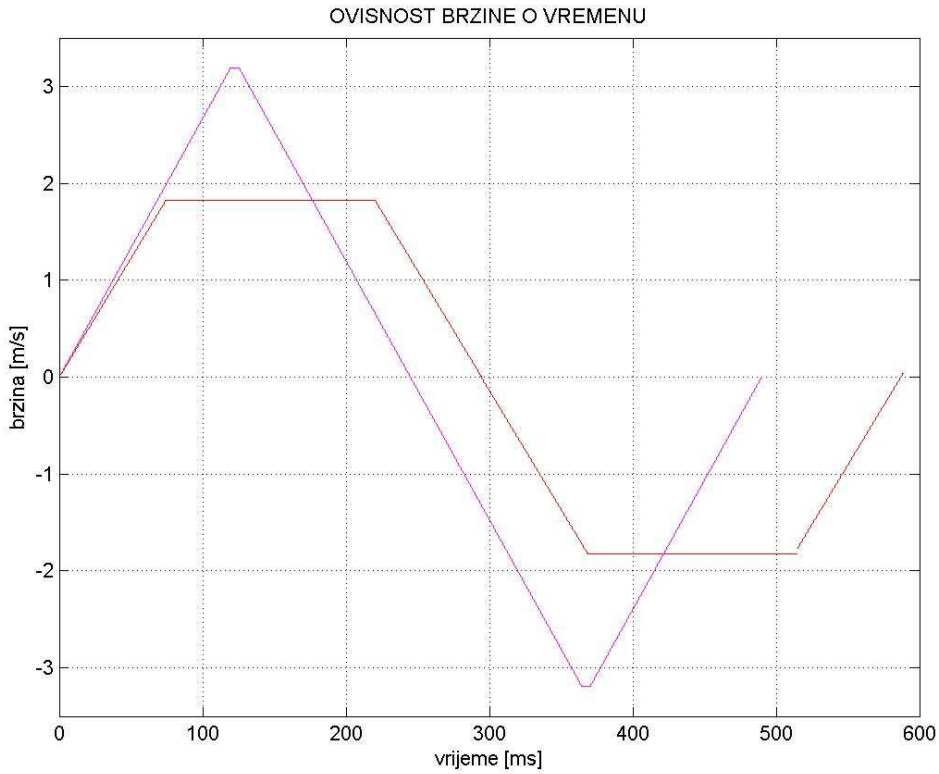
Podaci za maksimalnu brzinu na ovome modulu su slijedeći:

Akceleracija i retardacija..... $\mathbf{a_{vmax} = 26.7\ m/s^2}$

Sila motora..... $\mathbf{F_{vmax} = 1568\ N}$

Maksimalna brzina linearnog modula..... $\mathbf{v_{max} = 3.185\ m/s}$

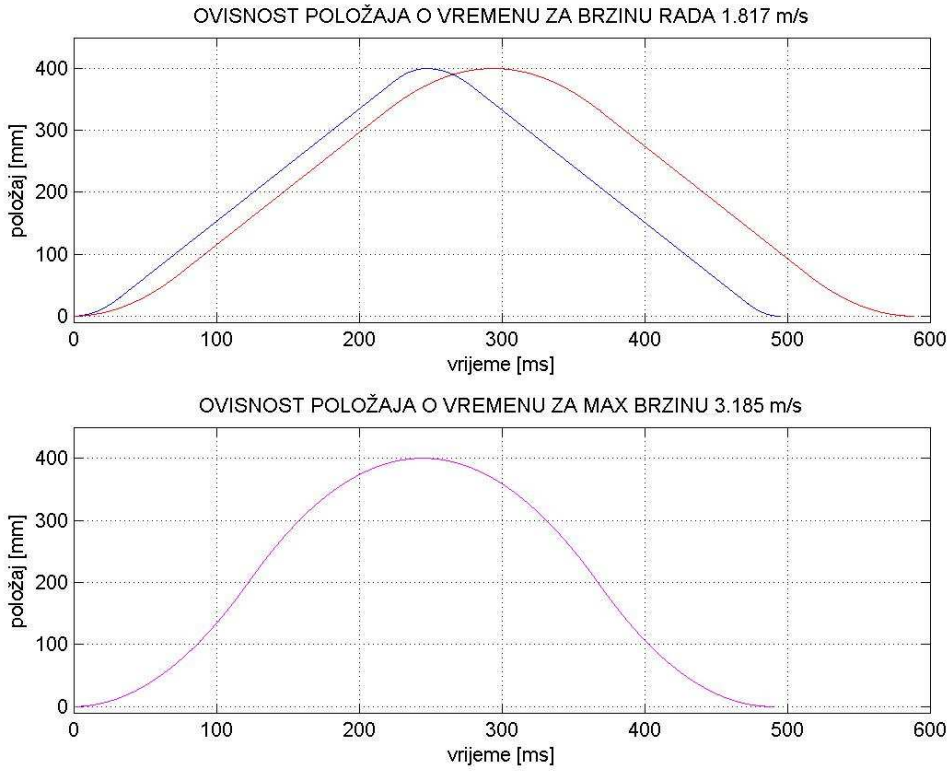
Slika 6.1.5 prikazuje kako se ponaša sila motora u vremenu kada se želi dobiti maksimalna brzina u iznosu **3.185 m/s**, a slika 6.1.6 prikazuje ubrzanje linearnog motora da bi se postigao spomenuti tijek sile motora i maksimalna brzina. Tijek brzine i položaja prikazuju slike 6.1.7 i 6.1.8. Na njima su za usporedbu crvenom bojom prikazane preporučene vrijednosti.



Slika 6.1.7 *Ovisnost brzine linearnog motora o vremenu – maksimalna brzina*

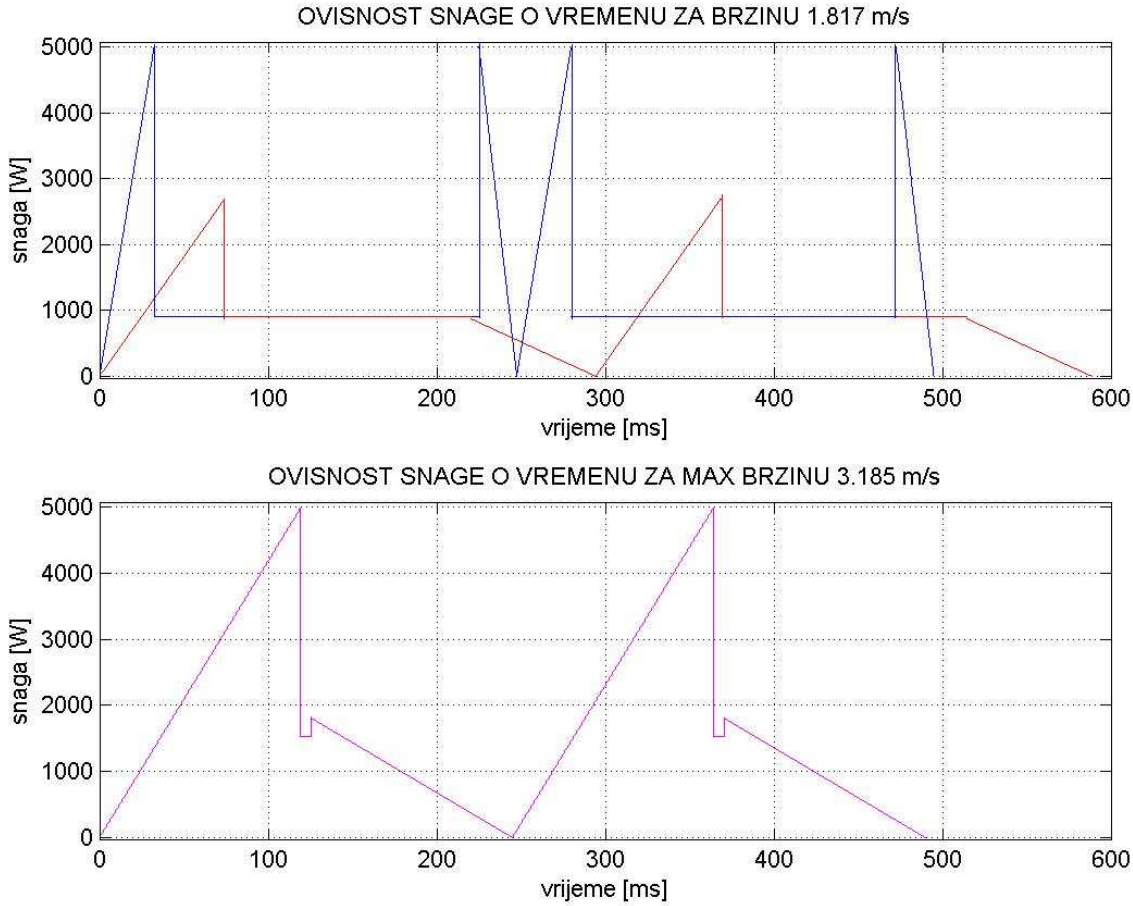
Iz dijagrama 6.1.7 vidi se kako djeluje malo veće ubrzanje (nagib roze krivulje veći) od preporučenog ubrzanja. Radi većeg ubrzanja i veće brzine, vremenski period ovog ciklusa će biti manji od perioda preporučenog ciklusa.

Na slici 6.1.8 su dva dijagrama od kojih je gornji već prikazan na slici 6.1.4. i služi za usporedbu donjem dijagramu koji prikazuje kako se položaj mijenja u vremenu kod djelovanja maksimalne brzine uz prateći režim. Ovdje je stacionarni put jako malen pa motor gotovo neprestano ubrzava i usporava bez puno odmora. Zato je ovdje motor više opterećen pa postoji opasnost od pregrijavanja. Za ovakav režim rada treba smanjiti ulaznu temperaturu vode između **10** i **15°C**.



Slika 6.1.8 *Ovisnost položaja linearnog motora o vremenu – maksimalna brzina i brzina kod maksimalne sile*

Ako se pogleda kretanje snage na linearnom motoru u toku rada za režim kada djeluje maksimalna sila i ubrzanje motora, gdje djeluje preporučeno ubrzanje i gdje djeluje maksimalna brzina (*Slika 6.1.9*), lijepo se vidi da se maksimalna snaga linearnog motora postiže samo u jednom malom djeliću vremena i to onda kada kod ubrzanja motor postigne odgovarajuću brzinu. Prema ovome ovaj bi se motor dao još opteretiti većom radnom silom trenja, ali kako je ona maksimalna predviđena za ovaj tribometar $\mathbf{F_{f,max}}$ **= 500 N**, može se ići na povećanje max brzine, tako da se u malom vremenskom periodu premaši snaga motora. Sa druge strane gledajuć ovaj motor u kratkom vremenskom periodu ima veliku dinamiku i stalno ide čas u jednu, čas u drugu stranu sa velikom brzinom i ubrzanjima. Zato kada bi se povećala snaga za kratki vremenski period, kako motor brzo mijenja smjer gibanja, tako se razvijena toplina koja bi se na ovaj način nakupljala ne bi stigla izvesti sa motora te postoji mogućnost da motor strada. Zato preopterećenje može biti do nekih **5** do **10 %** maksimalno uz bolje hlađenje motora što se postiže sniženom temperaturom rashladne vode na ulazu u motor.



Slika 6.1.9 *Ovisnost snage linearnog motora o vremenu*

Gornji dijagram sa slike 6.1.9 prikazuje snagu motora u ovisnosti o vremenu kod djelovanja maksimalne sile linearnog motora i maksimalne akceleracije (plavo) i snagu u ovisnosti o vremenu kod djelovanja preporučene akceleracije (crvena). Donji dijagram prikazuje snagu motora u ovisnosti o vremenu kod djelovanja maksimalne brzine.

Do sad se sustav promatrao u okviru maksimalnog puta od **400 mm**. U realnim ispitivanjima uzorak je najčešće mali i put linearnog motora se kreće negdje oko **100 mm**. Neka 100 mm bude jedinični put kojega će se promatrati. S obzirom na njega moći će se odrediti parametri za bilo koju drugu dužinu puta. Neka jedinična akceleracija bude ona preporučena od strane HS-TEC-a, pa s obzirom na tu akceleraciju lako se može odrediti brzina uz jedinični put koji je već određen.

Pogledajmo zadane podatke:

Jedinična dužina staze linearnog motora u jednom smijeru..... s_{jed} **= 100 mm**

Jedinična akceleracija..... $a_{HS\text{-}TEC}$ **= 24.525m/s^2**

Maksimalna moguća akceleracija..... $a_{max,acc}$ **= 56.25 m/s^2**

Jedinični put ubrzanja..... $s_{jed,acc}$ **= 10 mm**

Brzina se dobiva prema slijedećoj formuli:

$$v = \sqrt{2 \cdot a_{jed} \cdot s_{jed,acc} \cdot k_1 \cdot k_2}$$

Gdje su: **k_1**.....*faktor povećanja ubrzanja*

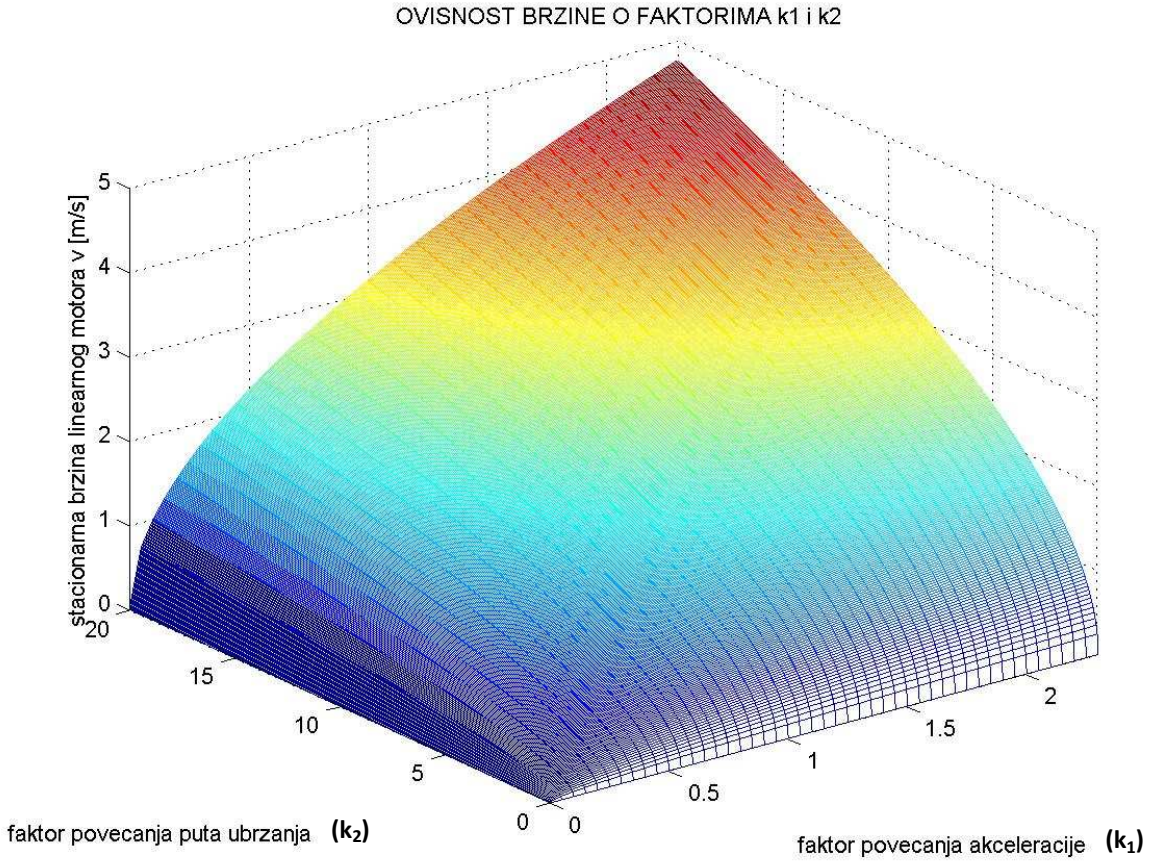
k_2.....*faktor povećanja puta ubrzanja*

Stacionarna brzina za jedinične parametre je:

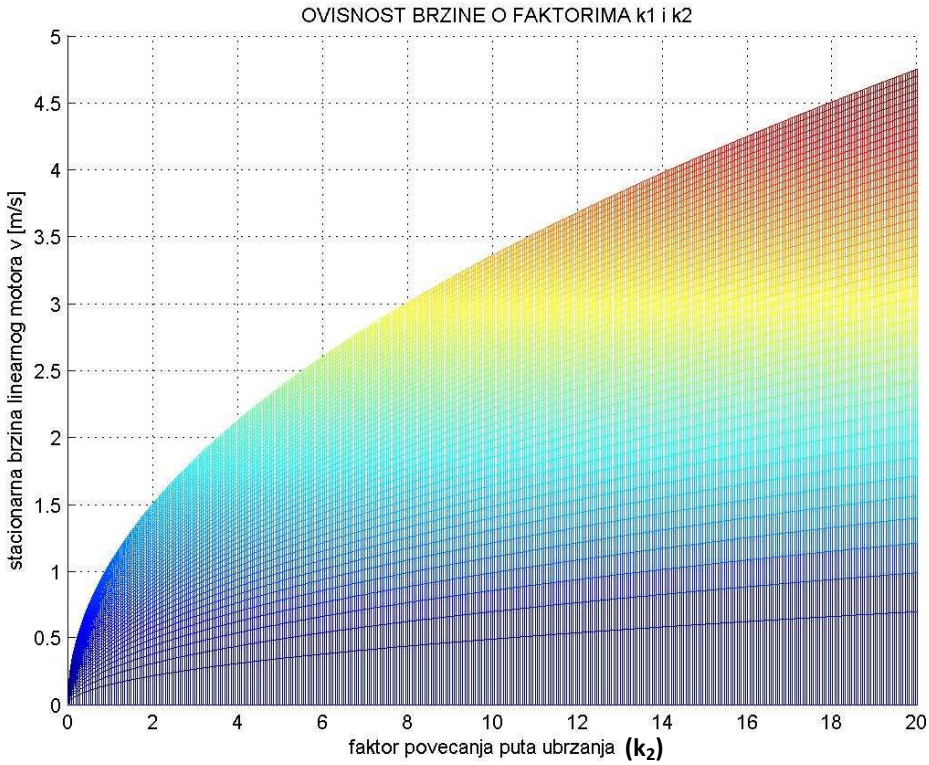
$$v_{jed} = \sqrt{2 \cdot 24.525 \cdot 0.01}$$

$$\boxed{v_{jed} = 0.7\ m/s}$$

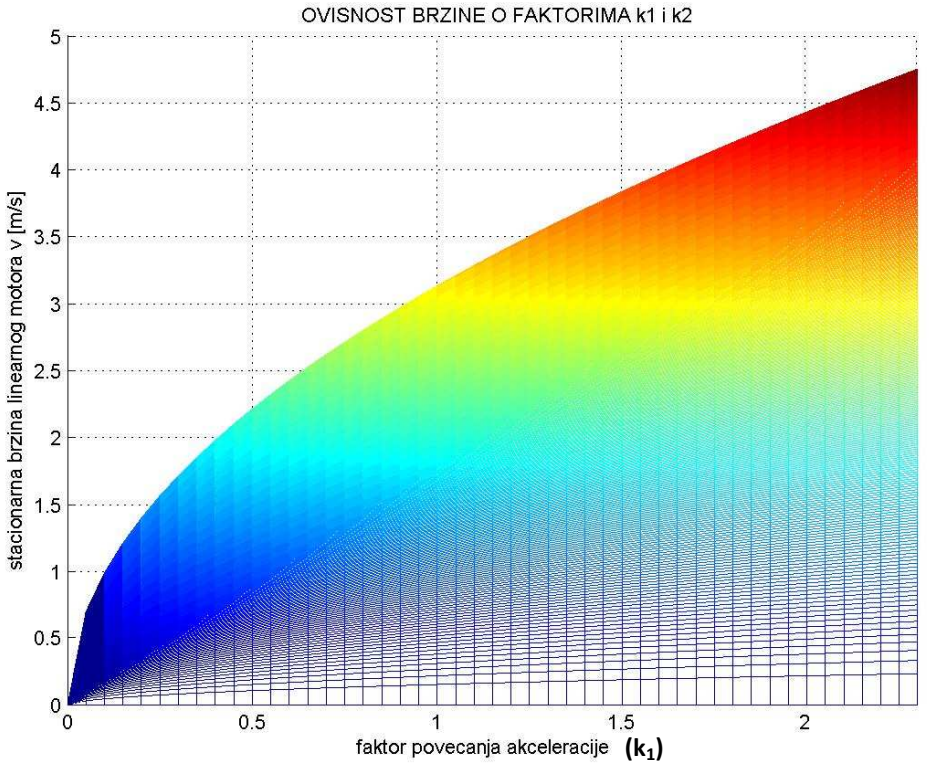
Faktor k_1 može biti najveći u iznosu **2.3** što je omjer preporučenog i maksimalnog ubrzanja motora. Faktor k_2 može ići do maksimalne vrijednosti **20** što je omjer polovice ukupno mogućeg puta u jednom smjeru (200 mm) i jediničnog puta ubrzanja (10 mm). **Dakle k_1 je omjer stvarne i jedinične akceleracije, a k_2 je omjer stvarnog i jediničnog puta ubrzanja**. Slika 6.1.10 prikazuje ovisnost brzine o faktorima k_1 i k_2.



Slika 6.1.10 *Ovisnost stacionarne brzine linearnog motora o faktorima k_1 i k_2*



Slika 6.1.11 *Ovisnost stacionarne brzine linearnog motora o faktoru puta ubrzanja* k_2



Slika 6.1.12 *Ovisnost stacionarne brzine linearnog motora o faktoru povećanja akceleracije* k_1

Plavo područje dijagrama je područje brzina motora gdje ne postoji veliko opterećenje motora. U crveno područje dijagrama se ne smije zalaziti jer se motor ovdje uz zadanu maksimalnu silu trenja pregrijava. Ako bi sila trenja bila manja od maksimalne, onda bi se smjelo ući u narančasta polja krivulje, no ne i u crvena. U žutom polju motor radi kada uz maksimalno opterećenje radi s maksimalnom brzinom **3.185 m/s**. Ako je akceleracija različita od retardacije onda se uzima srednja vrijednost od toga kao zamjenska akceleracija po kojoj se određuje faktor k_1.

Na isti ovakav način može se dobiti ovisnost stacionarnog puta gibanja motora o faktorima kod kojeg se pojavljuje još jedan faktor, a to je faktor dužine staze k_3. Faktor dužine staze je omjer između stvarne dužine staze i jedinične dužine staze. Kako je maksimalna dužina staze 400 mm, što je i maksimalni korak motora, a jedinična dužina staze s_{jed} = 100 mm, to znači da je maksimalni iznos ovog faktora **4**.

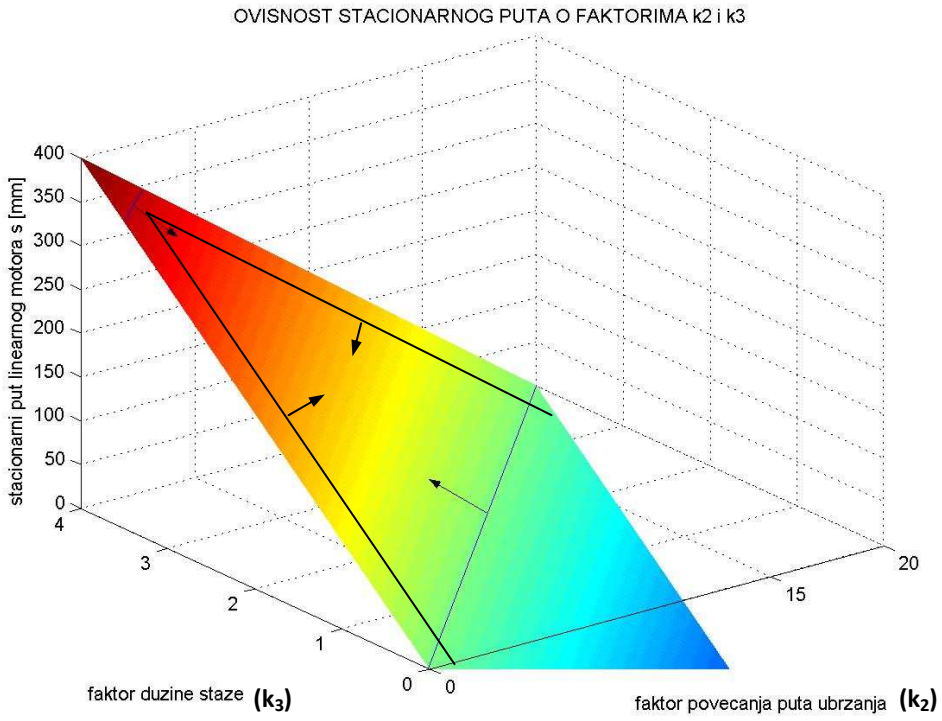
$\mathbf{k_3}$..... *faktor dužine staze*

$\mathbf{s_{stac}}$ ..... *stacionarni put linearnog motora*

$$s_{stac} = s_{jed} \cdot k_3 - 2 \cdot s_{jed,acc} \cdot k_2$$

$$s_{stac,jed} = 0.1 - 2 \cdot 0.01$$

$$\boxed{s_{stac,jed} = 80\ mm}$$ ..... *jedinični stacionarni put*



Slika 6.1.13 *Ovisnost stacionarne brzine linearnog motora o faktorima k_2 i k_3*

Na slici 6.1.13 je prikazan dijagram ovisnosti stacionarnog puta gibanja o **faktoru povećanja puta ubrzanja (k_2) i faktoru dužine staze (k_3)**. Rubni uvjeti gdje su faktori jednaki nuli se ne mogu ostvariti. Isto tako se ne mogu ostvariti plavo polje dijagrama koje prikazuje negativni stacionarni put. Isto tako se ne mogu dosegnuti maksimalne vrijednosti faktora k_3, što bi značilo da puta ubrzanja i usporavanja uopće nema, a on mora postojati. U dijagramu je zato omeđeno područje unutar kojeg postoji realan stacionarni put za realne faktore.

Ono što je još ovdje potrebno, to su vremena ubrzanja i stacionarni period. Stacionarni period je vrijeme konstantne brzine rada u kojemu nema akceleracije i retardacije. Ukupno vrijeme odvijanja procesa u jednom smjeru (poluciklus linearnog motora) sastoji se od stacionarnog perioda i od vremena akceleracije koje se udvostručuje kako postoji još i retardacija.

$$t_{uk} = 2 \cdot t_{acc} + t_{stac}$$

$$t_{acc} = \frac{2 \cdot v_{jed} \cdot \sqrt{k_1 \cdot k_2}}{a_{jed} \cdot k_1} = 0.057 \cdot \frac{\sqrt{k_1 \cdot k_2}}{k_1} \qquad [s]$$

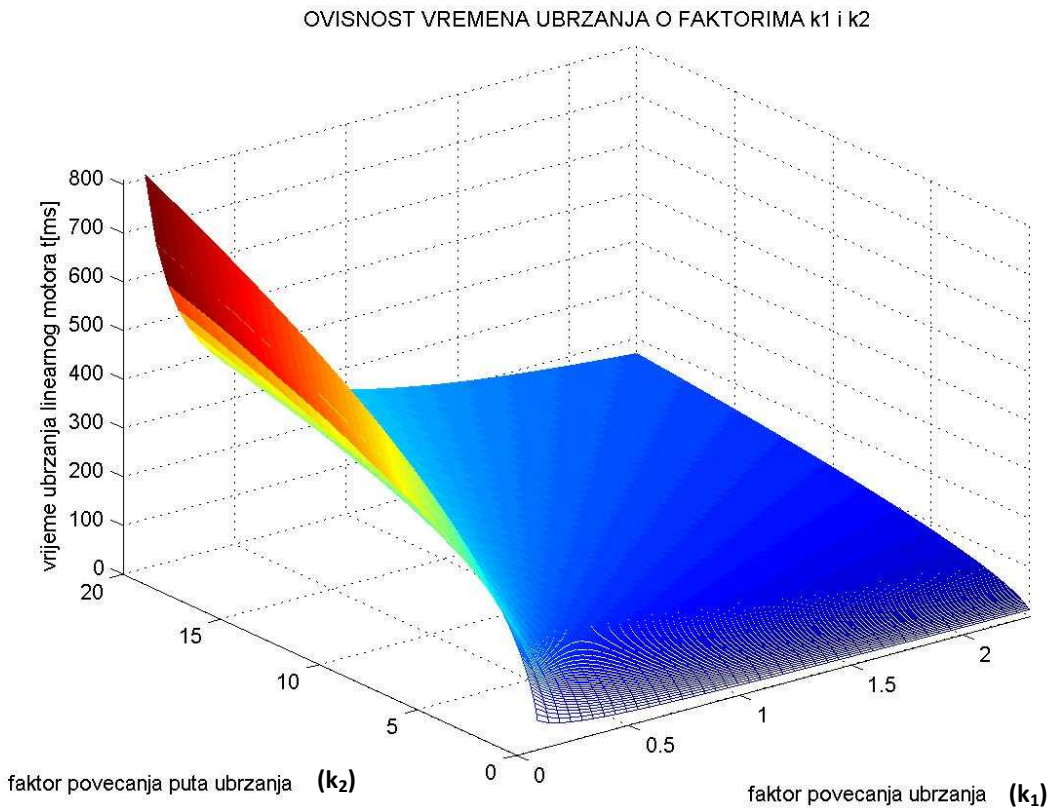
$$\boxed{t_{acc,jed} = 57\ ms}$$

$$t_{stac} = \frac{s_{jed} \cdot k_3 - 2 \cdot s_{jed,acc} \cdot k_2}{v_{jed} \cdot \sqrt{k_1 \cdot k_2}}$$

$$t_{stac} = 0.1429 \cdot \frac{k_3 \cdot \sqrt{k_1 \cdot k_2}}{k_1 \cdot k_2} - 0.02857 \cdot \frac{k_2 \cdot \sqrt{k_1 \cdot k_2}}{k_1 \cdot k_2} \qquad [s]$$

$$\boxed{t_{stac,jed} = 114.3\ ms}$$

Jedinične vrijednosti se dobiju kada su faktori jediničnog iznosa. Vrijeme ubrzanja po formuli ne ovisi o ukupnoj dužini puta kojeg ostvaruje motor, no o njemu je ovisan tako da ubrzanje ne može trajati na putu veće dužine nego što je staza dugačka, tj. neko duže vrijeme. Iz dijagrama 6.1.14 se točno vidi kako raste vrijeme ubrzanja ako se smanji akceleracija tj. faktor k_1, odnosno povećava put ubrzanja tj. faktor (k_2). Dijagramski prikaz ovisnosti stacionarnog vremena o faktorima k_1, k_2 i k_3 suviše je nepregledan da bih ga isticao grafički, ali se lako može izračunati pomoću zadane formule.

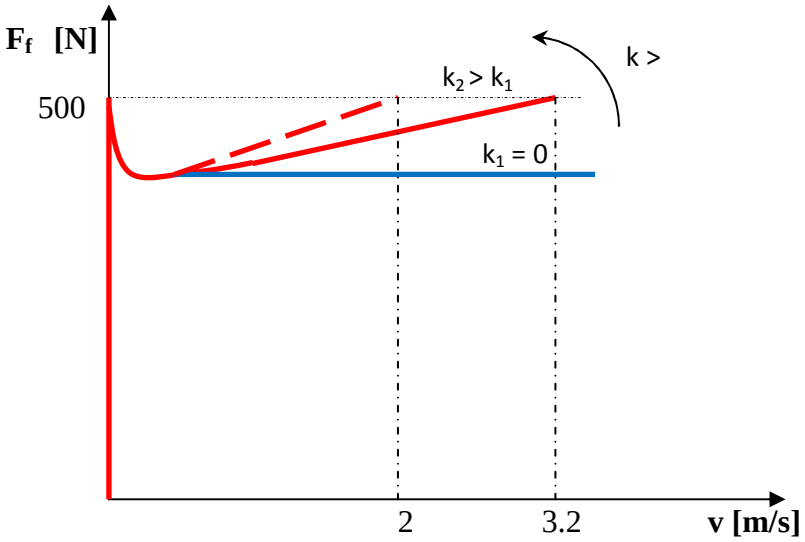


Slika 6.1.14 *Ovisnost vremena ubrzanja linearnog motora o faktorima k_1 i k_2*

Pomoću svih ovih dijagrama koji su dosad prikazani u ovome poglavlju mogu se lako odrediti određeni parametri za rad na linearnom modulu, kao i maksimalni dopušteni parametri. Sa rotacijskim diskom nema toliko poteškoća jer se on neopterećen ubrza na određenu brzinu i tek se tada optereti, tako da se tu ne pojavljuju uslijed rada stalne dilatacije uslijed ubrzanja i usporavanja, pa maksimalnu silu trenja na obodu treba promatrati prema već spomenutom dijagramu na slici 4.2.2. U ovome poglavlju rećeno je da je normalna sila na uzorak konstantne vrijednosti. Sila trenja, iako direktno ovisna o normalnoj sili, neće biti konstantna i ovisit će o vrsti trenja kojom su izložene dvije površine. Spomenuto je na početku u uvodu i prikazano na slikama 1.1.2 koje su vrste trenja. Dakle može biti suho trenje gdje dvije krute površine trljaju jedna o drugu, može biti polusuho trenje gdje postoji podmazivanje, ali kontakt krutih površina još uvijek postoji, te viskozno trenje, a to je trenje između slojeva tekučina. Viskozno trenje je specifično po tome što je ovisno o brzini ako se radi o malim brzinama, a ako su to velike brzine iznad 10 m/s (ovisno o tekučini), sila trenja je ovisna o kvadratu brzine.

Na tribometru je potrebno da sila trenja ne premaši vrijednost **500 N** u toku rada kako se ne bi senzori stroja doveli u rizičnu poziciju.

Ako stroj kratkotrajno premaši taj iznos neće biti problema ako taj kratkotrajan impuls nije puno veći od spomenutog iznosa, no ako se radi o impulsnom udaru senzori zasigurno neće izdržati takav udarac te više neće nakon toga moći mjeriti unutar predviđene točnosti.



Slika 6.1.15 *Ovisnost sile trenja o relativnoj brzini – dopušteni limiti na linearnom modulu*

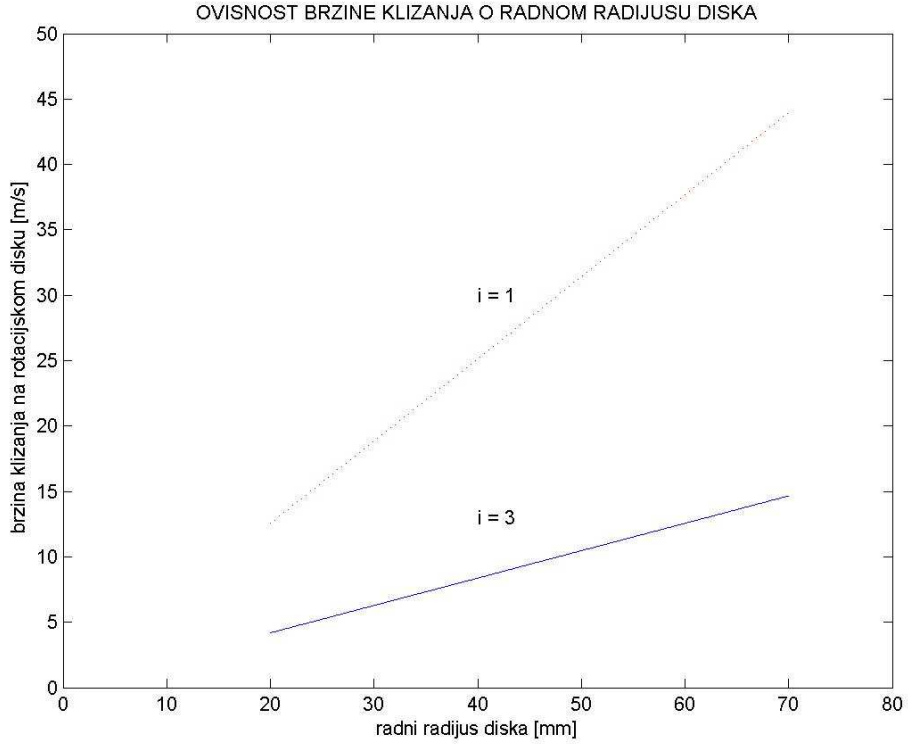
Kako prikazuje slika 6.1.15 viskozno trenje raste sa brzinom $\boldsymbol{F_{f,visk} = kv}$, gdje je k tangens kuta između apcise i pravca porasta sile trenja u području njegovog porasta. Sila trenja ne smije ni za jednu brzinu premašiti iznos od **500 N**, gdje su na dijagramu prikazane približne vrijednosti maksimalne klizne brzine za linearni motor i brzine kod maksimalne sile linearnog motora.

Za rotacijski disk brzine klizanja mogu ići do iznosa koji je prikazan na slici 6.1.16, ali i tamo sila trenja ne smije biti veća od 500 N. Kako brzina klizanja osim o radijusu ovisi o učestalosti vrtnje diska tako za dva diobena omjera koji se ovdje upotrebljavaju postoje dvije linije brzina klizanja. Ove brzine vrijede kod ovih radijusa ako se motor vrti konstantnom brzinom od **6000 o/min**. Ako li se smanji učestalost vrtnje motora, onda će brzina klizanja biti manja.

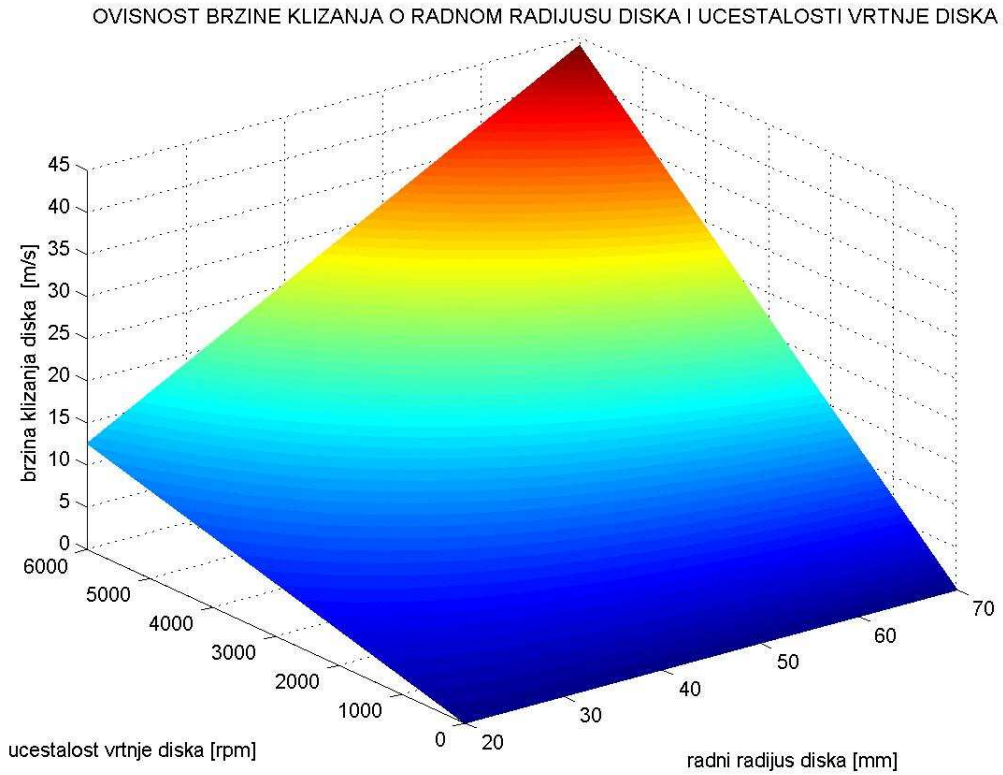
Slika 6.1.17 prikazuje upravo tu ovisnost učestalosti vrtnje, radnog radijusa i brzine klizanja diska. Kod visokih brzina treba paziti da se ne premaši snaga koju frekvencijski pretvarač može prenijeti, a to je **5 kW**. Formula za brzinu klizanja diska izgleda ovako:

$$\boxed{v_{d,kliz} = \frac{\pi}{30000} \cdot n \cdot r}$$

$\boldsymbol{v}_{d,kliz}$ ..... *brzina klizanja diska*
$\boldsymbol{n}$..... *učestalost vrtnje diska*
$\boldsymbol{r}$..... *radni radijus diska*



Slika 6.1.16 *Ovisnost brzine klizanja rotacijskog diska o radnom radijusu diska*



Slika 6.1.17 *Ovisnost brzine klizanja rotacijskog diska o radnom radijusu i učestalosti vrtnje diska*

6.2 KARAKTERISTIKE PARAMETARA UZ TEMPERATURNU DINAMIKU I UTJECAJ DEFORMACIJE UZORAKA

U prvom dijelu ovog poglavlja temperatura se smatrala konstantna pa se njen utjecaj na proces ispitivanja nije uzimao u obzir. Kod stvarnog procesa ispitivanja dviju tarnih površina dolazi do oslobađanja topline i ako se ta toplina ne odnosi iz sustava hlađenjem, tada će temperatura uzoraka rasti skupa sa temperaturom maziva, ako mazivo između dodirnih površina postoji.

Porast temperature donosi porast dimenzija uzoraka s jedne strane i promjenu faktora trenja s druge strane. Ako se normalna sila ne bi mogla automatski regulirati, tada bi položaj modula senzorske glave stalno bio tokom rada u istom položaju. Ako li se mijenja temperatura uzoraka koji se međusobno trljaju, s vremenom se radi povišenja temperature povećavaju dimenzije uzoraka. Radi te deformacije koja se trebala dogoditi, a nije radi početne normalne sile na uzorak, normalna sila na uzorak će se povećati. Povećanje normalne sile ovisno je o deformaciji na slijedeći način:

$$\boxed{\Delta F_{N,T} = \frac{\Delta l \cdot A \cdot E}{l}}$$

Gdje su: $\Delta F_{N,T}$..... *povećanje normalne sile pritiska uzrokovano temperaturnom deformacijom* ***[N]***

Δl..... *povećanje dimenzije uzorka u smjeru sile pritiska* ***[mm]***

l..... *dužina uzorka u smjerusile pritiska* ***[mm] (b = l)***

A..... *površina okomita sili djelovanja* ***[mm^2]***

E..... *Young-ov modul elastičnosti* ***[N/mm^2]***

Kako postoji uvijek par uzoraka tako na svakom uzorku postoji povećanje normalne sile.

$$\Delta F_{N,T1} = \frac{\Delta l_1 \cdot A_1 \cdot E_1}{l_1} \quad ; \quad \Delta F_{N,T2} = \frac{\Delta l_2 \cdot A_2 \cdot E_2}{l_2}$$

Temperaturno povećanje dimenzije iznosi:

$$\boxed{\Delta l = l \cdot \alpha \cdot \Delta T}$$

α..... *koeficijent linearnog temperaturnog produljenja materijala* ***[1/K]***

ΔT..... *temperaturni prirast* ***[K]***

Svaki od uzoraka ima svoje produljenje:

$$\Delta l_1 = l_1 \cdot \alpha_1 \cdot \Delta T \quad ; \quad \Delta l_2 = l_2 \cdot \alpha_2 \cdot \Delta T$$

Prirast normalne sile na kraju iznosi:

$$\Delta F_{N,T1} = A_1 \cdot E_1 \cdot \alpha_1 \cdot \Delta T \quad ; \quad \Delta F_{N,T2} = A_2 \cdot E_2 \cdot \alpha_2 \cdot \Delta T$$

Kako je sve konstantna veličina osim prirasta temperature tako se umnožak može smatrati jednom konstantom:

$$K_{T1} = A_1 \cdot E_1 \cdot \alpha_1 \quad ; \quad K_{T2} = A_2 \cdot E_2 \cdot \alpha_2$$

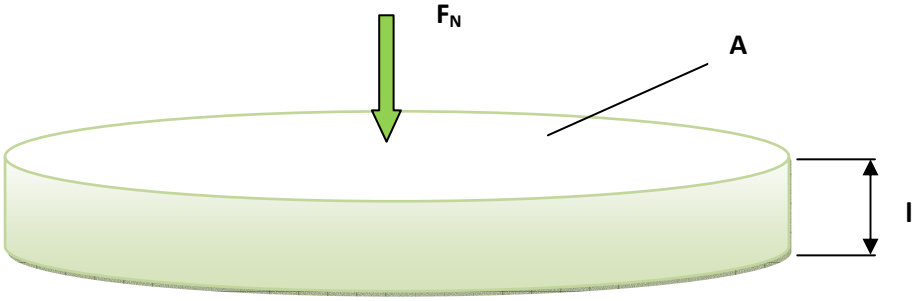
$$\Delta F_{N,T1} = K_{T1} \cdot \Delta T \quad ; \quad \Delta F_{N,T2} = K_{T2} \cdot \Delta T$$

Iz formule je vidljiva linearna ovisnost prirasta sile sa prirastom temperature za slučaj da se prilikom ispitivanja ništa ne mijenja. Ako se uključi regulacija normalne sile senzori će registrirati povećanjem sile te će se senzorska glava povlačiti vertikalno prema gore kako bi smanjila silu, tj. održala je kakva je bila. Ukupni prirast normalne sile je zbroj pojedinačnih prirasta:

$$\Delta F_{N,T} = \Delta F_{N,T1} + \Delta F_{N,T2} = (K_{T1} + K_{T1}) \cdot \Delta T$$

Kako postoji mjerenje normalne sile na tribometru kao i temperature, postoji mogućnost mjerenja linearnih temperaturnih faktora (***α***) za materijale za koje su oni nepoznati. Sama točnost ne bi mogla biti velika jer je ovdje uključen modul elastičnosti koji zajedno sa temperaturnim faktorom čini mjernu konstantu, pa se mora uzeti neka fiksna vrijednost tog modula iako je poznato da svaki materijal ima svoj modul elastičnosti, iako podjednak za istu vrstu materijala, ali opet različit, tj. ovisan o kemijskom sastavu i strukturi materijala.

Budući da nije podobno da se tokom rada mijenja normalna sila uslijed promjene temperature, postoji regulacija normalne sile koja će taj učinak spriječiti i držati normalnu silu tokom rada konstantnom.



Slika 6.2.1 *Prikaz uzorka sa dimenzijama*

Prirast temperature još utječe na faktor trenja. Povećanjem temperature dolazi do zagrijavanja površinskih slojeva materijala pri čemu dolazi često do otapljanja i zaglađivanja površinskih neravnina što utječe često na smanjenje faktora trenja. Ovisno o materijalu može doći i do povišenja faktora trenja i to na način da usred naglog hlađenja rastaljenih vrhova neravnina dolazi do zakaljenja i do pojave tvrdih čestica na površini koje sprečavaju gibanje pa faktor trenja time bude veći.

Uslijed ispitivanja dolazi do trošenja površine. Kako se površina troši dolazi do smanjenja normalne sile pritiska linearno sa debljinom odnešenog materijala.

$$-\Delta F_{N,troš} = K_{troš} \cdot \Delta l_{om}$$

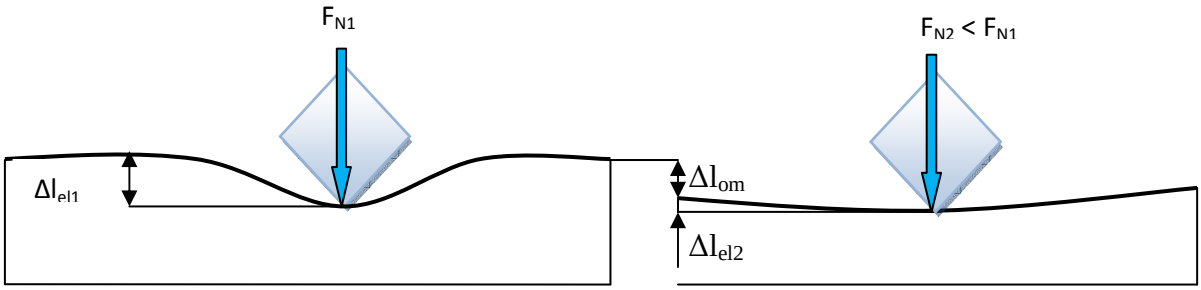
Gdje je:

- $\mathbf{\Delta F}_{N,troš}$..... *smanjenje normalne sile pritiska radi trošenja površine*

$\mathbf{K}_{troš}$..... *konstanta trošenja*

$\mathbf{\Delta l}_{om}$ ..... *debljina odnešenog materijala*

Kako je normalna sila zasnovana na određenoj elastičnoj deformaciji uzoraka tako kada dolazi do odnošenja materijala koji je uvjetovao tu silu dolazi do smanjenja sile.



Slika 6.2.2 *Smanjenje normalne sile usred odnošenja materijala*

$$K_{troš} = \frac{A \cdot E}{l}$$

Trošenje i temperaturna dinamika su vanjski poremećaji koji stalno mijenjaju normalnu silu i bez regulacije ne bi se mogla uspostaviti konstantna normalna sila.

Kako će se normalna sila mijenjati tokom rada zabilježit će se na računalu tokom ispitivanja. Ono što još mogu reći da postoji zasigurno još nepoznatih stvari koje utjeću na normalnu silu tokom rada koji se sada bez praćenja procesa ne mogu predvidjeti. Konačna formula za normalnu silu glasi:

$$\boxed{F_{N2} = F_{N1} + \Delta F_{N,T} - \Delta F_{N,troš} + \Delta F_{N,nep}}$$

Gdje je $\Delta F_{N,nep}$ prirast ili pad vrijednosti normalne sile usred djelovanja nepoznatog čindbenika.

Nepoznati čindbenik se nagađa, on može postojati, ali i ne mora. Stvarni proces se ne može predvidjeti pa se zato i izradio stroj koji će takav proces moći ispitati i pratiti, te kontinuirano bilježiti podatke na računalu. Radi komplikacije sa normalnom silom, sila trenja će biti još frekventnija u smislu da se mijenja faktor trenja svakog trenutka ispitivanja. Tako će se sila trenja mijenjati na slijedeći način ako nije ovisna o brzini:

$$\boxed{dF_f = \mu \cdot dF_N + d\mu \cdot F_N}$$

Ako postoji ovisnost sile trenja o brzini, tj. ako postoji viskozno trenje stvari se još dodatno kompliciraju uvođenjem brzine $\boldsymbol{v}$:

$$\boxed{dF_f = \mu \cdot v \cdot dF_N + v \cdot F_N \cdot d\mu + \mu \cdot F_N \cdot dv}$$

Točno djelovanje sile trenja najbolje će opisati sam proces ispitivanja gdje će se na temelju rezultata napraviti detaljna analiza kako koji parametar djeluje u kojemu trenutku na nju.

Dalo bi se govoriti još puno toga o ovim parametrima, no puno je vrijednije analizirati realan snimak događaja iz kojeg se vidi kakav je stvaran utjecaj na trenje. U ovome poglavlju dao se dobar temelj kako bi se lakše ušlo u analizu takvog realnog snimka nekog trenja između dva para materijala.

7. MOGUĆNOSTI ISPITIVANJA NA TRIBOMETRU

U ovome će poglavlju biti opisane neke od mogućnosti ispitivanja na tribometru. Tu su ispitivanja trošenja alata kod obrade odvajanja čestica, ispitivanja sila rezanja kod iste obrade, ispitivanja sile trenja kod različitih tarnih parova, te druga ispitivanja koja nisu striktno povezana s trenjem kao što su ispitivanja opruga, ispitivanja tvrdoće materijala i slična ispitivanja. Kako je tribometar modularno građen, tako ima velik spektar mogućnosti, ne samo ispitivanja, već i ostvarivanje pojedinih tehnologija.

Stroj je zamišljen u prvom redu za ispitivanje trenja na kliznim parovima i za ispitivanje trošenja kod obrada odvajanja čestica. To su onovna ispitivanja koja se izvode na ovom stroju. Kako bi se stroj bolje iskoristio jer su mu mogućnosti gibanja triju osi velike, određenim se napravama na stroju te zamjenama modula može stroj pretvoriti da npr. ispituje krutost i čvrstoću opruga, da provodi raznorazna ispitivanja zavarenih spojeva usred određenih uvijeta i sl. Dakle stroj je veoma fleksibilan i puno se toga na njemu može raditi i ispitivati, a ovdje ću spomenuti samo neke stvari koje se češće ispituju i koje će biti stalno ispitivane na ovome stroju.

7.1 MJERENJE SILE TRENJA KOD TARNIH PAROVA

Ispitivanje trenja tarnih parova primarni je posao ovoga stroja. Postoji puno metoda za ispitivanje koje su već spomenute, a ovdje će biti dvije malo bolje prikazane i to **metoda klin na ploči** *(pin on plate)* koja se vrši pomoću linearnog modula i **metoda klin na disku** *(pin on disc)* koja se vrši pomoću rotacijskog diska. U uvodu se ovo nije spominjalo, ali veoma je bitno znati da postoje standardi ispitivanja trenja za pojedine materijale i metode ispitivanja. Ti standardi određuju točno kako se što ispituje i na koji način. Neki od važnijih standarda ispitivanja će se upotrebljavati na ovome tribometru pa će biti navedeni i opisani.

ASTM D 5706 Standard definira metodu ispitivanja ponašanja ulja i pasti za podmazivanje u uvjetima vrlo visokih tlakova korištenjem linearnog oscilatornog gibanja visoke frekvencije.

ASTM D 5707 Standard definira metodu ispitivanja faktora trenja paste za podmazivanje i mogućnosti zaštite od trošenja u uvjetima linearnog oscilatornog gibanja visoke frekvencije pri opterećenju od 200 N, frekvenciji 50 Hz, amplitudi udara (zamaha) od 1 mm i trajanju ispitivanja od 2 h na temperaturi od 280 °C. Mogu se koristiti i druge vrijednosti ovih parametara no tada se to mora obavezno navesti.

ASTM F 732 Standard daje upute za metodu ispitivanja trošenja polimernih materijala korištenih za izradu kontaktnih površina na protezama. Cilj metode je rangirati materijale za svaki slučaj trenja s obzirom na brzinu trošenja u simuliranim uvjetima. No, potrebno je obratiti pažnju na to da ova metoda pojednostavljuje stvarne slučajeve trenja te stoga može služiti samo za inicijalni odabir materijala.

ASTM G 77 Standard definira metodu ispitivanja otpornosti materijala prema kliznom trošenju u slučaju bloka na prstenu (Block on Ring). Prednost ove metode je u tome što se može ispitati bilo koji materijal koji se može izraditi u obliku bloka. Pri ispitivanju mogu se koristiti razna sredstva za podmazivanje i mijenjati parametri ispitivanja.

ASTM G 99 Standard definira metodu ispitivanja trošenja za slučaj klina na disku (Pin on Disk). Materijali se testiraju u parovima pod neabrazivnim uvjetima.

ASTM G 133 Standard definira metodu za ispitivanje kliznog trošenja keramike, metala i ostalih materijala otpornih trošenju koristeći metodu kuglice na ravnoj površini. Pri ispitivanju kuglica se kreće linearno po površini ispitivanog materijala naprijed – natrag. Mjerodavan parametar trošenja je gubitak volumena kuglice i ravne površine. Metoda se može provoditi u uvjetima sa i bez prisutnosti medija za podmazivanje.

ASTM G 181 Standard definira metodu ispitivanja trenja materijala, prevlaka i metode površinske zaštite pri proizvodnji dijelova za klipove i cilindre motora s unutrašnjim izgaranjem. Metodom se simuliraju uvjeti pri kontaktu između klipa i cilindra u trenutku kad se klip nalazi u gornjoj mrtvoj točki kad je podmazivanje najmanje djelotvorno i nastupa najveće trošenje.

DIN 51834 – 1 Standard definira metode ispitivanja lubrikanata mjereći trošenje pri translatornom oscilatornom gibanju ispitivanih materijala.

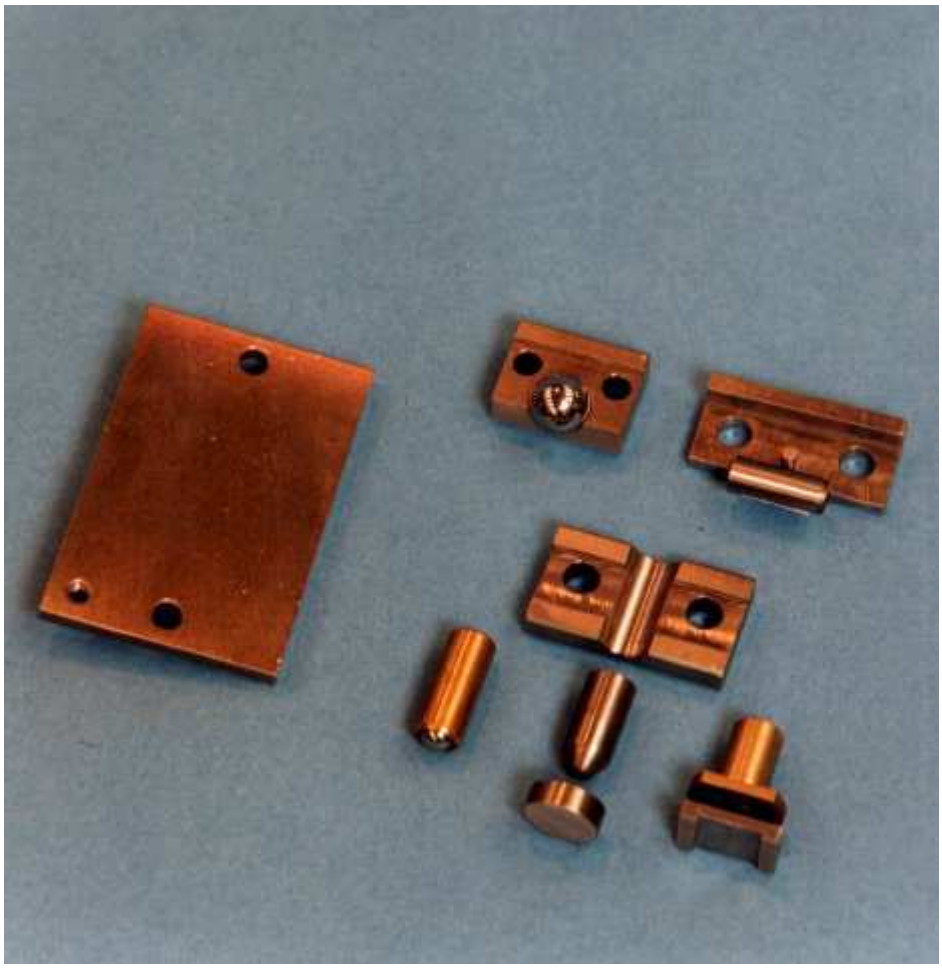
ISO 12156 - 2:2007 Standard definira minimalne zahtjeve za dizelsko gorivo s obzirom na njegovu podmazivost.

ISO 20808:2004 Standard definira metodu za ispitivanje faktora trenja i specifičnog trošenja monolitne keramike koristeći kuglicu na disku u neabrazivnim uvjetima bez prisutnosti medija za podmazivanje.

Ovime se dobiva dobar uvid u ono što se sve ispituje, no za mnoge stvari će se trebati još definirati standardi ispitivanja ukoliko još ne postoje kako bi ispitivanje bilo istoznačno ma gdje da se ispituje i na kojem stroju.

Za ispitivanje se koriste uzorci za koje ne postoji definirani standard, ali ti uzorci moraju biti fino obrađenih površina. Uzorak dakle može biti bilo kakav materijal odvojen od šarže te obrađen kako bi se mogao postaviti na hvataljku stroja. Za određene stvari veoma je bitno ispitati par takvih uzoraka kako bi se sa sigurnošću moglo potvrditi kako se on ponaša u zadanim uvjetima.

Svaki uzorak bi trebao imati svoj nosač kako bi se momoću njega učvrstio u čeljusti glave okomitog modula. Stvarni izgled takvih uzoraka prikazuje slika 7.1.1:



Slika 7.1.1 *Prikaz uzoraka za ispitivanje trenja i trošenja sa pripadnim nosačima*

Uzorci mogu biti raznih veličina, a najčešće su to uzorci reda veličine **1 – 2 cm**. Dakako uzorci mogu biti i puno veći, ovisno o tome što se točno želi ispitati. Na slici 7.1.1 lijepo se vide uzorci u obliku klina, kuglice diska i bloka.

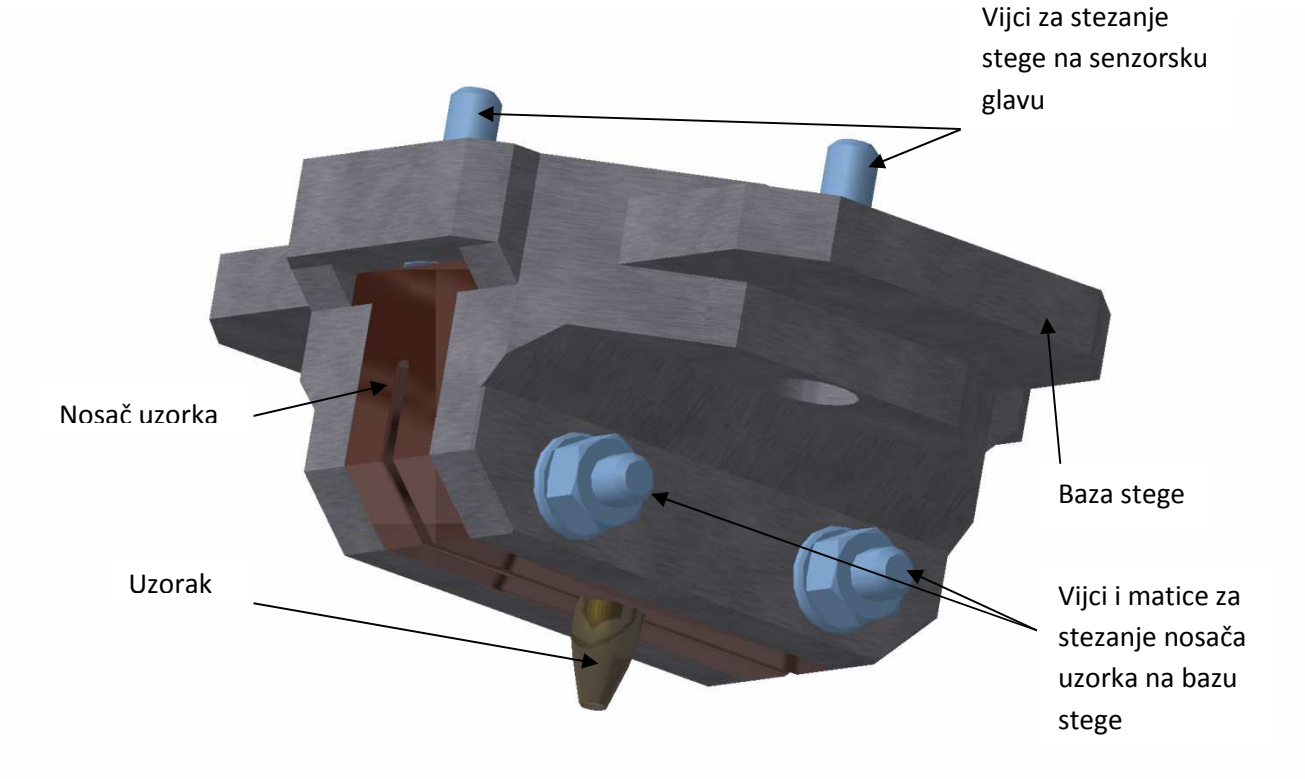
Čeljusti za stezanje nosača uzoraka, kao i samih uzoraka mogu biti različite. Mogu se koristiti standardne glave za stezanje alata ili obradaka kod obrade odvajanja čestica kao što je npr. **amerikaner** kod tokarilice ili stezanje pomoću konusa kao kod bušilice i glodalice. Osim takvih steznih naprava mogu se izraditi posebne stezne naprave koje će učvršćivati uzorke sa pripadnim nosačima. Sve te stezne čeljusti mogu se podijeliti u više skupina:

1. **<u>S obzirom na način stezanja</u>**
   a.) Manuelne (ručno stezanje)
   b.) Automatske (strojno stezanje)

2. **<u>S obzirom na vrstu pogona stezanja</u>**
   a.) Mehaničke
   b.) Elektromehaničke
   c.) Hidrauličke
   d.) Pneumatske

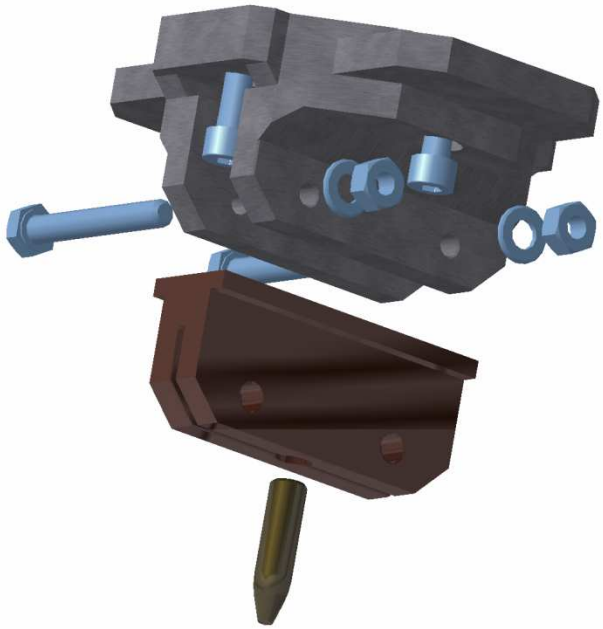
3. **<u>S obzirom na postojanje na tržištu</u>**
   a.) Standardne
   b.) Nestandardne

Mehaničke stege su najjeftinije i najobičnije te se mogu brzo i kvalitetno izraditi bez puno truda. Za hidraulične i pneumatske stege potrebno je imati pneumatski i hidraulički sustav koji treba naknadno konstruirati i nabaviti što donosi nove troškove i komplikacije. Za ovaj tribometar neće se koristiti ni jedan od ovih dva sustava već jedino mehanički i elektromehanički koji se za razliku od klasičnog mehaničkog steže pomoću motora koji se prigradi takvoj stegi. Način na koji se još uzorci mogu stegnuti na stroj jesu da se pomoću vijaka stegnu jedan na stol, a drugi na senzorsku glavu. Nedostatak je ovoga što tada uzorci moraju biti puno veći i bolje izrađeni. Jedna jednostavna mehanička stega koja se može koristiti na ovome tribometru prikazana je na slici 7.1.2:



Slika 7.1.2 *Prikaz mehaničke stege sa nosačem i uzorkom u obliku klina*

Ovakva se stezna glava pomoću **4 vijaka M8** stegne direktno na senzorsku glavu. Nakon toga se nosač uzorka sa uzorkom može staviti unutar baze stege i pričvrstiti matičnim vijcima kako bi se uzorak stegnuo unutar nosača. Za ovu stegu nosač uzorka mora biti izmodeliran tako da fino sjedne unutar baze stege jer je upravo on nosioc dobrog uležištenja uzorka u stegu. Slika 7.1.3 prikazuje način slaganja takve stege.

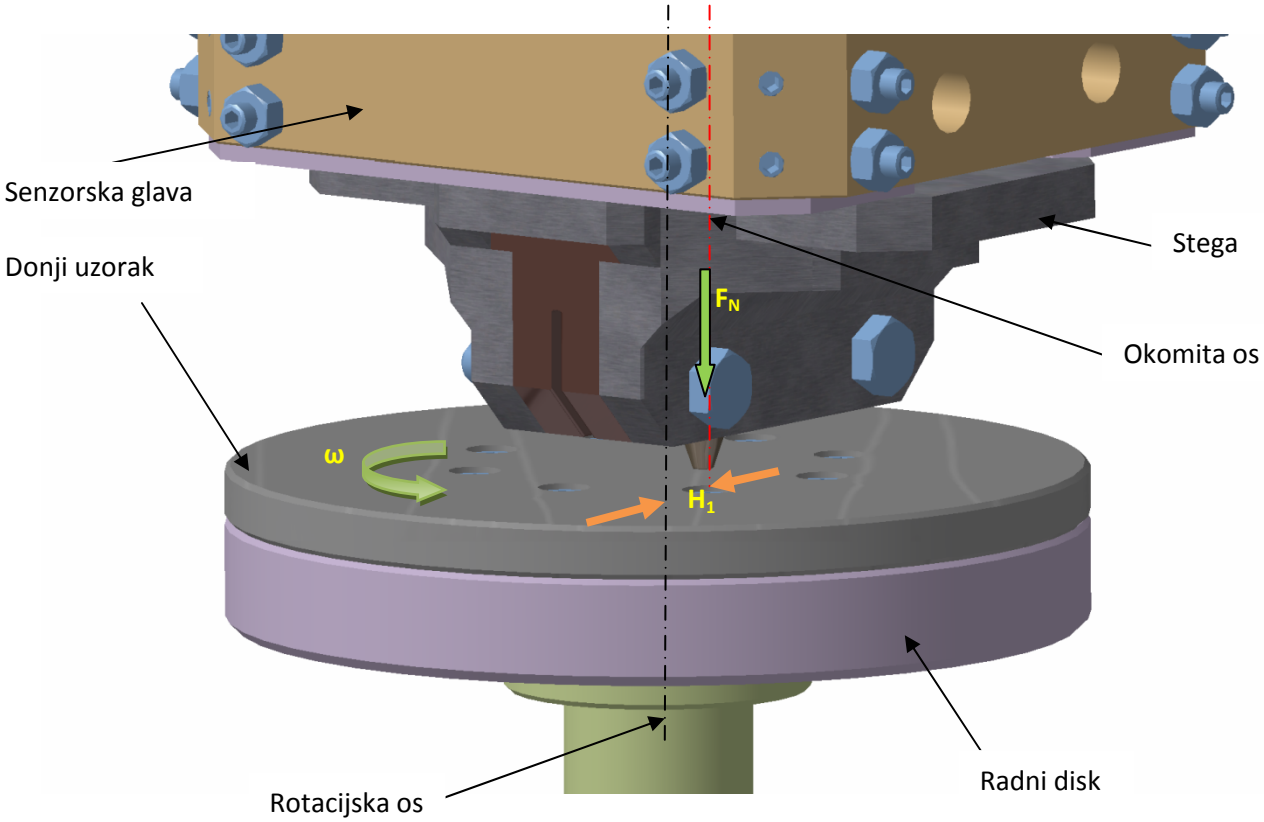


Slika 7.1.3 *Mehanička stega sa nosačem i uzorkom u obliku klina u rastavljenom stanju*

Nakon što se ovakva stega stavi na senzorsku glavu i ako je stroj instaliran može se krenuti u ispitivanje. Žele li se ispitati ležajna svojstva neke bronce možemo primijeniti metodu klin na disku po standardu **ASTM G99** koji je spomenut u gore navedenom tekstu. Uzorak i njegov nosač se izrade prema slici 7.1.3 te se postave na steznu napravu. Donji se uzorak napravi u obliku diska sa dimenzijama **fi 160 x 10** sa rupama kako bi se pričvrstio pomoću **8 komada M8 vijaka** na sam radni disk modula rotacijskog diska. Materijali uzoraka su materijali koji su u stvarnom procesu spareni npr. materijal čahure kliznog ležaja i materijal rukavca.

Kada se uzorci pričvrste, okomiti se modul približi po okomitoj osi tako da prvo takne površinu donjeg uzorka pomoću klina. Nakon toga se odredi radni radijus na kojemu će se ispitivati na način pomaka okomitog modula prema ili od centra rotacijske osi. Kada je još iznos normalne sile nula uključi se motor rotacijskog diska tako da postigne svoju brzinu bez opterećenja. Kada je motor u stacionarnom stanju može se početi sa povećanjem normalne sile. Ona se podešava po nekom programu ili direktno na računalu, te se prate ostali parametri tokom procesa rada, a posebno sila trenja.

Program može uključivati različitu normalnu silu u vremenu, ali važno je da se pazi da ta sila ne prijeđe maksimalni iznos koji je određen pomoću dijagrama na slici 4.2.2 (strana 67, poglavlje 4). Prikaz samog procesa ispitivanja prikazuje slika 7.1.4:



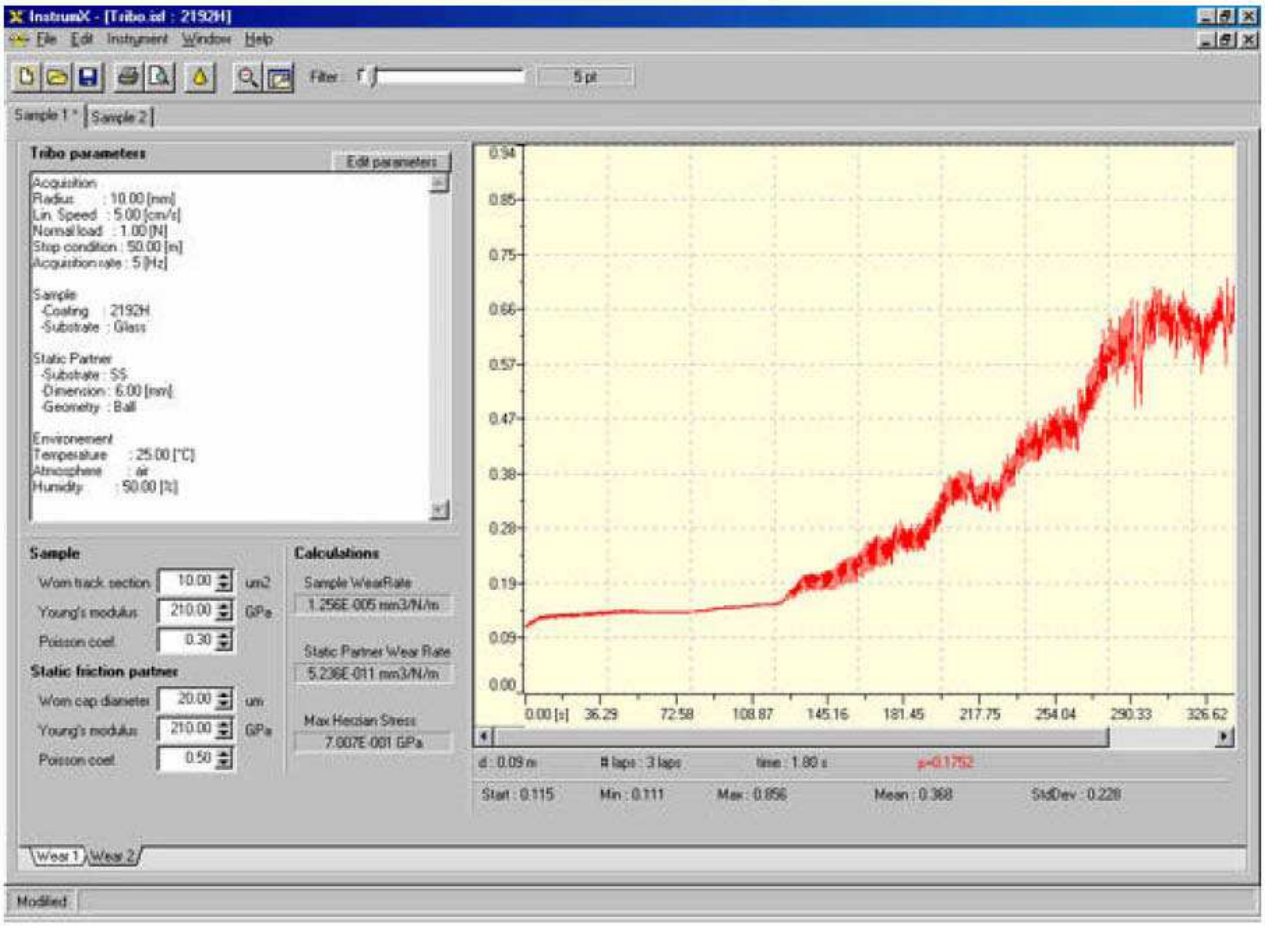
Slika 7.1.4 *Prikaz stvarnog rada na rotacijskom disku metodom* ***pin on disk***

Oznake na slici 7.1.4 jesu: $\mathbf{F_N}$ ..... *normalna sila na površinu, N*

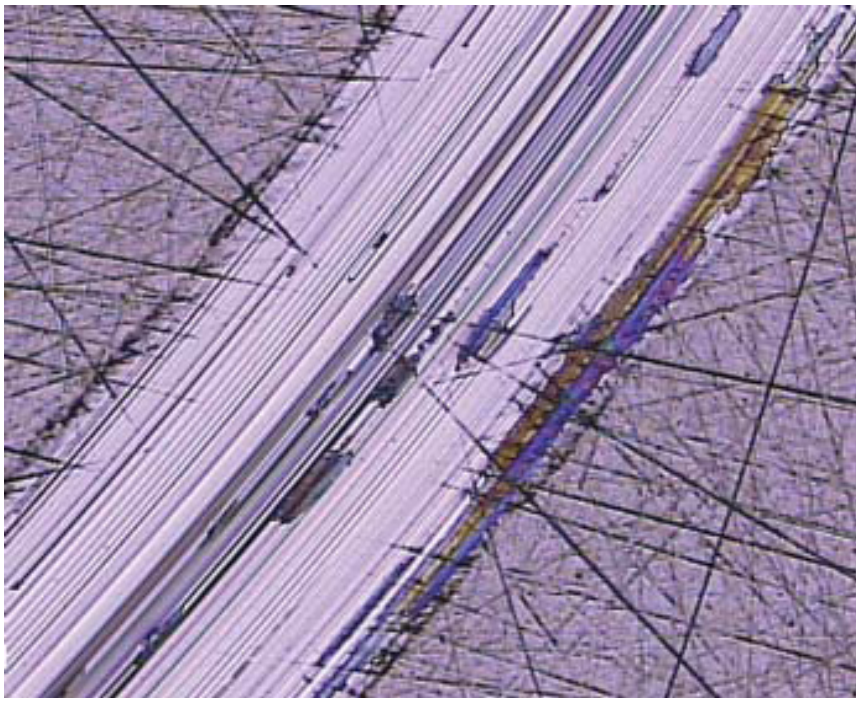
$\mathbf{H_1}$ ..... *osni razmak između rotacijske i okomite osi, mm*

ω..... *kutna brzina,* s^{-1}

Sila trenja , kao i ostali parametri ispitivanja koji se prate mogu se dijagramski iscrtavati na računalu i može se tokom iscrtavanja u pojedinim trenucima slikati stvarni proces te kasnije na temelju slike odrediti što kako djeluje na promatranu veličinu. Slika 7.1.5 tako prikazuje kako se na računalu može vidjeti ovisnost primjerice sile trenja ili normalne sile o vremenu. Ono što je prikazano grafički vidi se kako vibracije djeluju na osjetljivost sustava. Stvarna ovisnost se dobije kao srednja vrijednost koja prolazi kroz sredinu amplitudnog područja. Zanimljivo je da se ostale veličine koje nisu tako zanimljive prikazuju unutar posebnog prozora gdje su navedeni ostali parametri i njihov trenutni iznos. Na takav se način dobiva uvid u sam događaj i može se iz procesa ispitivanja vidjeti gotovo sve u svakom trenutku.



Slika 7.1.5 *Prikaz programskog praćenja zbivanja procesa na računalu*

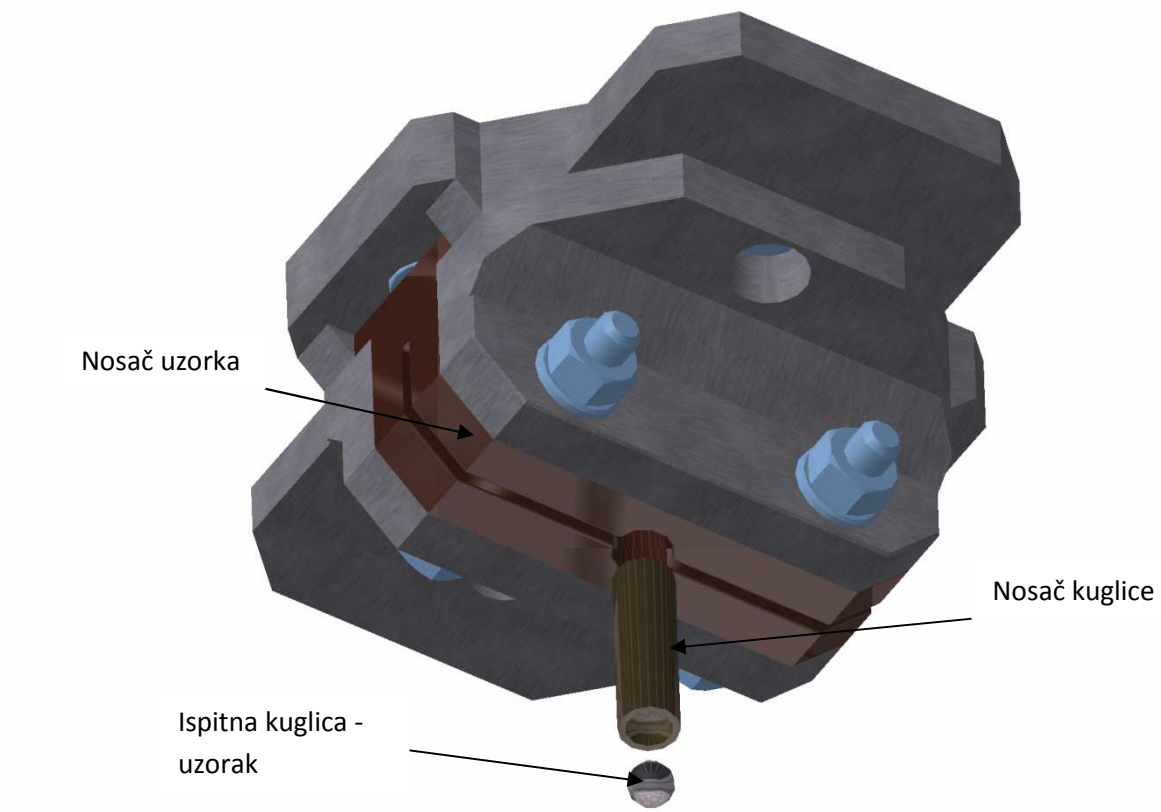


Slika 7.1.6 *Mikroskopski prikaz površine uzorka nakon ispitivanja*

Nakon ispitivanja ovakvih uzoraka ispitana se površina može ispitati mikroskopom. Jedna takva površina nakon djelovanja procesa izgleda kako prikazuje slika 7.1.6. Postoji dakle poput ceste trag na uzorku i taj se trag može preko mikroskopa dalje analizirati. Zanimljivo bi bilo kada bi se pored senzorske glave postavio mikroskopski modul koji bi odmah nakon procesa djelovanja bez skidanja uzorka sa stroja mogao snimiti trag uzorka. Ovisno o normalnoj sili, materijalu obaju uzorka, abrazivu (ako se koristi), te režimima rada, ovisit će izgled površine traga djelovanja uzoraka. Dakle sustav ovoga stroja bilježi i prati proces u toku djelovanja, a ima mogućnost da mu se prigradi modul kako je rečeno koji bi mikroskopski analizirao ovaj proces nakon djelovanja.

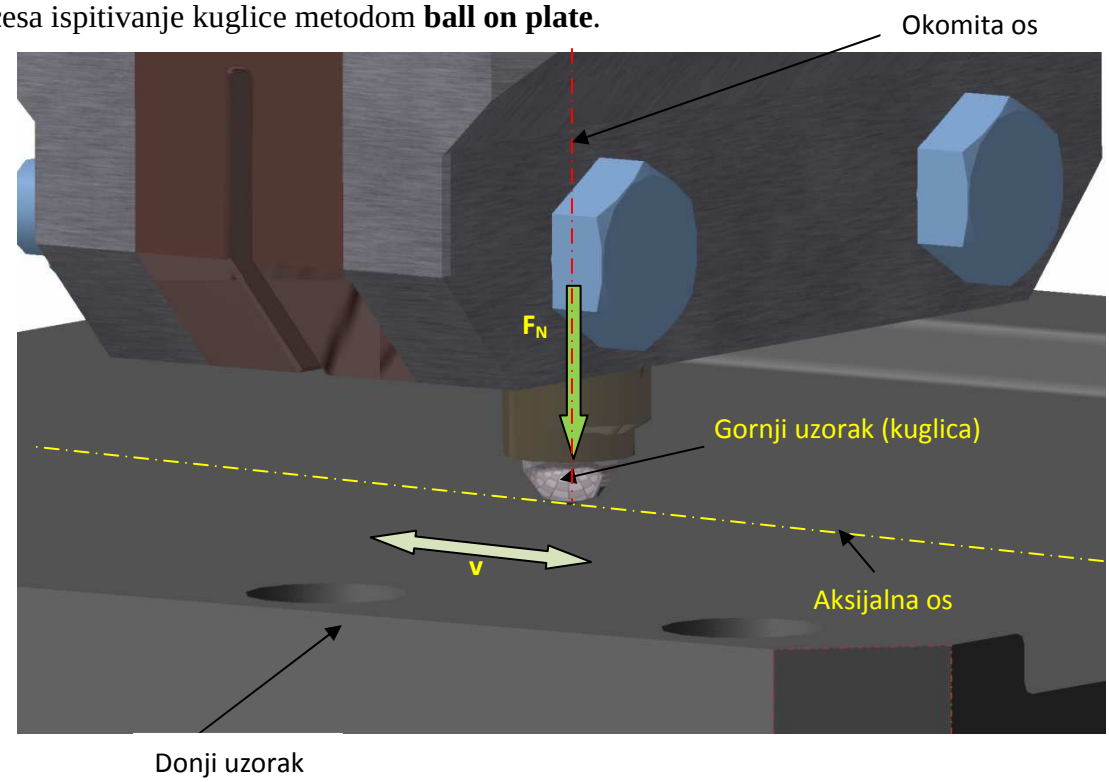
Ovime je dan primjer metode **pin on disk** na rotacijskom modulu. Zgodno bi bilo vidjeti jedan primjer rada na linearnom modulu. Dosta zgodna metoda koja se dosta koristi kako bi se ispitala kotrljajuća svojstva kuglica kotrljajućih ležaja je **metoda kuglica na ploči (ball on plate)**. Tom se metodom kuglica neke kotrljajuće vodilice ili ležaja podvrgava ispitivanju trošenja prema standardu **ASTM G133**. Precizno se mjeri gubitak volumena kuglice nakon djelovanja procesa.

Ispitna se kuglica stavi na vodilični nosač kuglice koji je cilindričnog oblika i izgleda kao klin, a svojim dimenzijama i odgovara klinu. Taj se nosač kuglice poput klina, kada je ispitivanje sa klinom, stavi u nosač klina. Ovakav sistem prihvaćanja kuglice jedan je od najjednostavnijih budući da se ništa ne mijenja s obzirom kada je klin jer nosač kuglice je jedna vrsta klina koja ovdje ima funkciju nošenja koglice. Prikaz kako to izgleda daje slika 7.1.7:



Slika 7.1.7 *Prikaz postavljanja uzorka (kuglice) sa pripadajućim nosačem na stegu*

Donji dio uzorka je postavljen na radni stol kolica linearnog modula i pričvršćen vijcima **M8**. Donji uzorak je dimenzija **200 x 200 x 8** kako bi se mogao stegnuti na stol i kako bi dužinom zadovoljavao veći korak motora. Nakon postavljanja uzoraka i stezanja iza toga, senzorska glava se sa kuglicom primiće vertikalno donjem uzorku, te nakon doticanja površine kuglice i donjeg uzorka počne se pojačavati normalna sila da se dobije početna normalna sila kojom se kreće u rad. Linearni će motor tada izvoditi harmonijsko gibanje naprijed – nazad po programu koji se unaprijed napravi na računalu ili se postepeno zadaju potrebni parametri procesa rada motora tokom djelovanja procesa. Harmonijsko gibanje uzrokuje kotrljanje kuglice čas u jednom, čas u drugom smjeru pod djelovanjem velike normalne sile tako da ona s vremenom gubi na finoći površine i na volumenu. Sila trenja se tokom procesa, kao i ostali parametri može pratiti na računalu kao i kod prijašnje metode pin on disk. Slika 7.1.8 i 7.1.9 prikazuju sliku stvarnog procesa ispitivanje kuglice metodom **ball on plate**.

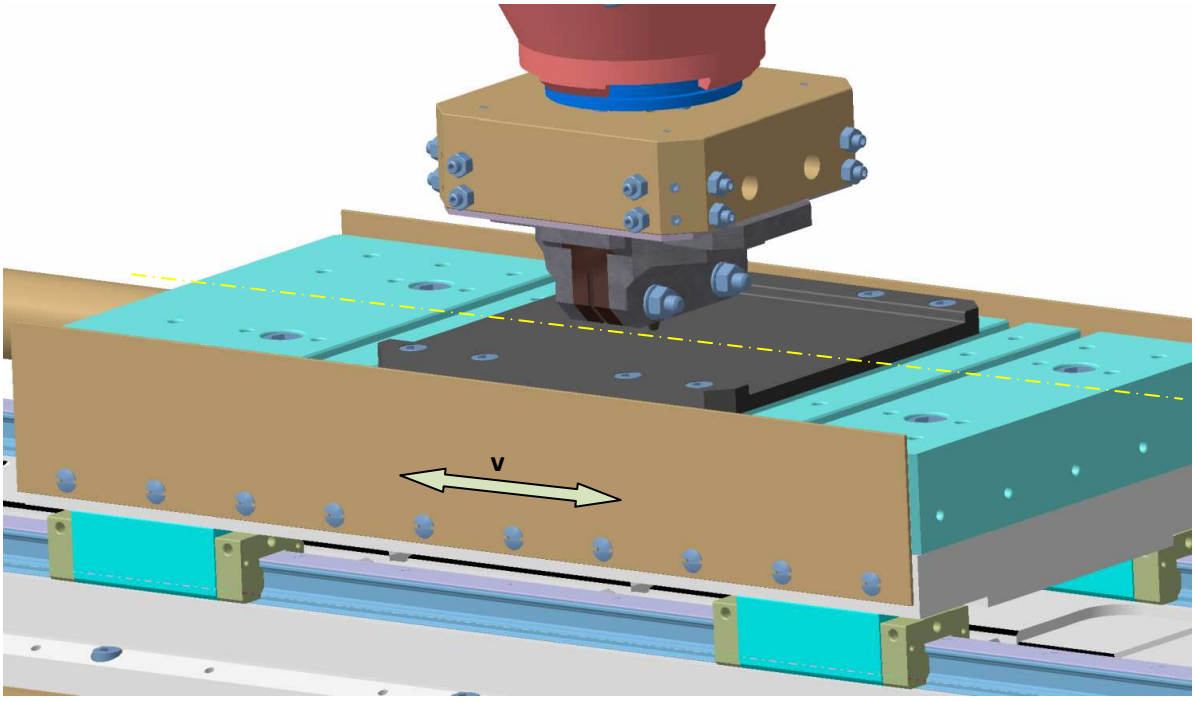


Slika 7.1.8 *Prikaz rada metode kuglica na ploči*

F_N ..... *normalna sila na površinu, N*

v..... *brzina gibanja linearnih kolica, m/s*

Sila trenja zbog koje nastaje kotrljanje kuglice puno je manja od sile trenja koja je djelovala kod klina na disku jer je ova metoda ispitivanja sa kotrljanjem kuglice po površini donjeg uzorka, a kako je već spomenuto u uvodu sila trenja kotrljanja je puno manja od sile trenja klizanja.



Slika 7.1.9 *Prikaz procesa rada na linearnom modulu*

Kod ispitivanja se mora paziti da parametri procesa ne premaše određene granice koje su maksimalne za te parametre. Kod programiranja gibanja treba se koristiti razrađenim dijagramima u **poglavlju 6** koji upućuju na određene mogućnosti stroja u pojedinom trenutku, te prikazuju ovisnosti parametara procesa. Ova se metoda može vršiti sa i bez podmazivanja. U slučaju da se podmazuje smanjuje se sila trenja na još manji iznos te je moguća pojava klizanja kuglice ako je normalna sila premalena. Frekvencija titranja linearnih kolica obrnuto je proporcionalna periodu gibanja kolica, a period je direktno ovisan o režimima rada. Kako se prema određenom režimu rada može odrediti ukupno vrijeme polutitraja, dakle gibanja u jednom smjeru (**t_{uk}**) (formula je prikazana u poglavlju 6.1, strana 96.), može se lako odrediti frekvencija titranja prema formuli:

$$f_{titr} = \frac{100}{12 \cdot t_{uk}} \quad [min^{-1}]$$

f_{titr}..... *frekvencija titranja linearnih kolica, min^{-1}*

t_{uk}..... *vrijeme gibanja kolica u jednom smjeru, s*

Ovime su opisane dvije češće metode ispitivanja trenja i trošenja uz primjere tako da je lako vidljivo kako proces rada izgleda i kako teće.

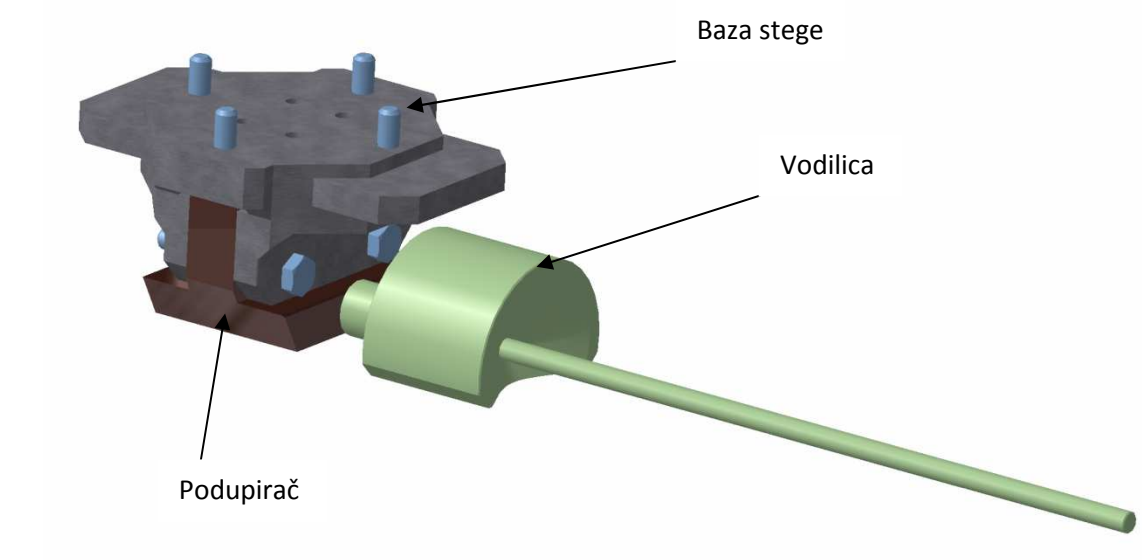
7.2 ISPITIVANJE OPRUGA

Kako je stroj jako fleksibilan tako osim mogućnosti ispitivanja trenja i trošenja može ispitivati krutost i čvrstoću opruga. Ovdje se mogu ispitivati sve vrste opruga, sa svim vrstama karakteristika. Karakteristike opruga su: ***progresivna, degresivna*** i ***proporcionalna.*** Progresivne opruge su opruge kojima uz povećanje deformacije sila raste na potenciju veću od 1, dakle ubrzano se povećava. Degresivne opruge su opruge kojima uz povećanje deformacije sila raste sa potencijom manjom od 1 dakle usporeno se povećava. Proporcionalne opruge su opruge kojima se uz porast deformacije sila linearno povećava. Sve ove vrste opružnih karakteristika ovakav stroj može obuhvatiti ispitivanjem krutosti i čvrstoće. Ono što je potrebno za svaku veličinu opruge i za svaku vrstu jest naprava za prihvaćanje kako bi joj se omogućilo precizno mjerenje. Naime svaka se vrsta opruge prihvaća na drugačiji način budući da su neke opruge vlačne, neke tlačne, neke savojne, a neke torzione. Zato svaka veličina i vrsta mora imati takvu napravu koja se lako smjesti na tribometar, a omogućuje opruzi precizno ispitivanje nad njom.

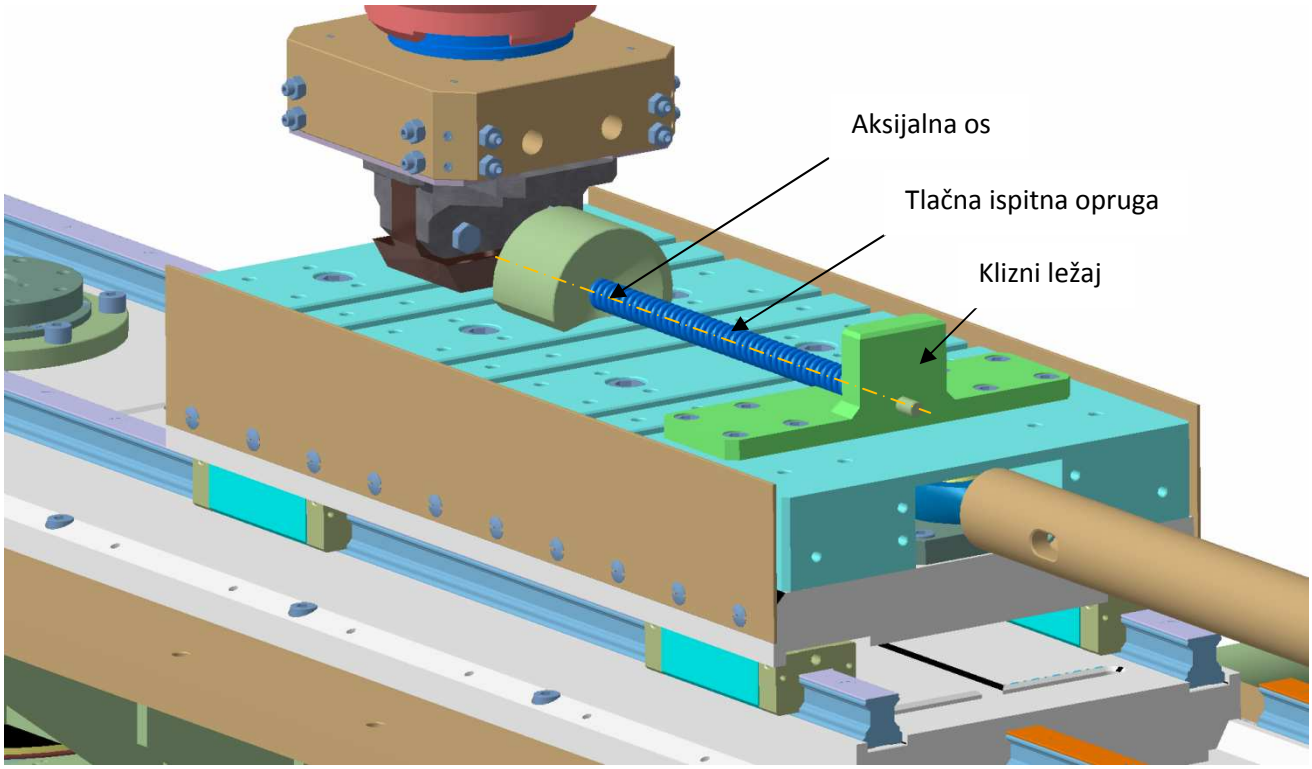
Ono što je primarno za opruge je ispitati njihovu krutost tj. njihovo ponašanje usred deformacije. Kada se opruga optereti nekom silom povećanjem djelovanja sile povećava se deformacija. Na koji način ne zna se, ali zato se i ovaj postupak ispitivanja i obavlja da se sazna kako je ponašanje određene opruge uslijed povećanja sile. Drugo, ispituje se krajnja mogučnost opruga, tj. njihova čvrstoća da se ne deformiraju. Opruga se optereti za svaki korak većom silom. Svaki korak je povećani za određeni pomak, tako da se na taj način opterećenjem, popuštanjem i ponovnim jaćim opterećenjem mjeri da li se početna duljina opruge nakon rasterećenja promijenila što bi značilo plastičnu deformaciju opruge. Postupak stane kada računalo primijeti da se opruga plastično deformirala i tu silu bilježi. Svaka opruga na ovome stroju se može ispitati sa silama manjim od maksimalne. Ako je potrebno oprugu ispitati na većim silama od maksimalne tada se ta opruga ne da ispitati na ovome stroju, već na nekom jaćem.

U ovome će radu biti prikazan način ispitivanja jedne tlačne opruge srednjeg promjera 8 mm i promjera žice 3 mm. Naprava za prihvat takve opruge prikazana je na slici 7.2.1. To može biti ista onakva baza kao za ispitivanje trenja samo joj se promijeni centralni dio, a to je podupirač u ovome slučaju na koji se direktno preko vijčanog spoja stegne vodilica. Drugi kraj ove vodilice je uležišten preko kliznog ležaja koji je postavljen na radni stol kolica i na njega vijcima stegnut.

Klizni ležaj mora omogućavati podmazivanje kako bi se trenje smanjilo na minimum i time povećalo preciznost mjerenja. Prije nego se vodilica postavi u ležaj na nju se stavi ispitna opruga. Svaka ispitna opruga ima različitu vodilicu tako da se vodilica izrađuje prema opruzi koju ispituje.



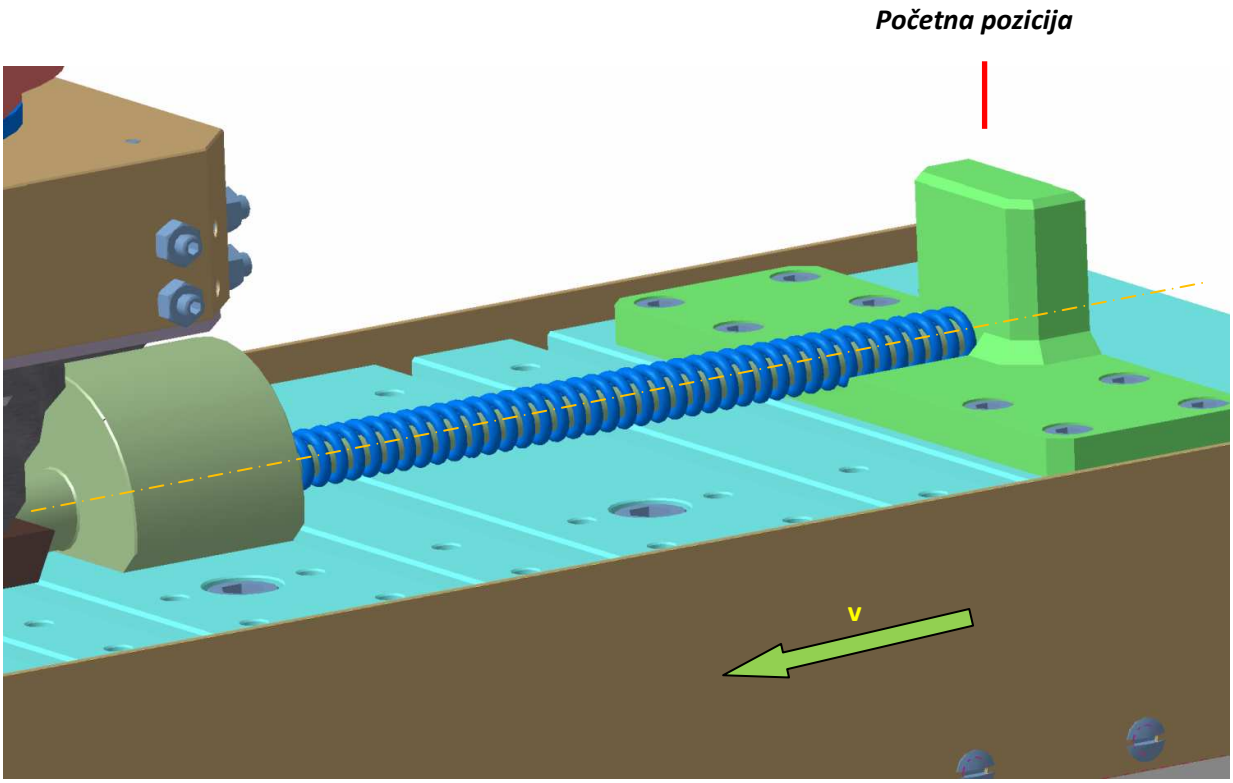
Slika 7.2.1 *Naprava za prihvat tlačnih opruga unutarnjih promjera 5 – 10 mm*



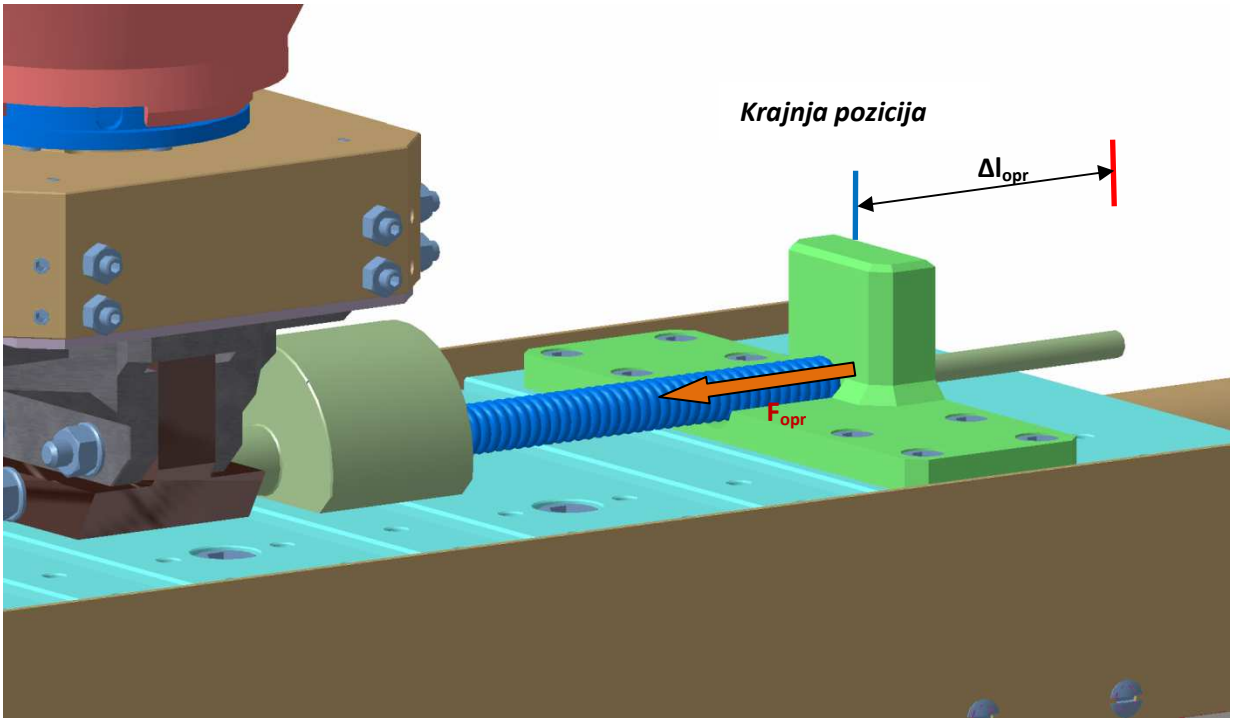
Slika 7.2.2 *Prikaz postavljene opruge između linearnih kolica i senzorske glave*

Tako postavljena opruga sada se nalazi između kliznog ležaja koji je kruto postavljen na linearna kolica s jedne strane te senzorske glave s druge strane.

Laganim pomacima linearnog motora u jednom smjeru povećava se otpor opruge, a njena se sila pomoću horizontalnih senzora sila unutar senzorske glave mjeri. Mjerenje dozvoljava maksimalne sile koje su dozvoljene za te senzore i za linearni motor, a to je maksimalna sila linearnog motora **2750 N**.



Slika 7.2.3 *Opruga u početnom neopterećenom položaju*



Slika 7.2.4 *Opruga u krajnjem opterećenom položaju*

Sila u opruzi registrira se pomoću horizontalnih senzora unutar glave. Kako senzori sila bilježe porast sile opruge tako senzor položaja linearnog modula bilježi pomak. Taj pomak programski povezan sa silom može direktno iscrtavati dijagram sila – pomak na računalu i na taj način dati karakteristiku opruge iz koje se vidi krutost i njeno ponašanje usred djelovanja sile.

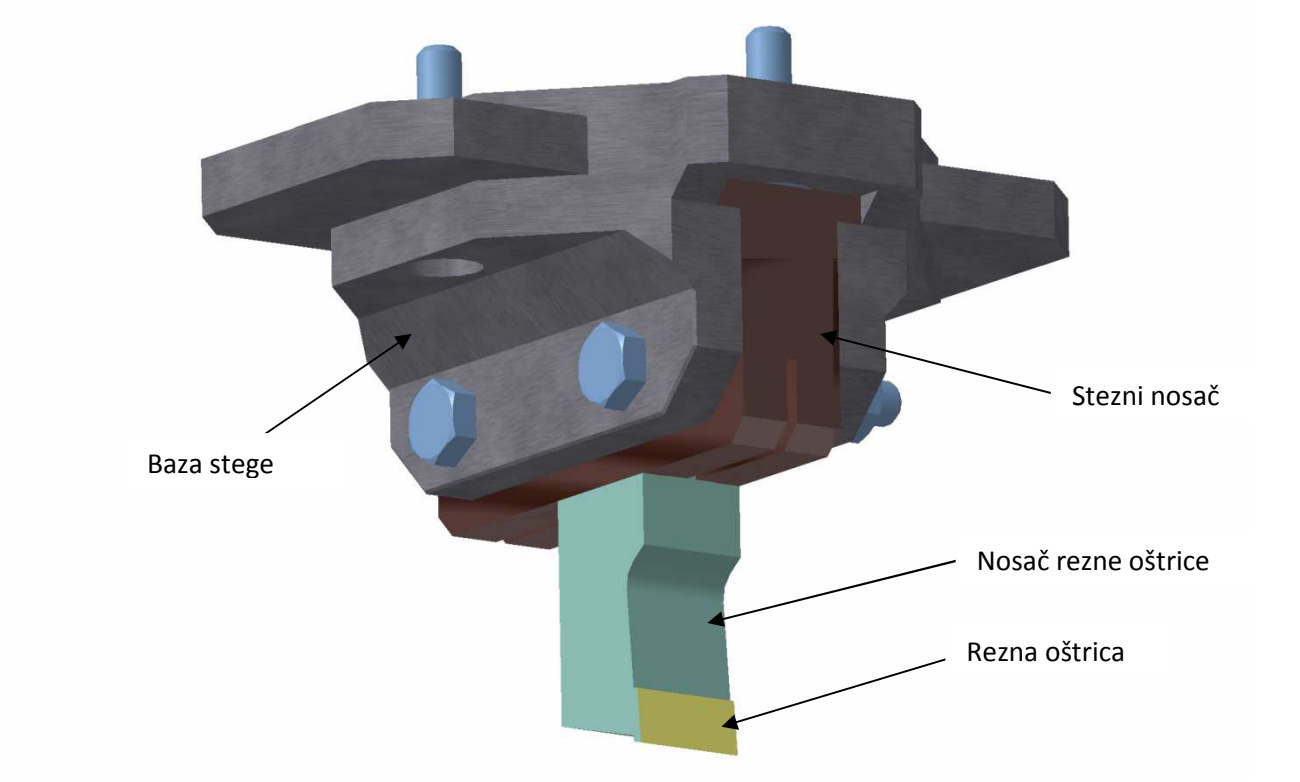
Opruge se mogu ispitati i u uvjetima snižene temperature. Poznato je da krhkost čelika raste sniženjem temperature i ako se opruga dovede na nisku temperaturu i ispita u povećanim dinamičkim uvjetima sa većim udarima, može se vidjeti kako se tada ponaša i koliko je izgubila na elastičnosti. Za opruge koje su primjerice izložene stalnim dinamičkim operećenjima pri nižim temperaturama, lako se može vidjeti koliko takva opruga može u stvarnosti izdržati, a da se plastično ne deformira ili da ne pukne. Na slici 7.2.4 vidljivo je kako se opruga deformira uslijed pomaka ($\mathbf{\Delta l}_{opr}$) i deformacije opruge te kako ta deformacija rezultira silu opruge ($\mathbf{F}_{opr}$).

Ovime je ukratko opisana procedura kako ispitivati opruge na ovome stroju. Uz opruge moguće je ispitivanje čvrstoće materijala na vlak tako da stroj glumi kidalicu, no kako su za kidalicu potrebne velike sile, tako se ovdje može ispitivati na vlak samo epruvete manjih presjeka koje pucaju već kod sila manjih od maksimalne sile linearnog motora.

7.3 MJERENJE SILE REZANJA

Sile rezanja prisutne su u obradi odvajanja čestica kao glavne sile koje utječu na samo odvajanje čestica sa obratka. Ta sila može se mjeriti na ovome stroju na način da se određeni obradak koji se želi ispitati stegne u čeljust kaja je smještena na rotacijskom disku ili linearnim kolicima, dok se nož stegne na senzorsku glavu. Nož može na sebi imati ispitne pločice od reznog materijala koji je zanimljiv za ispitivanje. Dakle može se ispitivati trošenje rezne oštrice noža ili ispitivati sila rezanja na obratku. Kolika je sila rezanja kod obrade pojedinih materijala sa pojedinim alatima važan je podatak preko kojeg se može znati unaprijed kolika je potrebna snaga stroja pri pojedinoj obradi ovakvih materijala, te se unaprijed mogu predvidjeti troškovi za takav tip obrade materijala.

Kako je sila rezanja neovisna o vrsti obrade odvajanja čestica tako nema brige da se obradak mora ispitivati točno na određen način. Kako se u zadnje vrijeme najčešće koriste noževi sa reznom oštricom u obliku neke pločice koja se pomoću vijaka stegne na nosač, tako će se za ispitivanje na ovome stroju koristiti određeni nosači za rezne oštrice. Mora se obratiti pozornost da nosač oštrice ne smije biti predugačak kako bi se mogao postaviti između senzorske glave i linearnih kolica budući da je prostor ograničen. Kako je otprilike zamišljen jedan takav nož prikazuje slika 7.3.1:



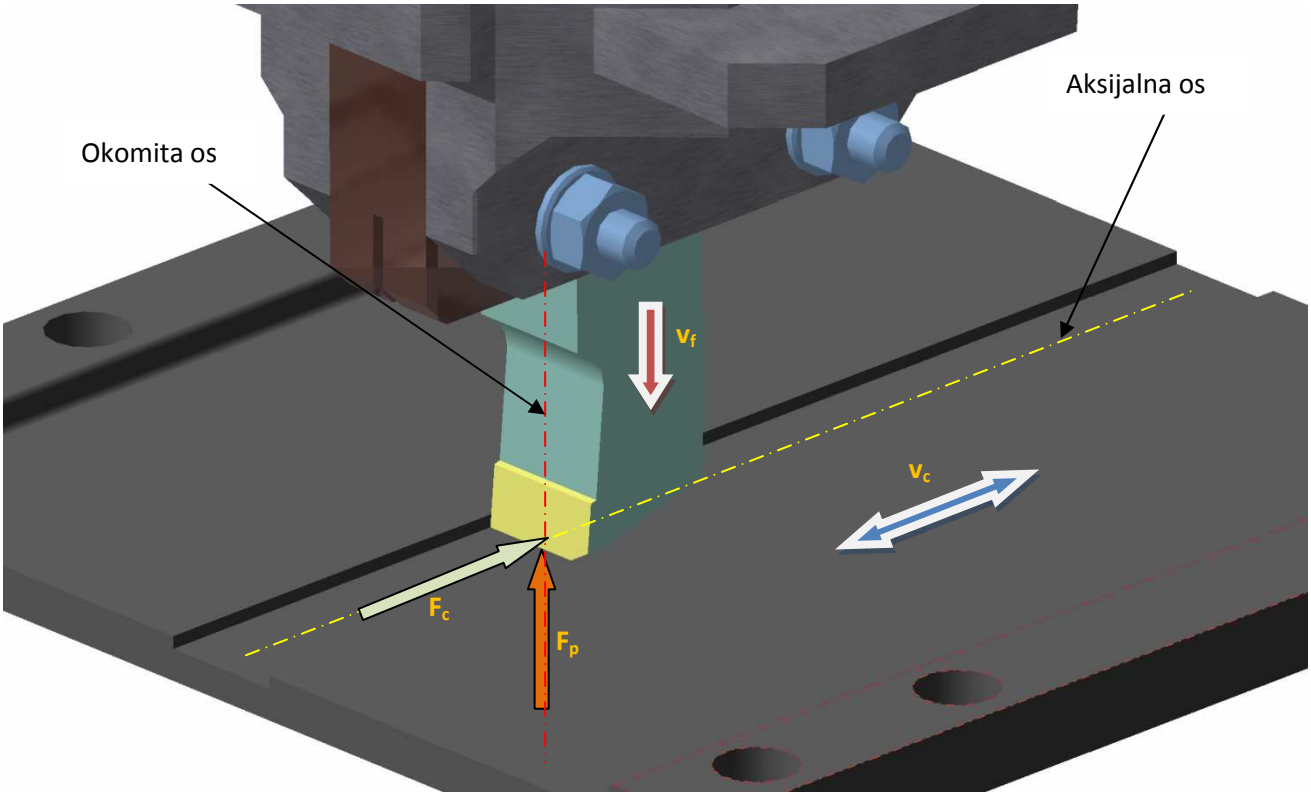
Slika 7.3.1 *Nož za ispitivanje sila rezanja učvršćen sa steznim čeljustima*

Kao stezni element za nož mogu poslužiti svi stezni elementi spomenuti za stezanje uzoraka za ispitivanje trenja. Naravno da se pri izradi steznog elementa ili kod nabave ako je on standardan mora voditi računa kako će se on postaviti i gdje. Kako se ne bi puno toga mijenjalo može se kao gornja stega za prihvat noža koristiti dosad spomenuta stega za ispitivanje trenja i opruga. Takva se stega učvrsti na senzorsku glavu a za nož se izradi poseban stezni nosač koji ulazi unutar baze stege. Mogućnost takvog steznog nosača je da nož, odnosno nosač rezne oštrice može ući unutar njegovog provrta. Kada se nosač rezne oštrice sa postavljenom oštricom stavi unutar pravokutnog provrta, pomoću dva se vijka stegne preko steznog nosača na bazu stege. Ovo je jedno od mogućih rješenja i dakako nije jedinstveno pa se može napraviti bilo kakva druga stega ili prihvatnica za nož na ovome stroju, po mogućnosti što jednostavnija i učinkovitija. Ovakva stega mora podnijeti sile rezanja koje će prenositi na senzorsku glavu tako da krutost ovakve stezne naprave mora zadovoljavati u potpunosti. Sam nosač rezne oštrice može se birati kao standardni nosač, ali kako su oni dosta dugački, morat će se prilagoditi ovome stroju. Stezni nosač se izrađuje po dimenzijama noža, odnosno nosača rezne oštrice.

Donji ispitni uzorak može se vijcima stegnuti na linearna kolica ili se može stegnuti pomoću stezača za sam stol linearnih kolica. Stezači su učvršćeni za stol linearnih kolica preko T-utora u kojima su smještene T-matice.

Proces ispitivanja može započeti kada su uzorak i alat postavljeni na stroj. Po potrebi može se na računalu izraditi program po kojem će se alat kretati tokom procesa kako bi ostvarivao pojedine zahtjeve. Iz početnog položaja alat se giba po aksijalnoj osi naprijed nazad pri čemu glavno gibanje izvode linearna kolica sa obratkom, a pomoćno gibanje vertikalno prema dolje izvodi alat preko senzorske glave. Izgled procesa obrade prikazuje slika 7.3.2.

Brzina rezanja $\mathbf{v}_c$ je brzina kojom obradak sa linearnim kolicima putuje uzduž aksijalne osi. U jednom smjeru se vrši obrada i skidaju se čestice, dok se u drugom smjeru obradak vraća na početnu poziciju van noža, te nakon toga nož preko senzorske glave napravi posmični korak posmičnom brzinom $\mathbf{v}_f$ vertikalno po okomitoj osi prema dolje. Posmično gibanje je dakle diskontinuirano i vrši se alatom nakon što se obradak vrati u početni položaj od kud je krenuo. Glavno gibanje je kontinuirano i vrši ga obradak. Glavna sila rezanja $\mathbf{F}_c$ u smjeru je aksijalne osi, dakle registriraju je horizontalni senzori sila u senzorskoj glavi (*strana 37, slika 3.3.10, pozicija 15*). Natražna sila rezanja u smjeru je okomite osi te ju registrira vertikalni senzor sile (*strana 35, slika 3.3.8, pozicija 15*). Rezultantna sila između ovih dviju sila je rezultantna sila rezanja $\mathbf{F}_R$ koja je ujedno i sila koja se traži ovim ispitivanjem. Rezultantna se sila rezanja dobiva po pitagorinom poučku kao korijen zbroja kvadrata glavne i natražne sile rezanja.



Slika 7.3.2 *Proces ispitivanja sile rezanja na obratku*

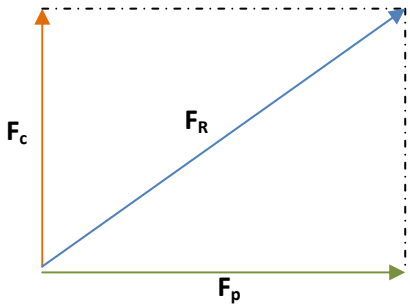
$\mathbf{v}_c$ ..... *brzina rezanja, m/s*

$\mathbf{v}_f$ ..... *posmična brzina, m/s*

$\mathbf{F}_c$ ..... *glavna sila rezanja rezanja, N*

$\mathbf{F}_p$ ..... *natražna sila rezanja, N*

$\mathbf{F}_R$ ..... *rezultantna sila rezanja, N*



$$F_R = \sqrt{F_c^2 + F_p^2} \quad [N]$$

Slika 7.3.3 *Prikaz djelovanja sila rezanja*

Ovime je ukratko opisan način mjerenja sila rezanja na ovome tribometru. Osim sila rezanja može se ispitivati trošenje reznih alata tako da se podvrgne alat ispitivanju pri kojemu se precizno mjeri masa rezne pločice preciznom vagom na početku i na kraju obrade.

Ovaj se postupak ispitivanja mora hladiti i podmazivati odgovarajućom emulzijom kako ne bi došlo do oštećenja alata i time do nepreciznog mjerenja. Klima komora kod ovog postupka ispitivanja ima veliku važnost jer može hladiti prostor na veoma nisku temperaturu tako da se može ispitivati proces rezanja pri sniženim temperaturama. Klima komora ovdje ima i važnost zaštite vanjskog prostora od odvojenih čestica obrade, te rashladnog sredstva.

Svi parametri obrade se mogu tokom rada pratiti na računalu te se tokom rada naknadno podešavati kako bi obrada tekla po željenom toku.

7.4 ISPITIVANJE TVRDOĆE MATERIJALA

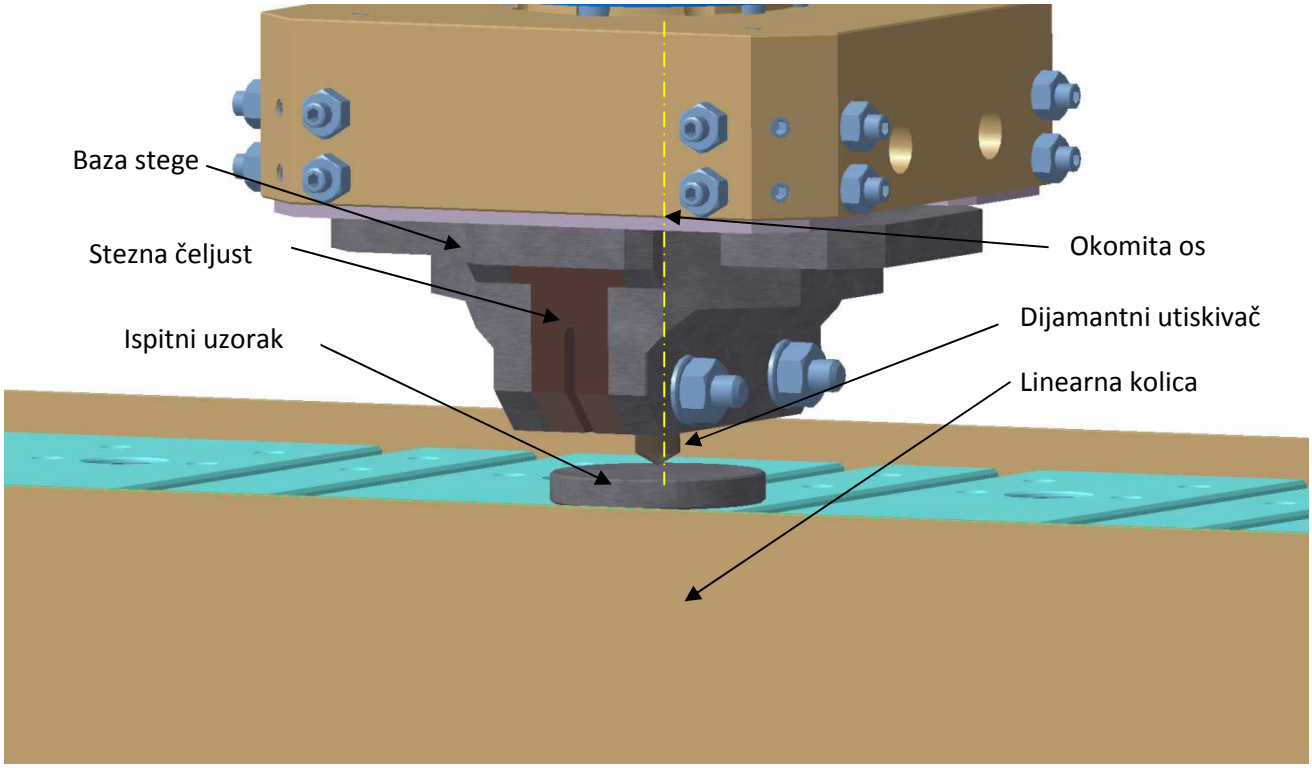
Ispitivanje tvrdoće materijala može se ispitivati pomoću 4 postupka:

1. **Po Brinellu**
2. **Po Vickersu**
3. **Po Rockwellu**
4. **Po Shoru**

Na ovom tribometru postoji mogućnost ispitivanja tvdoće svakim postupkom jer je stroj jako fleksibilan i brzo se može prilagoditi za razna ispitivanja tvrdoće.

U ovome radu biti će ukratko opisano ispitivanje tvrdoće po Rockwellu jer je ono jedan od najčešćih postupaka ispitivanja tvrdoće. Kako funkcioniraju ostali postupci ispitivanja tvrdoće na ovome tribometru, može se lako odgovoriti na sličan način osim što se proces samog ispitivanja mijenja po svom određenom toku.

Za svaki postupak, pa tako i za Rockwellov potreban je utiskivač koji će utisnuti radni element u ispitni uzorak te će se na taj način mjeriti tvdoća materijala uzorka. Utiskivač za opisani Rockwellov postupak biti će dijamantni stožac koji će se postaviti i stegnuti pomoću slične stege kao što je do sada korištena. Izgled stege sa utiskivačem prikazuje slika 7.4.1:

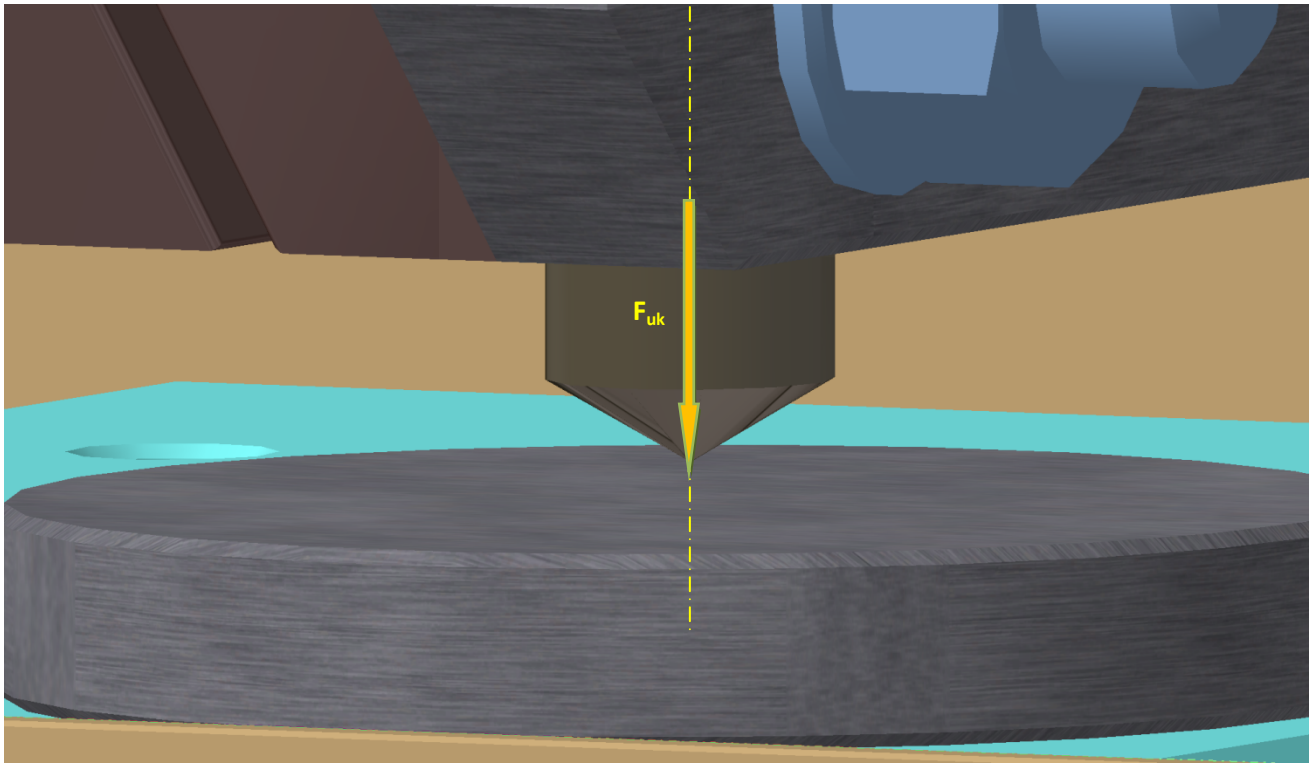


Slika 7.4.1 *Prikaz ispitivanja tvrdoće Rockwellovim postupkom*

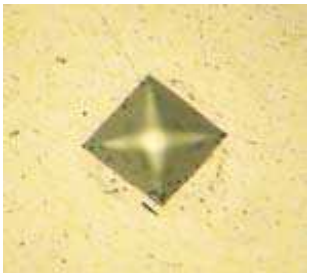
Stezna čeljust stege ista je kao i za ispitivanje trenja pomoću postupka klina na disku. U ovome slučaju presjek utiskivača odgovara ispitnom klinu pa se ista čeljust, koja se tamo naziva nosač uzorka, ovdje može iskoristiti za ispitivanje tvrdoće materijala. Donji se uzorak ne pričvršćuje za linearni modul već se samo postavi ispod utiskivača.

Postupak ispitivanja sastoji se u tome da se izradi program na računalu koji će kasnije pozivkom na njega napraviti ispitivanje bez dodatnog uplitanja čovjeka, te će matematičkim putem unutar samoga programa prikazati tvrdoću materijala na računalu nakon ispitivanja.

Utiskivač kod ovoga postupka mora biti kako je rečeno dijamantni stožac kuta **120°**, polumjera zaokruženja na vrhu **0.2 mm**. Sam program se treba odvijati tako da se utiskivač utisne u uzorak početnom silom $\mathbf{F}_0$, pri kojoj se stvara početni otisak dubine h_0. Nakon toga silu treba namjestiti kao vrijednost koja iznosi nula. Iza toga treba povećati silu djelovanja u vremenu od 4 do 8 sekundi dodatnom silom $\mathbf{F}_{dod}$ da se dobije ukupna sila $\mathbf{F}_{uk}$. Ova sila treba djelovati oko 2 sekunde (za materijale bez pojave puzanja) i 30 sekundi (za materijale sa pojavom puzanja). Nakon toga smanji se sila na silu $\mathbf{F}_0$, te se očita dubina utiska $\mathbf{h}_{uk}$. Ovaj će stroj ovo lako obaviti jer je sila utiska praćena pomoću vertikalnog senzora sile, a utisak pomoću vertikalnog pomaka modula prema dolje nakon doticanja uzorka. Na doticaj uzorka reagirat će vertikalni senzor sile. Čim njegova vrijednost ne bude iznosila nulu očitavat će se vertikalni pomak okomitog modula prema dolje. Vertikalni pomak je povezan sa kutem zakreta motora, a ovisnost je dijagramski prikazana na slici 4.3.2 strana 71:



Slika 7.4.2 *Uzorak opterećen silom utiskivača*



Slika 7.4.3 *Otisak na površini materijala nakon ispitivanja tvrdoće*

Na ovome se tribometru dakle dade brzo i efikasno izmjeriti tvrdoća nekog uzorka materijala bez puno komplikacija. Kako je stroj opremljen sa različitim senzorima uz dobro isprogramiran postupak ispitivanja, točnost ispitivanja može biti zbilja velika.

Više o ispitivanju tvrdoće materijala može se saznati iz **literature [18]**, od 362 do 375 strane.

7.5 OSTALE MOGUĆNOSTI RADA NA STROJU

Kako je već puno puta rečeno mogućnosti ovog tribometra su velike. Kako ima modularnu građu veoma je fleksibilan i na njega se može postaviti puno različitih modula koji imaju određenu funkciju rada. Osim spomenutih i opisanih stvari ovaj tribometar može još raditi dosta drugih stvari uz određene dodatke.

Ispitivanje gume dosta je često. Ispitivanje gume može biti različito što uključuje ispitivanje njezine krutosti, tvrdoće, trenja kada je u paru sa nekim drugim materijalom ili sa istim, deformacije, čvrstoće, trošenja kod djelovanja nekog abraziva na njezinu podlogu i sl. Najčešće guma zna biti zaštitna podloga nanesena na neki materijal pa se često ispituju svojstva takve podloge pod raznoraznim uvjetima što uključuje i povišenu i sniženu temperaturu.

Eksperimentalne metode mjerenja sila trenja i trošenja za različite kemijske navlake alata do sada su slabo korištene i sve više se javlja potreba za takvim ispitivanjima jer se u zadnje vrijeme ovakve navlake za alate sve više koriste. Kako nedostaje standard za takva ispitivanja javila se potreba za tim pa ovaj stroj za ovo može dobro poslužiti. Ispitivanja uključuju najčešće tribološka svojstva ovakvih navlaka, budući da se od njih traži da budu veoma otporne na trošenje i izdržive kod visokih temperatura. Oštrica alata na koju idu ovakve navlake veoma je osjetljivo područje izloženo visokim silama i naprezanjima. Upravo se radi svih tih stvari puno očekuje od tih ispitivanja, a ovaj tribometar može bez poteškoća ispitivati ovakve podloge različitim metodama od kojih napose ima prednost metoda *pin on plate*, a ako se želi ispitivati kod visokih brzina klizanja za to služi metoda *pin on disk* koja može razviti velike brzine klizanja.

Ciljana ispitivanja sa trošenjem već sam spomenuo donekle. Veoma je interesantno i korisno za neke materijale znati koliko se brzo troše u jedinici vremena. Takvi se materijali izlože velikim silama trenja i brzinama klizanja uz dodatak ili bez dodatka abrazivnih čestica ili uz podmazivanje ili na suho. Trošenje se zapaža na način da se preciznim vagama izmjeri uzorak prije ispitivanja i nakon ispitivanja te se razlika bilježi kao gubitak materijala u jedinici vremena ispitivanja kada je uzorak izložen trošenju.

Eksperimentalne metode mjerenja sila držanja pojedinih steznih spojeva veoma su bitne i česte stvari. U industrijskoj primjeni potrebno je dimenzionirati krajnje elemente robota i podesiti ih na točne sile držanja ili treba ispitati maksimalne sile držanja. Potrebno je ispitati pouzdanost i kvalitetu držanja hvataljki robota kako bi određeni predmet koji se drži bio sigurno nošen. Određeni predmeti koji se nose osjetljivi su na prevelike sile hvatanja, a mogu biti dosta velike mase. Zato se treba ispitati kolika je najmanja moguća sila nošenja kako bi se takav predmet sa sigurnošću i kvalitetom prenio.

Eksperimentalne metode mjerenja sila prenošenim trenjem preko različitih tarnih obloga koriste se najčešće za tarne spojke. Naime tarne spojke kao što su lamelne spojke prenose okretni moment trenjem preko tarnih površina. Takve se lamele radi različitih dobrih tarnih svojstava oblažu raznim materijalima kako bi moment prenošenja bio što veći uz male sile pritiska. Kako te spojke ovise o broju lamela, ako se postignu jaće sile trenja na jednoj lameli broj tih lamela može biti manji pa će biti i dimenzije same spojke manje i time će se uštedjeti na masi spojke i na volumenu. Mjerenje se izvodi tako da se na disk montira jedan od para uzoraka, a na pritiskalicu se stegne drugi od para u obliku prstena. Ta metoda se naziva *ring on disk* i njome se ispituje koliki je maksimalni prijenosni moment koji se može prenjeti uz podmazivanje ili na suho.

Ispitivanje zavarenih spojeva nerazornim ispitivanjima je ispitivanje koje je izvanredno za ovaj stroj. Naime pomoću ultrazvuka, rengenskim ili γ-zrakama želi se ispitati kvaliteta zavarenog spoja. Zavareni spoj može imati razne uključine i pore unutar same strukture i ako je takav spoj izložen naprezanjima dolazi do pucanja ili pojave opasnih deformacija. Za to je potrebno zamijeniti senzorsku glavu na okomitom modulu sa glavom koja razvija određene zrake za ispitivanje. Uzorak se pričvrsti na linearna kolica koja se lagano gibaju uslijed ispitivanja. Rezultati ispitivanja se mogu direktno vidjeti na računalu uslijed samog procesa ispitivanja.

Korištenje stroja za strojnu obradu i druge tehnologije krajnji je limit ovoga stroja. Ovaj se stroj može upotrijebiti da bude obradni centar ili obični CNC stroj za odvajanje čestica, ako se umjesto okomitog modula sa senzorskom glavom postavi modul za prihvat alata ili obratka. Stroj se lako na to može prilagoditi budući da je građen da mu postolje može podnijeti podosta velike sile. Linearni modul u tom slučaju mogao bi služiti kao jedna os posmičnog gibanja dok bi ovdje bilo potrebe za unošenjem još jedne osi. Modul koji bi imao okomitu horizontalnu os s obzirom na postojeću aksijalnu os mogao bi se montirati na linearna kolica te bi tada ovaj stroj imao tri osi pravocrtnog gibanja što bi bilo dovoljno da služi kao obradni centar. Naravno da bi za to još bile potrebne razne sitne modifikacije i prilagodbe, no postoji mogućnost da stroj obavlja ovu radnju. Osim strojne obrade može se postaviti glava za TIG ili MIG zavarivanje te bi stroj obavljao i ovu vrstu tehnologije uz isto tako određene modifikacije stroja.

Spomenute mogućnosti nisu naravno sve, ali su većina poznatih i potrebnih metoda ispitivanja i nekih tehnoloških metoda ovdje spomenute za koje se ovaj stroj može prilagoditi više ili manje.

Ovaj je stroj stvoren najviše za samo ispitivanje, pa kao tehnološka podrška za služenje kao obradni centar ili zavarivački CNC- stroj manje više otpada kao mogućnost jer modifikacije stroja bile bi neisplative s obzirom da je stroj potreban, a i tome cilju je i napravljen da služi naročito za tribološka ispitivanja, dakle da bude ***tribometar***.

8. ZAKLJUČAK

Ideja ovoga diplomskog rada bila je razraditi računalom vođeni tribometar koji je u tijeku izrade na FSB – u u Zagrebu. Razraditi ga u smislu potpuno objasniti njegovu konstrukcijsku građu i njegove dijelove, opisati funkciju svih njegovih modula, objasniti pogonski sustav sa svim karakteristikama, objasniti funkciju senzora tribometra, razraditi međusobnu ovisnost parametara tribometra, navesti i objasniti nekoliko primjera stvarnih ispitivanja na tribometru, te navesti ostale mogućnosti ispitivanja tribometra.

Ovaj je rad podijeljen u sedam poglavlja. U prvom uvodnom poglavlju se govorilo općenito o vrstama trenja, metodama triboloških ispitivanja i o postojećim tribometrima.

Drugo poglavlje sadržavalo je osnovnu ideju, njegov nastanak i osnovne osi gibanja ovoga tribometra. Od početne ideje dok se smatralo da su dvije osi dovoljne za potrebna ispitivanja do konačne ideje da tribometar bude troosni fleksibilni stroj koji ima veoma široki spektar mogućnosti.

U trećem je poglavlju tribometar podijeljen na module koji su svaki zasebno detaljno opisani i slikovno dobro prikazani od čega se sastoje te kako koji dio funkcionira kao jedinka i od kojeg je materijala. Dakle u tom poglavlju je stroj konstrukcijski totalno obuhvaćen do detalja. Tribometar je sastavljen od 6 modula. To su modul za ostvarivanje linearnog gibanja (linearni modul), modul za ostvarivanje rotacijskog gibanja (rotacijski modul), modul za ostvarivanje normalne sile pritiska (okomiti modul), klima komora, klima uređaj i postolje stroja.

Četvrto poglavlje opisuje pogone tribometra. Tu su dva rotacijska sinkrona AC servo motora za pogon okomitog modula i rotacijskog modula, te linearni sinkroni servo motor za pogon linearnog modula. Ovim je motorima detaljno prikazana specifikacija i razrađene su im maksimalne mogućnosti u toku rada.

Peto poglavlje govori o senzorima tribometra. Tribometar ima tri vrste senzora na sebi. To su senzori mjerenja sila, senzori mjerenja brzine i položaja, te senzori mjerenja temperature. Tri senzora mjerenja sila raspoređena su na senzorskoj glavi tako da imaju mogućnost troosnog mjerenja sila. Senzori brzine i položaja smješteni su uglavnom na mjesta blizu pogonskih motora kako bi izmjerili trenutne položaje i brzine gibajućih modula. Senzori mjerenja temperature mjere temperaturu uzoraka, tekučine za podmazivanje i klima komore. Ovako opremljen sustav senzorima može zadovoljavati u pogledu točnosti jer je lako izraditi regulaciju sustava.

Šesto poglavlje bazira se na parametre sustava gdje se traže određene ovisnosti pojedinih parametara stroja o drugim parametrima kako bi uvid u sam proces upravljanja stroja bio lakši.

U zadnjem poglavlju detaljno su prikazane i razrađene dvije metode ispitivanja trenja i to metoda klin na disku (*pin on disk*) i metoda kuglice na ploči (*ball on plate*). Spomenute su, a neke i razrađene, dodatne mogućnosti ispitivanja na tribometru kao što je ispitivanje opruga, ispitivanje sile rezanja na alatima za strojnu obradu, ispitivanje tvrdoće materijala i sl.

Nakon svega ovoga što je napravljeno u svezi ovoga stroja, mislim da ovaj rad pokazuje dobar uvid u sam stroj, njegove funkcije i mogućnosti, te da će pomoći onome tko će se sa tim tribometrom više baviti.

LITERATURA

[1] C. Kittel, W. D. Knight, M. A. Rudermann, Mehanika, Tehnička knjiga, Zagreb 2003.
http://dominis.phy.hr/~ivand/RUNA/trenje.htm

[2] FERI, Inštitut za robotiko, Trenje v mehanskih sistemih
http://lpa.feri.uni-mb.si/Pedagosko_delo/Modeliranje_procesov/trenje.pdf

[3] OM predavanja, mehanika, 2008.
http://www.fer.hr/_download/repository/OM_Predavanja_2008_Mehanika_5.pdf

[4] Phoenix tribology Ltd, PLINT tribology products, 2002.
http://www.phoenix-tribology.com/cat/at2/thumbs/te88.htm

[5] J.Petrić, Nadzor i završno izvješće tehnologijskih projekata , 26.11.2007.

[6] INA Ball monorail guidance systems KUVE25-B-KT-SL
http://medias.schaeffler.com/medias/en!hp.ec.br.pr/KUVE..-B-KT-SL*KUVE25-B-KT-SL;aaFgU6Hs_SDa

[7] SKF, Roller screws
http://skf.manager.nu/publication_files/pdf/4351EN_071204093927.pdf

[8] Siemens, Linear motors 1FN1/1FN3, Rujan 2005.
http://www2.sea.siemens.com/NR/rdonlyres/279C138A-9CFA-43B6-834C-70A0EABDE8F5/0/siemens_linear_motors_1FN1_1FN3.pdf

[9] Siemens, Synchronous and asynscronous servo motors for Simovert masterdrives, catalog DA 65.3, 2004.
http://www.automation.siemens.com/mc/mc-sol/en/f0de4364-c68b-4c16-93b3-a89ea5ae4149/index.aspx

[10] Omega, Miniature high-capacity ˝top hat˝ load cell
http://www.omega.com/Pressure/pdf/LC307.pdf

[11] HBM, RM 4220 Amplifier for SG – transducers
http://www.hottinger.sk/Prospekty/Elektronika/spol/RM4220/p_rm4220_e.pdf

[12] AMI, Heidenhein linear encoders
http://www.auto-met.com/heidenhain/scale_pres.htm

[13] Heidenhain, Linear encoders for numerically controlled machine tools, lipanj 2007.
http://wwwpdb.heidenhain.co.uk/ansicht/Heidenhain/media/img/571_470-23.pdf

[14] Heidenhain, rotary encoders, travanj 2008.
http://wwwpdb.heidenhain.co.uk/ansicht/Heidenhain/media/img/349_529-28.pdf

[15] Omega, Surface thermocouple
http://www.omega.com/Temperature/pdf/SA1XL.pdf

[16] Omega, Rugged Pipe plug thermocouple probe
http://www.omega.com/Temperature/pdf/TC-NPT.pdf

[17] Omega, DRF Series DIN rail mount configurable signal conditioners
www.omega.com/DAS/pdf/DRF_SERIES.pdf

[18] B.Kraut, Krautov strojarski priručnik , AXIOM d.o.o., 1997.

PRILOG

A POGONSKI MOTORI

Sadržaj A

Prilog A1 – Tehnički podaci za linearni motor
tipa 1FN3100-5WC00-0AA1- vodeno hlađen - motor linearnog modula..... 132
Prilog A2 – Tehnički podaci za rotacijski sinkroni servo motor
tipa 1FT6 062-6WK7 -vodeno hlađen - motor rotacijskog modula..... 136
Prilog A3 – Tehnički podaci za rotacijski sinkroni servo motor
tipa 1FT6 024-6AK7 –prirodno hlađen – motor vertikalne pritiskalice..... 141

Prilog A1 – Tehnički podaci za linearni motor tipa 1FN3100-5WC00-0AA1- vodeno hlađen - motor linearnog modula

Synchronous motors
Linear motors for SINAMICS S120

1FN3 standard type linear motors version for peak loads – water cooling

Selection and Ordering Data

Feedrate force F_{rated} [1) 2)] N (lb$_f$)	Feedrate force F_{MAX} N (lb$_f$)	Maximum velocity [3)] v_{MAX} at F_{MAX} m/min (ft/min)	Maximum velocity [3)] v_{MAX} at F_{rated} m/min (ft/min)	1FN3 linear motors – version for peak loads Water cooling: Primary section Order No.	Secondary section Order No.	Weight approx. Primary section without/with precision cooling kg (lb)	Weight approx. Secondary section without/with heatsink profile kg (lb)
200 (45)	550 (123.6)	146 (479)	373 (1223.8)	**1FN3050-2WC00-0AA0**	**1FN3050-4SA00-0AA0**	2.4/2.9 (5.3/6.4)	0.4/0.5 (0.9/1.1)
200 (45)	490 (110.2)	138 (452.8)	322 (1056.4)	**1FN3100-1WC00-0AA1**	**1FN3100-4SA00-0AA0**	2.2/– (4.9/–) [4)]	0.7/0.8 (1.5/1.8)
450 (101.2)	1100 (247.3)	131 (429.8)	297 (974.4)	**1FN3100-2WC00-0AA1**		3.8/4.4 (8.4/9.7)	
450 (101.2)	1100 (247.3)	237 (777.6)	497 (1630.6)	**1FN3100-2WE00-0AA1**		3.8/4.4 (8.4/9.7)	
675 (151.7)	1650 (370.9)	120 (393.8)	277 (908.8)	**1FN3100-3WC00-0AA1**		5.4/6.2 (11.9/13.7)	
675 (151.7)	1650 (370.9)	237 (777.6)	497 (1630.6)	**1FN3100-3WE00-0AA1**		5.4/6.2 (11.9/13.7)	
900 (202.3)	2200 (494.6)	131 (429.8)	297 (974.4)	**1FN3100-4WC00-0AA1**		7.4/8.5 (16.3/18.7)	
1125 (252.9)	2750 (618.2)	109 (357.6)	255 (836.6)	**1FN3100-5WC00-0AA1**		9.1/10.4 (20.1/22.9)	
340 (76.4)	820 (184.3)	126 (413.4)	282 (925.2)	**1FN3150-1WC00-0AA1**	**1FN3150-4SA00-0AA0**	3.0/– (6.6/–) [4)]	1.2/1.3 (2.7/2.9)
675 (151.7)	1650 (370.9)	126 (413.4)	282 (925.2)	**1FN3150-2WC00-0AA1**		5.3/6 (11.7/13.2)	
1015 (228.2)	2470 (555.3)	126 (413.4)	282 (925.2)	**1FN3150-3WC00-0AA1**		7.8/8.7 (17.2/19.2)	
1350 (303.5)	3300 (741.8)	126 (413.4)	282 (925.2)	**1FN3150-4WC00-0AA1**		10.2/11.4 (22.5/25.1)	
1690 (379.9)	4120 (926.2)	126 (413.4)	282 (925.2)	**1FN3150-5WC00-0AA1**		12.8/14.2 (28.2/31.3)	
615 (138.3)	1720 (386.66)	128 (419.9)	309 (1013.8)	**1FN3300-1WC00-0AA1**	**1FN3300-4SA00-0AA0**	6.2/– (13.7/–) [4)]	2.4/2.6 (5.3/5.7)
1225 (275.4)	3450 (775.56)	63 (206.7)	176 (577.4)	**1FN3300-2WB00-0AA1**		11.4/12.4 (25.1/27.3)	
1225 (275.4)	3450 (775.56)	125 (410.1)	297 (974.4)	**1FN3300-2WC00-0AA1**		11.4/12.4 (25.1/27.3)	
1840 (413.6)	5170 (1162.22)	125 (410.1)	297 (974.4)	**1FN3300-3WC00-0AA1**		17/18.4 (37.5/40.6)	
2450 (550.8)	6900 (1551.12)	63 (206.7)	176 (577.4)	**1FN3300-4WB00-0AA1**		22.2/24 (48.9/52.9)	
2450 (550.8)	6900 (1551.12)	125 (410.1)	297 (974.4)	**1FN3300-4WC00-0AA1**		22.2/24 (48.9/52.9)	

One temperature monitoring circuit:	Temp-S	**0**
Two temperature monitoring circuits:	Temp-S and Temp-F	**1**

Dimension drawings

Primary section Type	Dimensions in mm (in) without precision cooling b_M	h_M	with precision cooling b_M	h_M	Primary section length L_P	Secondary section Type	Dimensions in mm (in) without precision cooling b_S	h_S	with precision cooling and cover b_S	h_S	Secondary section length L_S
1FN3, version for peak loads – water cooling											
1FN3050-2W	67 (2.64)	48.5 (1.91)	76 (2.99)	63.4 (2.50)	255 (10.04)	**1FN3050-4SA00-0AA0**	58 (2.28)	11.8 (0.46)	75 (2.95)	14.8 (0.58)	120 (4.72)
1FN3100-1W	96 (3.78)	48.5 (1.91)	–	–	150 (5.91)	**1FN3100-4SA00-0AA0**	88 (3.46)	11.8 (0.46)	105 (4.13)	14.8 (0.58)	120 (4.72)
1FN3100-2W	96 (3.78)	48.5 (1.91)	105 (4.13)	63.4 (2.50)	255 (10.04)						
1FN3100-3W	96 (3.78)	48.5 (1.91)	105 (4.13)	63.4 (2.50)	360 (14.17)						
1FN3100-4W	96 (3.78)	48.5 (1.91)	105 (4.13)	63.4 (2.50)	465 (18.31)						
1FN3100-5W	96 (3.78)	48.5 (1.91)	105 (4.13)	63.4 (2.50)	570 (22.44)						
1FN3150-1W	126 (4.96)	50.5 (1.99)	–	–	150 (5.91)	**1FN3150-4SA00-0AA0**	118 (4.65)	13.8 (0.54)	135 (5.31)	16.8 (0.66)	120 (4.72)
1FN3150-2W	126 (4.96)	50.5 (1.99)	135 (5.31)	65.4 (2.57)	255 (10.04)						
1FN3150-3W	126 (4.96)	50.5 (1.99)	135 (5.31)	65.4 (2.57)	360 (14.17)						
1FN3150-4W	126 (4.96)	50.5 (1.99)	135 (5.31)	65.4 (2.57)	465 (18.31)						
1FN3150-5W	126 (4.96)	50.5 (1.99)	135 (5.31)	65.4 (2.57)	570 (22.44)						
1FN3300-1W	141 (5.55)	64.1 (2.52)	–	–	221 (8.70)	**1FN3300-4SA00-0AA0**	134 (5.28)	16.5 (0.65)	151 (5.94)	19.5 (0.77)	184 (7.24)
1FN3300-2W	141 (5.55)	64.1 (2.52)	151 (5.94)	79 (3.11)	382 (15.04)						
1FN3300-3W	141 (5.55)	64.1 (2.52)	151 (5.94)	79 (3.11)	543 (21.38)						
1FN3300-4W	141 (5.55)	64.1 (2.52)	151 (5.94)	79 (3.11)	704 (27.72)						

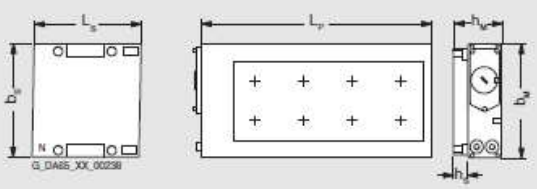
Synchronous motors
Linear motors for SINAMICS S120
1FN3 standard type linear motors version for peak loads – water cooling

Selection and Ordering Data

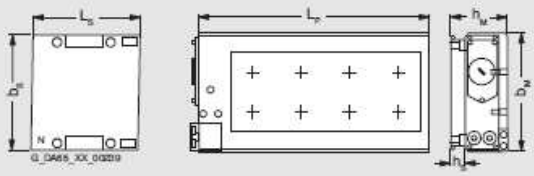
Motor type Primary section (continued)	Motor phase current I_{rated} [1] A	I_{MAX} A	Calculated power P_{calc} kW (HP)	SINAMICS Motor Module: Required rated current I_{rated}/I_{MAX} A	Order No. (For complete Order No., see "SINAMICS S120 drive system".)	Power cable with complete shield (Motor connection via adapter cable with power connector for increased velocity/acceleration): Order No. Pre-assembled adapter cable	Cable cross-section Motor mm²	Power connector Size	Order No. Pre-assembled cable
1FN3050-2WC00-...	2.7	8.2	4.1 (5.5)	5/10	6SL312 ■ - ■ TE15-0A..	Pre-assembled cables available soon.			
1FN3100-1WC00-...	2.4	6.5	3.1 (4.16)	5/10	6SL312 ■ - ■ TE15-0A..				
1FN3100-2WC00-...	5.1	13.5	6.3 (8.45)	9/18	6SL312 ■ - ■ TE21-0A..				
1FN3100-2WE00-...	8.1	21.5	8.3 (11.13)	18/36	6SL312 ■ - ■ TE21-8A..				
1FN3100-3WC00-...	7.2	19.1	9.2 (12.33)	18/36	6SL312 ■ - ■ TE21-8A..				
1FN3100-3WE00-...	12.1	32.2	12.4 (16.62)	18/36	6SL312 ■ - ■ TE21-8A..				
1FN3100-4WC00-...	10.1	27.0	12.6 (16.89)	18/36	6SL312 ■ - ■ TE21-8A..				
1FN3100-5WC00-...	11.0	29.5	14.4 (19.3)	18/36	6SL312 ■ - ■ TE21-8A..				
1FN3150-1WC00-...	3.6	9.5	4.3 (5.76)	5/10	6SL312 ■ - ■ TE15-0A..				
1FN3150-2WC00-...	7.2	19.1	8.7 (11.66)	18/36	6SL312 ■ - ■ TE21-8A..				
1FN3150-3WC00-...	10.7	28.6	13.0 (17.43)	18/36	6SL312 ■ - ■ TE21-8A..				
1FN3150-4WC00-...	14.3	38.2	17.4 (23.32)	30/56	6SL312 ■ - 1 TE23-0A..				
1FN3150-5WC00-...	17.9	47.7	21.7 (29.09)	30/56	6SL312 ■ - 1 TE23-0A..				
1FN3300-1WC00-...	6.5	20.0	8.7 (11.66)	18/36	6SL312 ■ - ■ TE21-8A..				
1FN3300-2WB00-...	8.0	24.7	13.2 (17.69)	18/36	6SL312 ■ - ■ TE21-8A..				
1FN3300-2WC00-...	12.6	39.2	16.8 (22.52)	30/56	6SL312 ■ - 1 TE23-0A..				
1FN3300-3WC00-...	19.0	58.7	25.1 (33.65)	60/113	6SL312 ■ - 1 TE26-0A..				
1FN3300-4WB00-...	16.0	49.4	26.3 (35.25)	30/56	6SL312 ■ - 1 TE23-0A..				
1FN3300-4WC00-...	25.3	78.3	33.5 (44.91)	60/113	6SL312 ■ - 1 TE26-0A..				

Cooling:	
Internal air cooling	0
External air cooling	1
Motor Module:	
Single Motor Module	1
Double Motor Module	2

Dimension drawings



1FN3050 to 1FN3450 without precision cooling

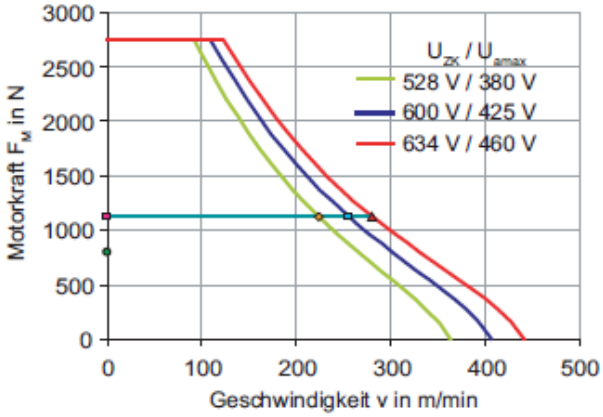


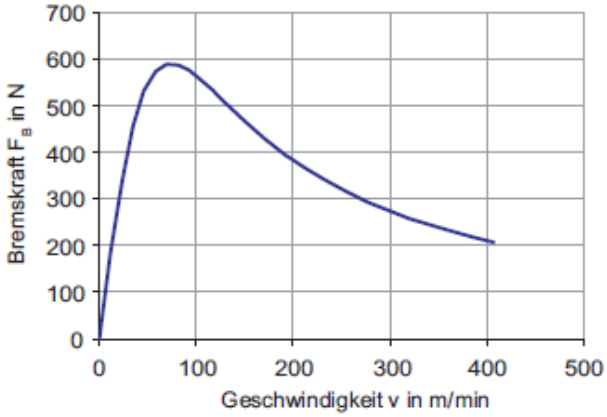
1FN3050 to 1FN3450 with precision cooling

1) For water cooling with inlet temperature 35 °C (95 °F).
2) A reduction of up to 30% must be expected in case of motor standstill, at very low speeds, or with very short traverse paths.
3) Velocity values refer to a converter DC link voltage of 600 V DC.
4) No precision cooler available.

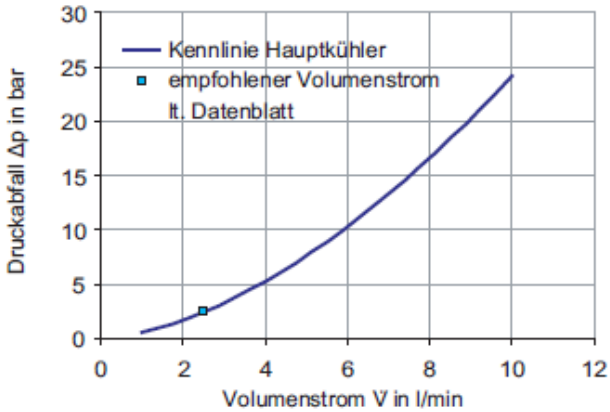
Kennlinien 1FN3100-5WC00-0AA1

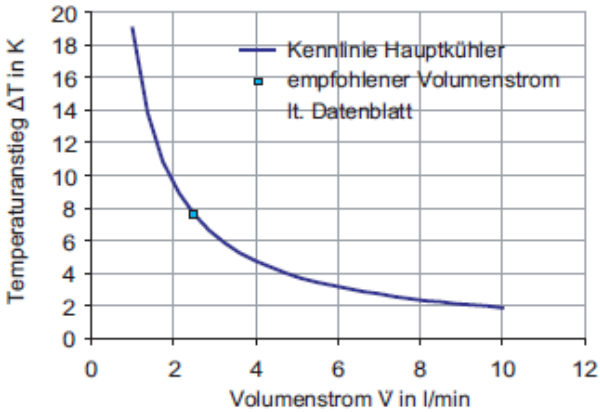
Kennlinien Kräfte



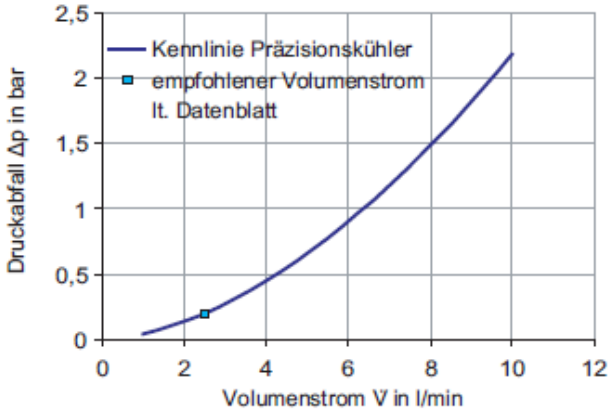


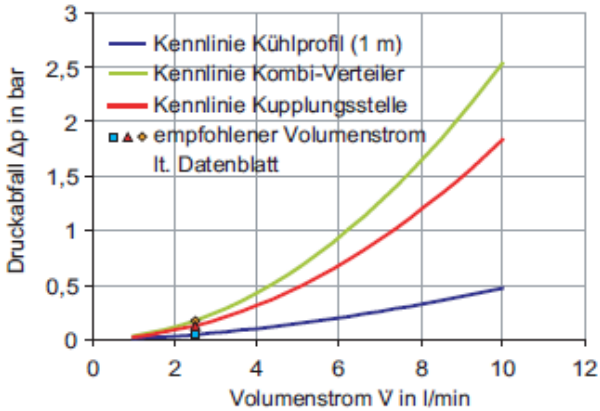
Kennlinien Primärteil-Hauptkühler



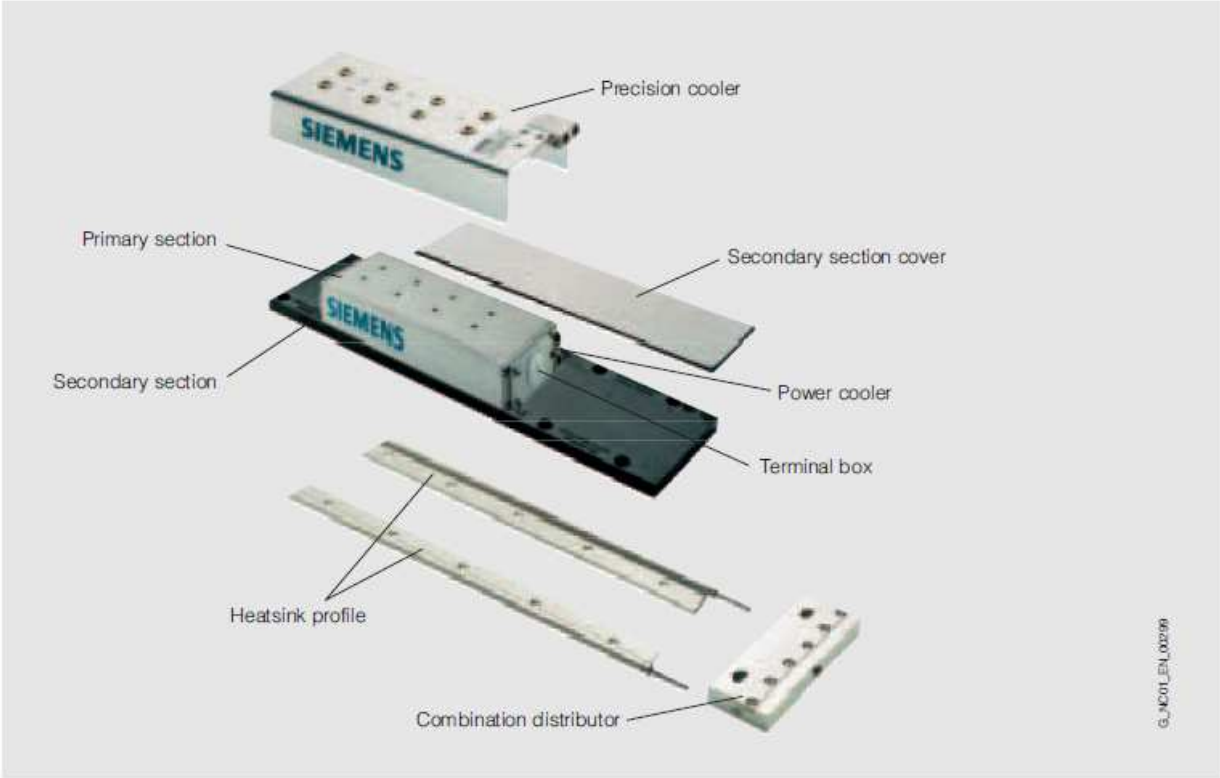


Kennlinien Druckabfall Primärteil-Präzisionskühler und Sekundärteilkühlung





Synchronous motors
Linear motors for SIMODRIVE 611
1FN3 linear motors - standard type with water cooling



Prilog A2 – Tehnički podaci za rotacijski sinkroni servo motor tipa 1FT6 062-6WK7 - vodeno hlađen – motor rotacijskog modula

Synchronous motors

Servo motors for SIMODRIVE 611

Introduction

Overview

	1FT6	1FK7 CT Compact 1FK7 HD High Dynamic	1FN3 linear motors
Speed	1500 ... 6000 rpm	3000 ... 6000 rpm	58 ... 836 m/min (190.3 ... 2743.3 ft/min)[1]
Standstill torque M_0	0.4 ... 175 Nm (3.5 ... 1548.8 lb_f-in)	0.85 ... 48 Nm (7.5 ... 424.8 lb_f-in) (1FK7 CT) 1.3 ... 22 Nm (11.5 ... 194.7 lb_f-in) (1FK7 HD)	–
Rated force F_{rated}	–	–	200 ... 8100 N (45 ... 1821 lb_f)
Overload capability up to max.	4 x M_0	3 x M_0	2.75 x F_{rated}
Encoder system	• Incremental encoder sin/cos 1 V_{pp} • Absolute encoder with EnDat interface • Resolver		Linear scale (enclosed or open) • Incremental encoder sin/cos 1 V_{pp} • Absolute encoder with EnDat interface
Sound pressure level EN ISO 1680	55 ... 74 dB (A)		–
Degree of protection EN 60034-5 (IEC 60034-5)	IP64 ... IP68	IP64, IP65, additional drive end flange IP67	IP65
Cooling	Natural cooling Forced ventilation Water cooling	Natural cooling	Water cooling
Insulation of the stator winding EN 60034-1 (IEC 60034-1)	Temperature class F for a winding temperature of ΔT = 100 K at an ambient temperature of +40 °C (+104 °F)		Temperature class H for a coolant temperature of +120 °C (+248 °F)
	For water cooling max. inlet temperature +30 °C (+86 °F)	–	Inlet temperature of coolant max. +35 °C (+95 °F)
Holding brake	Built-on (option)		–
Type of motor	Permanent magnet excited synchronous motor, 3-phase		Permanent magnet excited synchronous linear motor, 3-phase
Paint finish	Anthracite	Unpainted, anthracite (option)	Unpainted
Mounted gearing	Planetary gearbox	Planetary gearbox	–
Planetary gearbox	i = 4 ... 10 (1-speed) i = 16 ... 50 (2-speed)	i = 5, i = 10 (1-speed)	–

Application

There are many fields of application for the 1FT6/1FK7/1FN3 motors. In the case of machine tools, these motors are known as feed motors and are used as such.

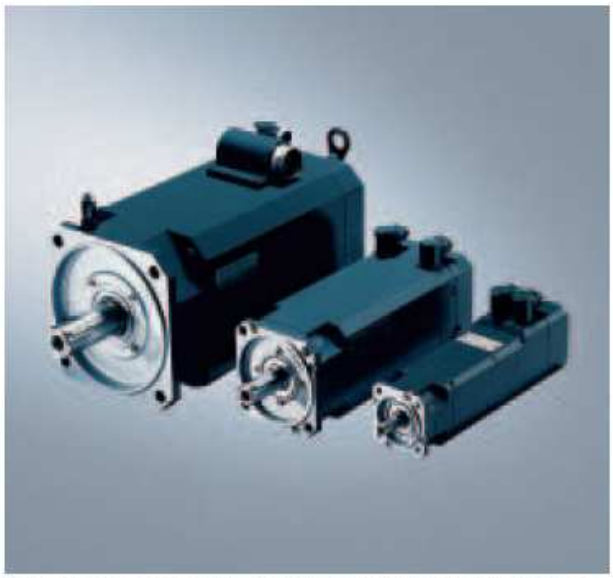
For production machines, such as printing, packaging and textile machines, the motors are designated as synchronous servomotors. In this description, the motors are generally designated as synchronous motors due to their principle of operation.

Core types can be supplied for certain motor types. These core types have several advantages over the standard types: shorter delivery time and faster spare parts supply. For this reason, core types should be used for configuration wherever possible.

Synchronous motors
Servo motors for SIMODRIVE 611

1FT6 motors

Overview



1FT6 motors are permanent magnet excited synchronous motors with compact dimensions.

1FT6 motors with built-in encoders are suitable for use with the SIMODRIVE 611 digital/universal HR converter system.

The fully digital control system of the SIMODRIVE 611 converter and the encoder technology of the 1FT6 motors fulfill the highest demands in terms of dynamic performance, speed setting range, and rotational and positioning accuracy.

The motors are primarily designed for operation without external cooling, and the heat is dissipated through the motor surface. The heat generated in the stator winding and stator core can be directly dissipated via the good thermal coupling to the motor enclosure. The concept of brushless, permanent magnet excited synchronous motors shows its special merits here.

Benefits

- Short non-productive times thanks to high dynamic performance
- Power and signal connections for use in severely contaminated areas
- Easy installation thanks to reduced cabling overhead
- High resistance to lateral force

Application

- Machines with high requirements in terms of dynamic performance and precision
- Packaging machinery
- Shelf access equipment
- Woodworking
- Handling equipment
- Printing machines

Technical data

1FT6 motors	
Type of motor	Permanent magnet excited synchronous motor
Magnet material	Rare-earth magnet material
Insulation of the stator winding to EN 60034-1 (IEC 60034-1)	Temperature class F for a winding temperature of ΔT = 100 K at an ambient temperature of +40 °C (+104 °F). For water cooling max. inlet temperature +30 °C (+86 °F)
Type according to EN 60034-7 (IEC 60034-7)	IM B5 (IM V1, IM V3) IM B14 (IM V18, IM V19)
Degree of protection according to EN 60034-5 (IEC 60034-5)	IP64 standard type, IP65 core type
Cooling	Natural cooling, forced ventilation, water cooling
Temperature monitoring	KTY 84 temperature sensor in stator winding
Paint finish	Anthracite
2nd rating plate	Enclosed separately
Shaft extension on the drive end to DIN 748-3 (IEC 60072-1)	Plain shaft
Rotational accuracy, concentricity and linear movement in accordance with DIN 42955 (IEC 60072-1)	Tolerance N (normal)
Vibration severity to EN 60034-14 (IEC 60034-14)	Grade N (normal)
Max. sound pressure level to EN ISO 1680	Natural cooling/water cooling 1FT602. – 1FT604.: 55 dB (A) 1FT606. – 1FT610.: 65 dB (A) 1FT613. : 70 dB (A) Forced ventilation: 1FT608. – 1FT610.: 70 dB (A) 1FT613. : 74 dB (A)
Built-in encoder systems	• Incremental encoder sin/cos 1 V_{pp}, 2048 pulses/revolution • Absolute encoder, multiturn, 2048 pulses/revolution with 1FT603 to 1FT613, 512 pulses/revolution with 1FT602 and traversing range 4096 revolutions with EnDat interface • Multipole resolver [2] (number of poles corresponds to number of pole pairs of the motor) • Resolver 2-pole
Connection	Connectors for signals and power
Options	• Shaft extension on the drive extension with fitted key and keyway (half-key balancing) • Built-in holding brake • Degree of protection IP67, IP68 M5 sealing air connection present (except with forced ventilation) • Planetary gearboxes, built-on (requirement: plain shaft end and vibration severity grade N)

1)

Supply voltage of the SIMODRIVE 611 converter system	
3 AC 400 V ±10% (i. e. $V_{DC\ link} \leq 600$ V)	3 AC 480 V +6%, -10% (i. e. $V_{DC\ link}$ = 680 V)
Utilization of the 1FT6 motors up to ΔT = 100 K.	Utilization of the 1FT6 motors up to ΔT = 100 K.

2) With SIMODRIVE 611 universal HR, the maximum operating frequency of 432 Hz must be complied with.

Synchronous motors
Servo motors for SIMODRIVE 611
1FT6 motors - standard type with water cooling

Selection and ordering data

Rated speed n_{rated} rpm	Shaft height	Rated power P_{rated} at ΔT=100 K kW (HP)	Standstill torque M_0 at ΔT=100 K Nm (lb_f-in)	Rated torque M_{rated} at ΔT=100 K Nm (lb_f-in)	Rated current I_{rated} at ΔT=100 K A	1FT6 synchronous motors Water cooling [1][2] Order No. Standard type	Number of pole pairs	Rotor moment of inertia (without brake) J 10^{-4} kgm² (lb_f-in-s²)	Weight (without brake) m kg (lb)
1500	100	18.2 (24.4)	119 (1053.3)	116 (1026.7)	43	**1FT6 108-8WB7 ■ - ■ ■ ■ ■**	4	260 (0.2301)	61.5 (135.6)
2000	100	17.2 (23.06)	85 (752.3)	82 (725.8)	60	**1FT6 105-8WC7 ■ - ■ ■ ■ ■**	4	168 (0.1487)	45.5 (100.3)
		24.1 (32.31)	119 (1053.3)	115 (1017.8)	57	**1FT6 108-8WC7 ■ - ■ ■ ■ ■**	4	260 (0.2301)	61.5 (135.6)
3000	63	3.2 (4.29)	10.2 (90.3)	10 (88.5)	6.9	**1FT6 062-6WF7 ■ - ■ ■ ■ ■**	3	8.5 (0.0075)	9.5 (20.9)
		5.1 (6.84)	16.2 (143.4)	16 (141.6)	10.3	**1FT6 064-6WF7 ■ - ■ ■ ■ ■**	3	13 (0.0115)	12.5 (27.6)
	80	11.0 (14.75)	35 (309.8)	35 (309.8)	27	**1FT6 084-8WF7 ■ - ■ ■ ■ ■**	4	48 (0.0425)	21 (46.3)
		14.5 (19.44)	47 (416)	46 (407.1)	37	**1FT6 086-8WF7 ■ - ■ ■ ■ ■**	4	66.5 (0.0589)	26 (57.3)
	100	24.5 (32.84)	85 (752.3)	78 (690.4)	82	**1FT6 105-8WF7 ■ - ■ ■ ■ ■**	4	168 (0.1487)	45.5 (100.3)
		34.2 (45.84)	119 (1053.3)	109 (964.8)	81	**1FT6 108-8WF7 ■ - ■ ■ ■ ■**	4	260 (0.2301)	61.5 (135.6)
4500	63	4.7 (6.3)	10.2 (90.3)	10 (88.5)	9.6	**1FT6 062-6WH7 ■ - ■ ■ ■ ■**	3	8.5 (0.0075)	9.5 (20.9)
		7.5 (10.05)	16.2 (143.4)	16 (141.6)	15.2	**1FT6 064-6WH7 ■ - ■ ■ ■ ■**	3	13 (0.0115)	12.5 (27.6)
	80	16.5 (22.12)	35 (309.8)	35 (309.8)	39	**1FT6 084-8WH7 ■ - ■ ■ ■ ■**	4	48 (0.0425)	21 (46.3)
		21.2 (28.42)	47 (416)	45 (398.3)	53	**1FT6 086-8WH7 ■ - ■ ■ ■ ■**	4	66.5 (0.0589)	26 (57.3)
6000	63	6.2 (8.31)	10.2 (90.3)	9.8 (87)	12.7	**1FT6 062-6WK7 ■ - ■ ■ ■ ■**	3	8.5 (0.0075)	9.5 (20.9)
		9.9 (13.27)	16.2 (143.4)	15.8 (139.8)	20	**1FT6 064-6WK7 ■ - ■ ■ ■ ■**	3	13 (0.0115)	12.5 (27.6)
	80	21.4 (28.69)	35 (309.8)	34 (300.9)	51	**1FT6 084-8WK7 ■ - ■ ■ ■ ■**	4	48 (0.0425)	21 (46.3)
		27.7 (37.13)	47 (416)	44 (389.4)	58	**1FT6 086-8WK7 ■ - ■ ■ ■ ■**	4	66.5 (0.0589)	26 (57.3)

• Type of construction:	IM B5 IM B14 [3]	1 2
• Connector outlet direction:	Transverse - right (not for 1FT606) Transverse - left (not for 1FT606) Axially NDE Axially DE (1FT6062 only with water connection on side or bottom) [1]	1 2 3 4
• Encoder systems:	Incremental encoder sin/cos 1 V_{pp} 2048 pulses/revolution Absolute encoder EnDat 2048 pulses/revolution Multipole resolver [4] Resolver 2-pole	A E S T

• Shaft extension:	• Radial eccentricity tolerance:	• Holding brake:	
With fitted key and keyway	N	without	A
With fitted key and keyway	N	with	B
With fitted key and keyway	R	without	D
With fitted key and keyway	R	with	E
Plain shaft	N	without	G
Plain shaft	N	with	H
Plain shaft	R	without	K
Plain shaft	R	with	L

• Vibration severity grade:	• Degree of protection:	
N	IP64	0
N	IP65	1
N	IP67	2
N	IP68	6
R	IP64	3
R	IP65	4
R	IP67	5
R	IP68	7

To select the degree of protection and type, see "Selection guide".

Synchronous motors
Servo motors for SIMODRIVE 611
1FT6 motors - standard type with water cooling

Selection and ordering data

Motor type (continued)	Standstill current I_0 at M_0 at ΔT=100 K A	Calculated power P_{calc} [kW] = $M_0 \times n_{rated}/9550$ P_{calc} for M_0 at ΔT=100 K kW (HP)	SIMODRIVE 611 power module Required rated current I_{rated} at M_0 at ΔT=100 K A	Order No.	Power cable, completely screened Motor connection (with brake connection) through power supply connector: Power supply connector Size	Motor cable cross-section [5] mm²	Order No. Prefabricated cable
1FT6 108-8WB7...	43	18.7 (25.07)	56	For ordering data, see "Power Modules" in Section 3	3	4 x 10	6FX ■ ■ 02 -5 ■ A13-....
1FT6 105-8WC7...	58	17.8 (23.86)	56 [6]		3	4 x 16	6FX ■ ■ 02 -5 ■ A23-....
1FT6 108-8WC7...	57	24.9 (33.38)	56 [6]		3	4 x 16	-5 ■ A23-....
1FT6 062-6WF7...	6.9	3.2 (4.29)	9		1	4 x 1.5	6FX ■ ■ 02 -5 ■ A01-....
1FT6 064-6WF7...	10.3	5.1 (6.84)	18		1	4 x 1.5	-5 ■ A01-....
1FT6 084-8WF7...	24.5	11.0 (14.75)	28		1.5	4 x 4	6FX ■ ■ 02 -5 ■ A41-....
1FT6 086-8WF7...	34	14.8 (19.84)	56		1.5	4 x 10	-5 ■ A61-....
1FT6 105-8WF7...	83	26.7 (35.79)	140		3	4 x 25	6FX ■ ■ 02 -5 D A33-....
1FT6 108-8WF7...	86	37.4 (50.13)	140		3	4 x 35	-5 D A43-....
1FT6 062-6WH7...	9.7	4.8 (6.43)	18		1	4 x 1.5	6FX ■ ■ 02 -5 ■ A01-....
1FT6 064-6WH7...	15.4	7.6 (10.19)	18		1	4 x 2.5	-5 ■ A11-....
1FT6 084-8WH7...	37	16.5 (22.12)	56		1.5	4 x 10	6FX ■ ■ 02 -5 ■ A61-....
1FT6 086-8WH7...	52	22.1 (29.62)	56		3	4 x 16	-5 ■ A23-....
1FT6 062-6WK7...	12.9	6.4 (8.58)	18		1	4 x 1.5	6FX ■ ■ 02 -5 ■ A01-....
1FT6 064-6WK7...	20.5	10.2 (13.67)	28		1	4 x 2.5	-5 ■ A11-....
1FT6 084-8WK7...	47	22.0 (29.49)	56		3	4 x 10	6FX ■ ■ 02 -5 ■ A13-....
1FT6 086-8WK7...	59	29.5 (39.54)	70		3	4 x 16	-5 ■ A23-....

Design of the power cable:			
• MOTION-CONNECT 800	8	0	
• MOTION-CONNECT 700 (only with brake cores)	7	0	
• MOTION-CONNECT 500	5	0	
• MOTION-CONNECT 500 PLUS (only up to cross-section of 6 mm²)	5	1	
• Without brake cores			C
• With brake cores			D

For length code as well as power and signal cables, see "MOTION-CONNECT cables and connections".

Notes on water cooling:
- Inlet temperature of the cooling water: max. +30 °C (+86 °F)
- Cooling water throughput: At least 5 l/min
- Pressure ahead of motor: p_{max} = 3 bar
- Cooling water connection: G 3/8"
- Coolant: Water (up to max 25% corrosion protection, recommendation: Tyfocor)
- Loss of pressure between inlet and outlet < 0.1 bar

1) Water connection
   - right side: Order code Q20
   - left side: Order code Q21
   - bottom: Order code Q22
2) Delivered as standard with water connection on top.
3) The same flange as for IM B5 type, but with metric threaded insert in the 4 fixing holes.
4) With SIMODRIVE 611 universal HR, the maximum operating frequency of 432 Hz must be complied with.
5) The current carrying capacity of the power cables corresponds to IEC 60204-1 for type of routing C under continuous operating conditions with an ambient air temperature of +40 °C (+104 °F), designed for I_0 (100 K), PVC/PUR-insulated cable.
6) With the specified power module, the motor cannot be fully utilized after ΔT = 100 K winding overheating. If a larger power module is used, it must be checked that the specified power cable can be connected to the larger power module.

5.3.3 Water-cooled 1FT6 motors

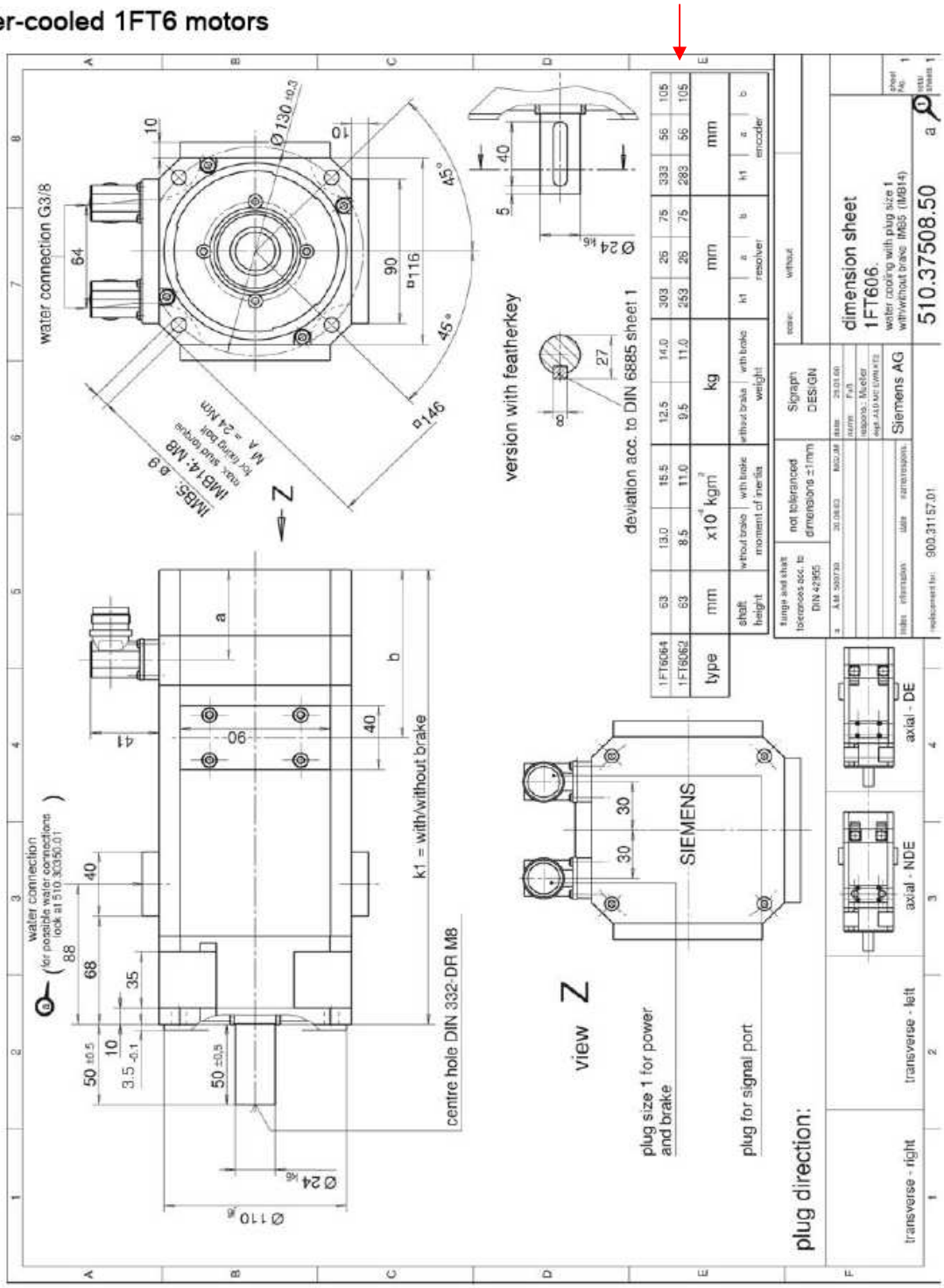


Figure 5-33 1FT606□ water-cooled with connector, Size 1

Prilog A3 – Tehnički podaci za rotacijski sinkroni servo motor tipa 1FT6 024-6AK7 – prirodno hlađen – motor vertikalne pritiskalice

Synchronous motors
Servo motors for SIMODRIVE 611
1FT6 motors - standard type with natural cooling

Selection and ordering data

Rated speed n_{rated} rpm	Shaft height	Rated power P_{rated} at ΔT=100 K kW (HP)	Standstill torque M_0 at ΔT=100 K Nm (lb_f-in)	Rated torque [1] M_{rated} at ΔT=100 K Nm (lb_f-in)	Rated current I_{rated} at ΔT=100 K A	1FT6 synchronous motors Natural cooling Order No. Standard type	Pole pair No.	Rotor moment of inertia (without brake) J 10^{-4} kgm² (lb_f-in-s²)	Weight (without brake) m kg (lb)
6000	28	0.19 (0.25)	0.4 (3.5)	0.3 (2.7)	1.1	**1FT6 021-6AK7 1 - ■ ■ ■ ■**	3	0.21 (0.0002)	1.2 (2.6)
		0.31 (0.42)	0.8 (7.1)	0.5 (4.4)	0.9	**1FT6 024-6AK7 1 - ■ ■ ■ ■**	3	0.34 (0.0003)	2.1 (4.6)
	36	0.47 (0.63)	1 (8.8)	0.75 (6.6)	1.2	**1FT6 031-4AK7 1 - ■ ■ ■ ■**	2	0.65 (0.0006)	3.1 (6.8)
		0.88 (1.18)	2 (17.7)	1.4 (12.4)	2.1	**1FT6 034-4AK7 1 - ■ ■ ■ ■**	2	1.1 (0.0010)	4.4 (9.7)
	48	1.1 (1.47)	2.6 (23)	1.7 (15)	2.4	**1FT6 041-4AK7 1 - ■ ■ ■ ■**	2	2.9 (0.0025)	6.6 (14.6)
		1.9 (2.55)	5 (44.3)	3 (26.6)	4.1	**1FT6 044-4AK7 1 - ■ ■ ■ ■**	2	5.1 (0.0045)	8.3 (18.3)
	63	1.3 (1.74)	4 (35.4)	2.1 (18.6)	3.1	**1FT6 061-6AK7 ■ - ■ ■ ■ ■**	3	6 (0.0053)	8 (17.6)
		1.3 (1.74)	6 (53.1)	2.1 (18.6)	3.2	**1FT6 062-6AK7 ■ - ■ ■ ■ ■**	3	8.5 (0.0075)	9.5 (20.9)
		1.3 (1.74)	9.5 (84.1)	2.1 (18.6)	3.5	**1FT6 064-6AK7 ■ - ■ ■ ■ ■**	3	13 (0.0115)	12.5 (27.6)
	80	2.9 (3.89)	8 (70.8)	4.6 (40.7)	7.7	**1FT6 081-8AK7 ■ - ■ ■ ■ ■**	4	21 (0.0186)	12.5 (27.6)
		3.5 (4.69)	13 (115.1)	5.5 (48.7)	9.1	**1FT6 082-8AK7 ■ - ■ ■ ■ ■**	4	30 (0.0266)	15 (33.1)
		4.1 (5.55)	20 (177)	6.5 (57.5)	9.2	**1FT6 084-8AK7 ■ - ■ ■ ■ ■**	4	48 (0.0425)	20.5 (45.2)

• Type of construction:	IM B5 IM B14 [2] (not for 1FT602, 1FT603, 1FT604)	1 2
• Connector outlet direction:	Transverse - right (not for 1FT603, 1FT604, 1FT606) Transverse - left (not for 1FT603, 1FT604, 1FT606) Axially NDE Axially DE	1 2 3 4
• Encoder systems:	Incremental encoder sin/cos 1 V_{pp} 2048 pulses/revolution Absolute encoder EnDat 2048 pulses/revolution [1][3] Absolute encoder EnDat 512 pulses/revolution [1][4] Multipole resolver [5] Resolver 2-pole	A E H S T

• Shaft extension:	• Radial eccentricity tolerance:	• Holding brake:	
With fitted key and keyway	N	without	A
With fitted key and keyway	N	with	B
With fitted key and keyway	R	without	D
With fitted key and keyway	R	with	E
Plain shaft	N	without	G
Plain shaft	N	with	H
Plain shaft	R	without	K
Plain shaft	R	with	L

• Vibration severity grade:	• Degree of protection:	
N	IP64	0
N [3]	IP65 [3]	1
N	IP67	2
N [3]	IP68 [3]	6
R	IP64	3
R [3]	IP65 [3]	4
R	IP67	5
R [3]	IP68 [3]	7

To select the degree of protection and type, see "Selection guide".

Synchronous motors
Servo motors for SIMODRIVE 611
1FT6 motors - standard type with natural cooling

Selection and ordering data

Motor type (continued)	Standstill current I_0 at M_0 at ΔT=100 K A	Calculated power P_{calc} [kW] = $M_0 \times n_{rated}/9550$ P_{calc} for M_0 at ΔT=100 K kW (HP)	**SIMODRIVE 611 power module** Required rated current I_{rated} at M_0 at ΔT=100 K A	Order No.	**Power cable, completely screened** Motor connection (with brake connection) through power supply connector: Power supply connector Size	Motor cable cross-section [6] mm²	Order No. Prefabricated cable
1FT6 021-6AK7...	1.25	0.3 (0.4)	3	For ordering data, see "Power Modules" in Section 3	1	4 x 1.5	**6FX ■ ■ 02 -5 ■ A01-....**
1FT6 024-6AK7...	1.25	0.5 (0.67)	3		1	4 x 1.5	**-5 ■ A01-....**
1FT6 031-4AK7...	1.4	0.6 (0.8)	3		1	4 x 1.5	**6FX ■ ■ 02 -5 ■ A01-....**
1FT6 034-4AK7...	2.6	1.3 (1.74)	3		1	4 x 1.5	**-5 ■ A01-....**
1FT6 041-4AK7...	3	1.6 (2.14)	3		1	4 x 1.5	**6FX ■ ■ 02 -5 ■ A01-....**
1FT6 044-4AK7...	5.9	3.1 (4.16)	9		1	4 x 1.5	**-5 ■ A01-....**
1FT6 061-6AK7...	5	2.5 (3.35)	5		1	4 x 1.5	**6FX ■ ■ 02 -5 ■ A01-....**
1FT6 062-6AK7...	7.6	3.8 (5.09)	9		1	4 x 1.5	**-5 ■ A01-....**
1FT6 064-6AK7...	12	4.0 (5.36)	18		1	4 x 1.5	**-5 ■ A01-....**
1FT6 081-8AK7...	11.1	5.0 (6.7)	18		1.5	4 x 1.5	**6FX ■ ■ 02 -5 ■ A21-....**
1FT6 082-8AK7...	17.3	8.2 (10.99)	18		1.5	4 x 2.5	**-5 ■ A31-....**
1FT6 084-8AK7...	24.1	12.6 (16.89)	28		1.5	4 x 4	**-5 ■ A41-....**

Design of the power cable:		
• MOTION-CONNECT 800	**8**	**0**
• MOTION-CONNECT 700 (only with brake cores)	**7**	**0**
• MOTION-CONNECT 500	**5**	**0**
• MOTION-CONNECT 500 PLUS (only up to cross-section of 6 mm²)	**5**	**1**

• Without brake cores	**C**
• With brake cores	**D**

For length code as well as power and signal cables, see "MOTION-CONNECT cables and connections".

1) If the absolute encoder is used, M_{rated} is reduced by 10%.
2) The same flange as for IM B5 type, but with metric threaded insert in the 4 fixing holes.
3) Not possible on the 1FT602.
4) Only possible for 1FT602.
5) With SIMODRIVE 611 universal HR, the maximum operating frequency of 432 Hz must be complied with.
6) The current carrying capacity of the power cables corresponds to IEC 60204-1 for type of routing C under continuous operating conditions with an ambient air temperature of +40 °C (+104 °F), designed for I_0 (100 K), PVC/PUR-insulated cable.

5.3 1FT6 without DRIVE-CLiQ

5.3.1 Non-ventilated 1FT6 motors

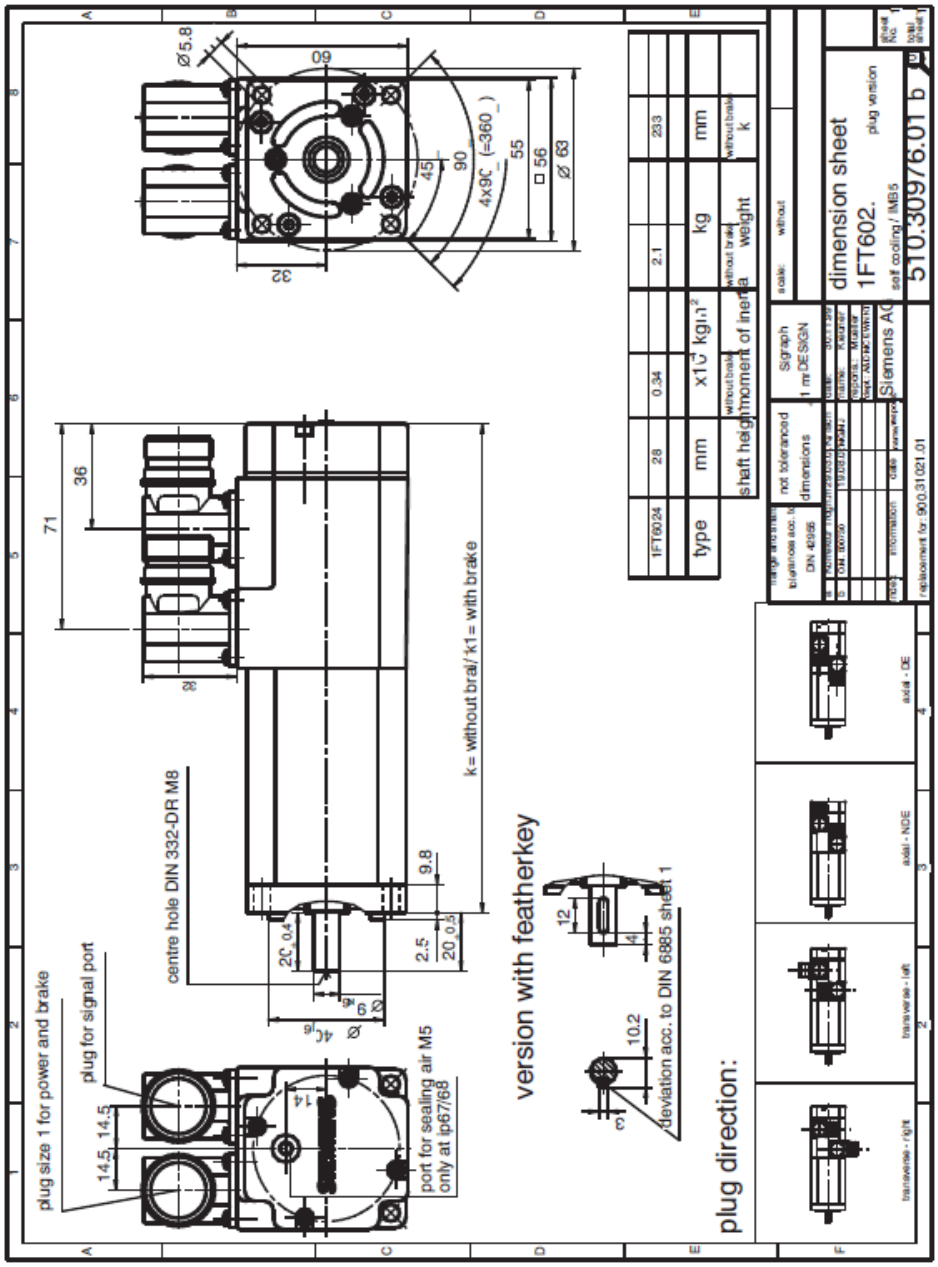


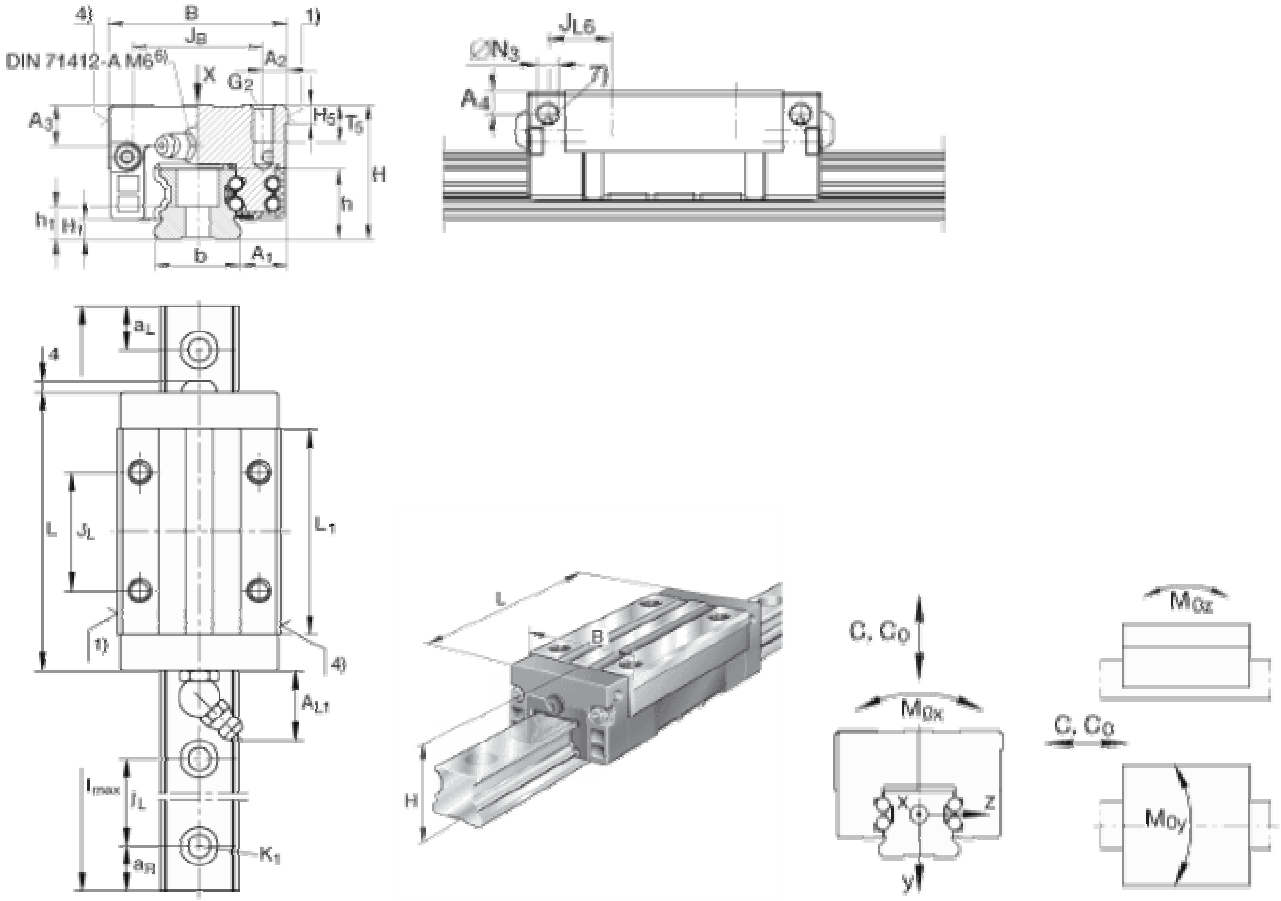
Figure 5-17 1FT602□ non-ventilated with connector, Size 1

B VRETENA, VODILICE I REMENI

Sadržaj B

Prilog B1 – Tehnički podaci za kuglične kotrljajuće vodilice
tipa INA KUVE25-B-KT-SL – vodilice linearnog modula..... 145
Prilog B2 – Tehnički podaci za planetarno navojno vreteno
tipa RGT 8.1.25 KL10 – vreteno pritiskalice..... 147
Prilog B3 – Tehnički podaci za klinasti remen tipa HTD 1120x8Mx50 - za rotacijski modul.... 153

Prilog B1 – Tehnički podaci za kuglične kotrljajuće vodilice tipa INA KUVE25-B-KT-SL – vodilice linearnog modula



H	36 mm	
B	48 mm	
L	107,9 mm	

1)		Locating face
4)		Marking
6)		Lubrication nipple with tapered head to DIN 71 412-B M6, except for KUVE20-B..: to DIN 71 412-B M5 and KUVE15-B..: to DIN 3 405 M3
7)		Lateral lubrication connector
A_1	12,5 mm	
A_2	6,5 mm	
A_3	11 mm	
A_4	6,5 mm	
A_{L1}	19 mm	
$a_{L\ max}$	53 mm	a L and a R are dependent on the length l max of the guideway
$a_{L\ min}$	20 mm	a L and a R are dependent on the length l max of the guideway
$a_{R\ max}$	53 mm	a L and a R are dependent on the length l max of the guideway
$a_{R\ min}$	20 mm	a L and a R are dependent on the length l max of the guideway
b	23 mm	-0,005/-0,03
G_2	M6	For screws to ISO 4762-12.9

		Max. tightening torque in Nm: M3 = 1,5 M4 = 3 M5 = 5,8 M6 = 10 M8 = 24 M10 = 41 M12 = 83 M14 = 140 M16 = 220 If there is a possibility of settling, the fixing screws should be secured against rotation
H_1	5,1 mm	
H_5	5,25 mm	
h	18,7 mm	
h_1	8,7 mm	
l_{max}	1980 mm	Maximum length of single-piece guideways; longer guideways are supplied in several sections and are marked accordingly. Maximum single-piece guideway length of 6 m by agreement.
J_B	35 mm	
J_L	50 mm	
J_{L6}	23,3 mm	
j_L	60 mm	
K_1	M6	For screws to ISO 4762-12.9 Max. tightening torque in Nm: M3 = 2,5 M4 = 5 M5 = 10 M6 = 17 M8 = 41 M12 = 140 M14 = 220 M16 = 340 If there is a possibility of settling, the fixing screws should be secured against rotation
L_1	86,5 mm	
N_3	5,6 mm	
T_5	10 mm	

m_W	0,73 kg	Mass of carriage
m_S	2,7 kg/m	Mass of guideway
C	21100 N	Basic load ratings Calculation of basic load rating according to DIN 636, increased basic dynamic load rating possible on the basis of practical experience.
C_0	47000 N	Basic load ratings Calculation of basic load rating according to DIN 636, increased basic dynamic load rating possible on the basis of practical experience.
M_{0x}	535 Nm	Moment rating
M_{0y}	430 Nm	Moment rating
M_{0z}	410 Nm	Moment rating

Prilog B2 – Tehnički podaci za planetarno navojno vreteno tipa RGT 8.1.25 KL10 – vreteno pritiskalice

Bild 2 INA-Rollengewindetrieb mit geteilter Gewindemutter

Gewindespindel

Gewindespindeln sind aus oberflächengehärtetem Einsatzstahl. Der Flankenwinkel des Gewindes beträgt 90 °. Gewindespindeln in Standardausführung (Tabellenteil S. 10 bis 17) haben einen Nenndurchmesser d_0 von 5 mm bis 20 mm. Sie haben auf der Loslagerseite einen Zapfen und auf der Festlagerseite eine Kombination von Zapfen, Gewinde, Zapfen und Bund. Das Gewinde auf der Festlagerseite ermöglicht das Aufschrauben der Nutmutter. Die Längen der Gewindespindeln sind so abgestuft, daß Hublängen der Gewindemutter von 25 mm bis 1200 mm, abhängig vom Durchmesser, erreicht werden.

Gewindespindeln mit d_0 zwischen 24 mm und 63 mm Durchmesser sind Sonderausführungen. Deren Abmessungen sind durch die nachfolgenden Maßtabellen vorgegeben. Der größtmögliche Spindeldurchmesser d_0 beträgt 250 mm.

Die Enden aller Gewindespindeln sind in Sonderausführung auch nach Kundenzeichnung lieferbar.

Genauigkeit

In Normalausführung (ohne Nachsetzzeichen) entsprechen INA-Rollengewindetriebe der Genauigkeitsklasse 10 nach DIN 69 051, Teil 3 E 6.78. Enger tolerierte Rollengewindetriebe der Genauigkeitsklasse 5 sind auf Wunsch lieferbar (s. Tab.1).

Drehzahl

Die zulässige Drehzahl hängt vom Durchmesser und von der Länge der Gewindespindel sowie von der Art der Lagerung ab. Bei sachgemäßer Schmierung sind Drehzahlen erreichbar, die etwa 3mal so hoch sind wie die von Kugelgewindetrieben.

Tabelle 1 · Genauigkeitsklassen

Genauigkeitsklasse	Steigungstoleranz[1)]
KL 10 (normal)	±0,01 mm
KL 5	±0,005 mm

[1)] Abweichung auf 300 mm Gewindelänge

Bezeichnungsschlüssel für Standardausführung

RGT X. X. XXX KLXX

- KLXX – Genauigkeitsklasse
- XXX – Hub H
- X. – Steigung des Gewindes P_z
- X. – Nenndurchmesser der Spindel d_0
- RGT – Baureihe

Bestellbeispiel

Für einen Koordinatentisch wird ein Rollengewindetrieb in Normalausführung benötigt. Folgende Daten sind vorgegeben:

Nenndurchmesser der Gewindespindel $d_0 = 8$ mm

Steigung der Gewindespindel $P_z = 5$ mm

Hub der Gewindespindel $H = 100$ mm

Genauigkeitsklasse KL 10

Somit lautet die Bezeichnung für den beschriebenen INA-Rollengewindetrieb:

RGT 8.5.100 KL10

Einbautoleranzen

Sichere Funktion und hohe Gebrauchsdauer setzen genauen Einbau des Rollengewindetriebs voraus. Richtwerte für die Einbautoleranzen der Wälzmutter sind in Bild 3 angegeben.

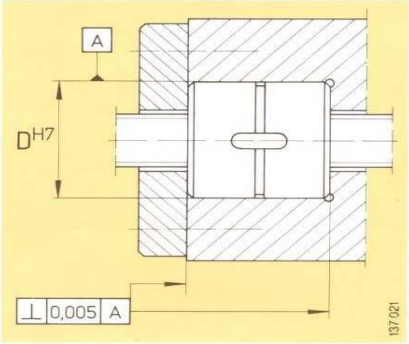


Bild 3 Einbautoleranzen

Sonderausführungen

INA-Rollengewindetriebe sind auf Wunsch in folgenden Sonderausführungen lieferbar:

- Gewindemutter ungeteilt (nicht vorspannbar, höhere Tragzahl, geringes Axialspiel)
- Gewindemutter mit Anschraubflansch, mittig oder seitlich angeordnet

INA-Rollengewindetriebe sind auf Wunsch mit

- Linksgewinde
- zölliger Steigung
- Hohlspindel

lieferbar.

Wirken aggressive Medien auf den Rollengewindetrieb, sollte die Ausführung in korrosionsbeständigem Werkstoff gewählt werden; bitte anfragen.

Abstreifer

Sind Rollengewindetriebe grobem Schmutz ausgesetzt, kann die Gewindemutter auf Wunsch mit Abstreifern ausgerüstet werden.

Bild 4 Axial-Schrägkugellager ZKLN...2RS

Bild 6 Axial-Schrägkugellager ZKLF...2RS

Bild 7 Nadellager NK

Komplette Lagereinheiten mit INA-Rollengewindetrieben

Abgestimmt auf die beschriebenen Rollengewindetriebe bietet INA ergänzende Lagerelemente, die, gemeinsam mit den Rollengewindetrieben, komplette Linearsysteme bilden. Sie optimieren Nutzen und Eigenschaften der Rollengewindetriebe. Ein komplettes System besteht aus:

- Rollengewindetrieb RGT
- Festlager, Bild 4, 6
- Loslager, Bild 7
- Dichtringen
- Nutmutter, Bild 8

Nutmutter

INA liefert zum Spindelschaft passende Nutmuttern der Baureihen ZM in Präzisionsausführung. Mit diesen Nutmuttern wird das Festlager vorgespannt. Gewinde und Planfläche werden in einer Aufspannung geschliffen. Dadurch wird eine Planlauftoleranz von 2 µm erzielt. Verdrehgesicherte Druckstücke, mit denen die Klemmstiftschrauben unterlegt sind, werden bereits vor dem Gewindeschleifen in die Nutmutter eingesetzt und erhalten dadurch an der Unterseite das gleiche Gewindeprofil. Diese Konterung gewährleistet höchstmögliche Sicherheit vor Beschädigung des Gewindes, da die Preßkraft gleichmäßig auf die Gewindeflanken verteilt wird.

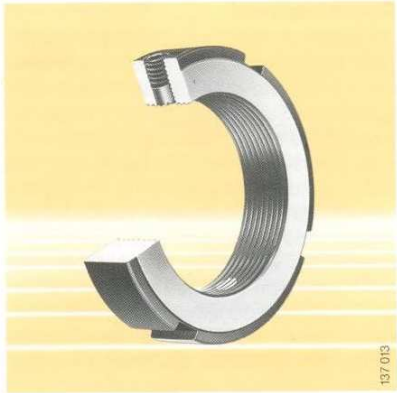
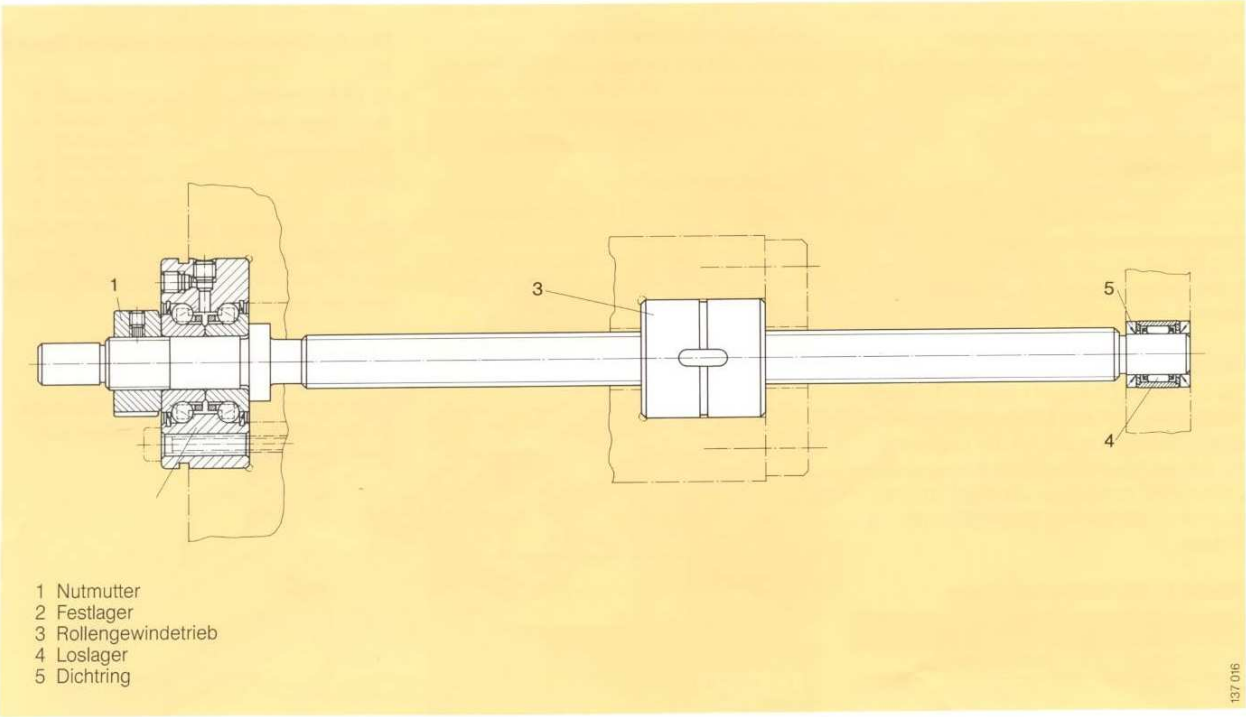


Bild 8 Nutmutter ZM



Tragfähigkeit und Lebensdauer

Rollengewindetriebe sind zur Aufnahme von axial wirkenden Betriebslasten geeignet. Als Maß für die Tragfähigkeit werden bei der Dimensionierung die in den Maßtabellen angegebenen Tragzahlen verwendet, wobei für bewegte Gewindetriebe (dynamische Belastung) die dynamische Tragzahl, für Gewindetriebe ohne oder mit selten auftretender Bewegung (statische Belastung), die statische Tragzahl maßgebend ist.

Nominelle Lebensdauer

Die nominelle Lebensdauer eines Rollengewindetriebes wird in Anlehnung an die Wälzlagertechnik nach den hier üblichen Lebensdauerformeln berechnet.

$$L = \left(\frac{C}{P_a}\right)^3 \quad (1)$$

$$L_h = \frac{16\,666}{n} \cdot \left(\frac{C}{P_a}\right)^3 \quad (2)$$

Bei Hubbetrieb finden nachfolgende Formeln Anwendung:

$$L_s = \frac{P_z}{100} \cdot \left(\frac{C}{P_a}\right)^3 \quad (3)$$

$$L_h = \frac{8{,}33 \cdot P_z}{H \cdot n_{osz}} \cdot \left(\frac{C}{P_a}\right)^3 \quad (4)$$

L 10^6 Umdr.
nominelle Lebensdauer in Millionen Umdrehungen, die von 90 % einer genügend großen Menge gleicher Rollengewindetriebe erreicht oder überschritten wird, bevor die ersten Anzeichen einer Werkstoffermüdung auftreten.

L_h h
nominelle Lebensdauer in Betriebsstunden, entsprechend der Definition für L

L_s 10^5m
nominelle Lebensdauer in 10^5m Verschiebeweg, entsprechend der Definition für L

C N
dynamische Tragzahl

P_a N
axiale äquivalente Belastung

n min^{-1}
äquivalente Drehzahl

H m
einfache Hublänge der oszillierenden Bewegung

n_{osz} min^{-1}
Frequenz der Hin- und Herbewegung

P_z mm
Spindelsteigung

Äquivalente Belastung und Drehzahl

Liegt eine mit der Zeit veränderliche, aber für bestimmte Zeitintervalle annähernd konstante Betriebslast F und Drehzahl n vor, so werden die Betriebsgrößen n und P_a in den Lebensdauergleichungen (1), (2), (3) und (4) nach folgenden Beziehungen ermittelt:

Äquivalente Belastung

$$P_a = \sqrt[3]{\frac{q_1 \cdot n_1 \cdot F_1^3 + q_2 \cdot n_2 \cdot F_2^3 + \ldots + q_z \cdot n_z \cdot F_z^3}{q_1 \cdot n_1 + q_2 \cdot n_2 + \ldots + q_z \cdot n_z}} \quad (5)$$

Äquivalente Drehzahl

$$n = \frac{q_1 \cdot n_1 + q_2 \cdot n_2 + \ldots + q_z \cdot n_z}{100} \quad (6)$$

$F_{1...z}$ N
unveränderliche Betriebslast im Zeitabschnitt

$n_{1...z}$ min^{-1}
unveränderliche Drehzahl im Zeitabschnitt

$q_{1...z}$ %
Wirkungsdaueranteil

Statische Tragsicherheit

Die statische Tragsicherheit gibt die Sicherheit gegen die zulässigen bleibenden Verformungen im Rollengewindetrieb an. Sie wird wie folgt bestimmt:

$$S_0 = \frac{C_0}{F_0} \quad (7)$$

S_0 –
statische Tragsicherheit

C_0 N
statische Tragzahl. Dies ist die zentrisch wirkende Axiallast, die an den Berührungsstellen der Gewindeflanken eine Hertz'sche Pressung von 4000 N/mm^2 hervorruft.

F_0 N
maximale Axiallast

Die statische Tragsicherheit kann man um so kleiner wählen, je genauer die auftretenden Kräfte, vornehmlich die Spitzenwerte, bekannt sind. Sie muß um so größer gewählt werden, je höher die Anforderungen hinsichtlich Laufruhe und Lebensdauer eines Rollengewindetriebes sind. In Anwendungen, bei denen hohe Anforderungen an die Präzision gestellt werden, sollte dieser Faktor den Wert 4 nicht unterschreiten. Die zulässige Knickbelastung (siehe Seite 9) ist dabei zu berücksichtigen.

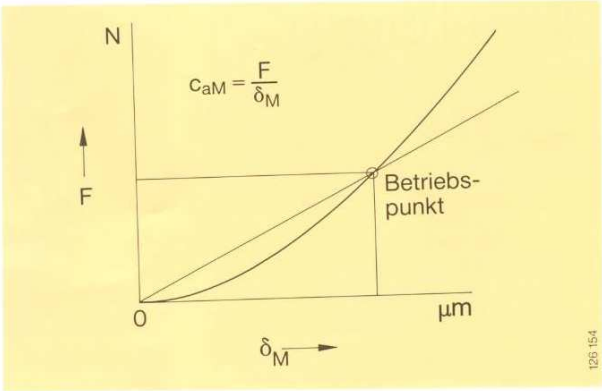


Bild 9 Federkennlinie der Gewindemutter

Steifigkeit

Wirkt eine Betriebslast auf den Rollengewindetrieb, treten an allen lastübertragenden Elementen elastische Verformungen auf. Die Gesamtverformung errechnet sich im wesentlichen aus der Steifigkeit der Gewindemutter, der Gewindespindel und der Lagerung.

$$\delta_{ges} = F \left(\frac{1}{c_{aM}} + \frac{1}{c_{aS}} + \frac{1}{c_{aL}} \right) \qquad (8)$$

δ_{ges} µm
Gesamtverformung im Rollengewindetrieb

F N
Axiale Betriebslast

c_{aM} N/µm
Steifigkeit der Gewindemutter (linearisiert)

c_{aS} N/µm
Steifigkeit der Gewindespindel

c_{aL} N/µm
Steifigkeit der Spindellagerung

Die Steifigkeit der Gewindemutter c_{aM} ist aufgrund der nichtlinearen Federung im Berührungskontakt der Gewindeflanken von der Belastung abhängig.

$$c_{aM} = c_K \cdot F^{1/3} \qquad (9)$$

c_{aM} N/µm
lineare Steifigkeit der Gewindemutter im Betriebspunkt

c_K $N^{2/3}/\mu m$
Federkennzahl, siehe Maßtabelle

F N
axiale Betriebslast

Die Steifigkeit der Gewindespindel c_{aS} ist von der Art der Lagerung und Position der Gewindemutter abhängig:

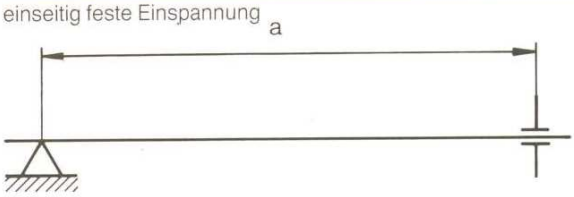
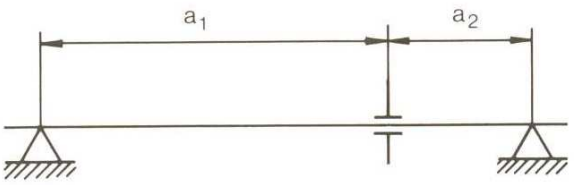
$$c_{aS} = 165 \cdot k_s \cdot d_0^2 \qquad (10)$$

k_S mm^{-1}
Beiwert nach Tabelle 2

d_0 mm
Nenndurchmesser der Gewindespindel (siehe Maßtabelle)

Die Lagersteifigkeit c_{aL} ist für INA-Axial-Schrägkugellager in den Maßtabellen, Seite 23 angegeben.

Tabelle 2 · Beiwert k_s

Spindellagerung	k_S
einseitig feste Einspannung 	$\frac{1}{a}$
beidseitig feste Einspannung 	$\left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2}\right)$

Antriebsmoment

Um mit dem Rollengewindetrieb eine Axialkraft F zu erzeugen, wird ein Antriebsmoment M_t benötigt.

$$M_t = \frac{F \cdot P_z}{2 \cdot \pi \cdot \eta_1} \cdot 10^{-3} \qquad (11)$$

mit

$$\eta_1 = \frac{1}{1 + \frac{k_R \cdot d_0}{P_z}} \qquad (12)$$

M_t Nm
Antriebsmoment

F N
Axiallast

P_z mm
Spindelsteigung (siehe Maßtabelle)

η_1 –
Wirkungsgrad für die Umwandlung von Dreh- in Linearbewegung

d_0 mm
Nenndurchmesser der Gewindespindel (siehe Maßtabelle)

k_R –
Reibungsabhängiger Beiwert (Mittelwert 0,038)

Um den Rücklauf eines Rollengewindetriebes unter der Axiallast F zu verhindern, ist das Haltemoment M_H aufzubringen.

$$M_H = \frac{F \cdot P_z \cdot \eta_2}{2 \cdot \pi} \cdot 10^{-3} \qquad (13)$$

mit

$$\eta_2 = 1 - \frac{k_R \cdot d_0}{P_z} \qquad (14)$$

M_H Nm
Haltemoment

η_2 –
Wirkungsgrad für die Umwandlung von Linear- in Drehbewegung

Spindelknickung

Eine Gewindespindel, die auf Druck belastet wird, ist auf Knickung zu überprüfen. Die zulässige Druckkraft, die axial über die Mutter in ihrer ungünstigsten Stellung auf die Spindel wirken darf, errechnet sich aus

$$F_{zul} = \frac{k_K \cdot d_0^4}{a^2} \cdot 10^4 \qquad (15)$$

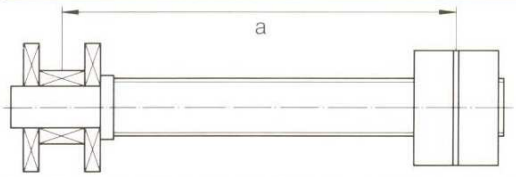
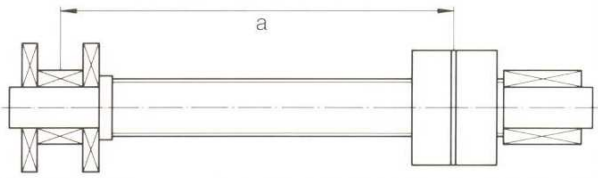
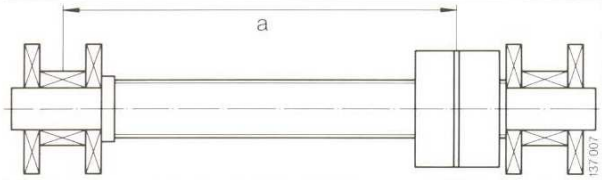
F_{zul} N
zulässige Drucklast

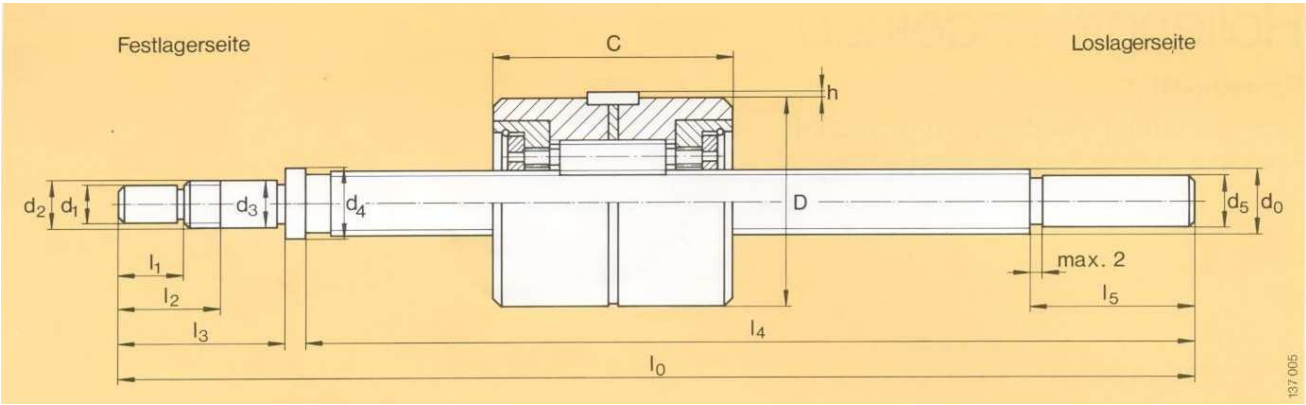
d_0 mm
Nenndurchmesser der Gewindespindel (siehe Maßtabelle)

a mm
freie Knicklänge nach Tabelle 3

k_K N/mm²
von der Art der Spindellagerung abhängiger Beiwert nach Tabelle 3

Tabelle 3 · Beiwert k_K

Art der Spindellagerung	k_K
	0,84
	7,0
	13,7



Maßtabelle · Abmessungen in mm

Nenn-durch-messer d_0	Kurzzeichen				Gewicht	Abmessungen · Spindel										
		d_0	Stei-gung P_z	Hub H	kg	d_1 h6	d_2	d_3 –0,005	d_4	d_5 h6	l_0	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5
5	RGT	5.	1.	25	0,084	5	M6×0,5	6	10	4	113	11	22	34	75	14
	RGT	5.	1.	50	0,088	5	M6×0,5	6	10	4	138	11	22	34	100	14
	RGT	5.	1.	75	0,092	5	M6×0,5	6	10	4	163	11	22	34	125	14
	RGT	5.	1.	100	0,096	5	M6×0,5	6	10	4	188	11	22	34	150	14
8	RGT	8.	1.	25	0,11	5	M6×0,5	6	10	6	120	11	22	34	82	16
	RGT	8.	1.	50	0,121	5	M6×0,5	6	10	6	145	11	22	34	107	16
	RGT	8.	1.	100	0,141	5	M6×0,5	6	10	6	195	11	22	34	157	16
	RGT	8.	1.	150	0,16	5	M6×0,5	6	10	6	245	11	22	34	207	16
	RGT	8.	1.	200	0,18	5	M6×0,5	6	10	6	295	11	22	34	257	16
	RGT	8.	2.	25	0,11	5	M6×0,5	6	10	6	120	11	22	34	82	16
	RGT	8.	2.	50	0,121	5	M6×0,5	6	10	6	145	11	22	34	107	16
	RGT	8.	2.	100	0,141	5	M6×0,5	6	10	6	195	11	22	34	157	16
	RGT	8.	2.	150	0,16	5	M6×0,5	6	10	6	245	11	22	34	207	16
	RGT	8.	2.	200	0,18	5	M6×0,5	6	10	6	295	11	22	34	257	16
	RGT	8.	4.	25	0,11	5	M6×0,5	6	10	6	120	11	22	34	82	16
	RGT	8.	4.	50	0,121	5	M6×0,5	6	10	6	145	11	22	34	107	16
	RGT	8.	4.	100	0,141	5	M6×0,5	6	10	6	195	11	22	34	157	16
	RGT	8.	4.	150	0,16	5	M6×0,5	6	10	6	245	11	22	34	207	16
	RGT	8.	4.	200	0,18	5	M6×0,5	6	10	6	295	11	22	34	257	16
	RGT	8.	5.	25	0,11	5	M6×0,5	6	10	6	120	11	22	34	82	16
	RGT	8.	5.	50	0,121	5	M6×0,5	6	10	6	145	11	22	34	107	16
	RGT	8.	5.	100	0,141	5	M6×0,5	6	10	6	195	11	22	34	157	16
	RGT	8.	5.	150	0,16	5	M6×0,5	6	10	6	245	11	22	34	207	16
	RGT	8.	5.	200	0,18	5	M6×0,5	6	10	6	295	11	22	34	257	16

[1] Grenzdrehzahl des Rollengewindetriebes. Kritische Spindeldrehzahl n_{max} und Grenzdrehzahl der Wälzlager beachten.

Mutter			Paßfeder DIN 6885	Tragzahlen		Feder-kennzahl	Grenz-drehzahl[1]	Festlager	Loslager	Dichtring	Nutmutter
D g6	h	C h12		dyn. C N	stat. C_0 N	c_K $N^{2/3}/\mu m$	$n_{g\,Fett}$ min^{-1}				
19	1,3	31	3×3×10	5300	5400	27	6000	ZKLN 0624.2RS	HK 0408 TN	G4×8×2	ZM 06
19	1,3	31	3×3×10	5300	5400	27	6000	ZKLN 0624.2RS	HK 0408 TN	G4×8×2	ZM 06
19	1,3	31	3×3×10	5300	5400	27	6000	ZKLN 0624.2RS	HK 0408 TN	G4×8×2	ZM 06
19	1,3	31	3×3×10	5300	5400	27	6000	ZKLN 0624.2RS	HK 0408 TN	G4×8×2	ZM 06
21	1,3	31	3×3×10	3100	3950	31	5800	ZKLN 0624.2RS	NK 6/10 TN	G6×12×2	ZM 06
21	1,3	31	3×3×10	3100	3950	31	5800	ZKLN 0624.2RS	NK 6/10 TN	G6×12×2	ZM 06
21	1,3	31	3×3×10	3100	3950	31	5800	ZKLN 0624.2RS	NK 6/10 TN	G6×12×2	ZM 06
21	1,3	31	3×3×10	3100	3950	31	5800	ZKLN 0624.2RS	NK 6/10 TN	G6×12×2	ZM 06
21	1,3	31	3×3×10	3100	3950	31	5800	ZKLN 0624.2RS	NK 6/10 TN	G6×12×2	ZM 06
21	1,3	31	3×3×10	6200	4550	21	5800	ZKLN 0624.2RS	NK 6/10 TN	G6×12×2	ZM 06
21	1,3	31	3×3×10	6200	4550	21	5800	ZKLN 0624.2RS	NK 6/10 TN	G6×12×2	ZM 06
21	1,3	31	3×3×10	6200	4550	21	5800	ZKLN 0624.2RS	NK 6/10 TN	G6×12×2	ZM 06
21	1,3	31	3×3×10	6200	4550	21	5800	ZKLN 0624.2RS	NK 6/10 TN	G6×12×2	ZM 06
21	1,3	31	3×3×10	6200	4550	21	5800	ZKLN 0624.2RS	NK 6/10 TN	G6×12×2	ZM 06
21	1,3	31	3×3×10	12200	4800	15	5800	ZKLN 0624.2RS	NK 6/10 TN	G6×12×2	ZM 06
21	1,3	31	3×3×10	12200	4800	15	5800	ZKLN 0624.2RS	NK 6/10 TN	G6×12×2	ZM 06
21	1,3	31	3×3×10	12200	4800	15	5800	ZKLN 0624.2RS	NK 6/10 TN	G6×12×2	ZM 06
21	1,3	31	3×3×10	12200	4800	15	5800	ZKLN 0624.2RS	NK 6/10 TN	G6×12×2	ZM 06
21	1,3	31	3×3×10	12200	4800	15	5800	ZKLN 0624.2RS	NK 6/10 TN	G6×12×2	ZM 06
21	1,3	31	3×3×10	15200	4800	13	5800	ZKLN 0624.2RS	NK 6/10 TN	G6×12×2	ZM 06
21	1,3	31	3×3×10	15200	4800	13	5800	ZKLN 0624.2RS	NK 6/10 TN	G6×12×2	ZM 06
21	1,3	31	3×3×10	15200	4800	13	5800	ZKLN 0624.2RS	NK 6/10 TN	G6×12×2	ZM 06
21	1,3	31	3×3×10	15200	4800	13	5800	ZKLN 0624.2RS	NK 6/10 TN	G6×12×2	ZM 06
21	1,3	31	3×3×10	15200	4800	13	5800	ZKLN 0624.2RS	NK 6/10 TN	G6×12×2	ZM 06

Prilog B3 – Tehnički podaci za klinasti remen tipa HTD 1120x8Mx50 - za rotacijski modul

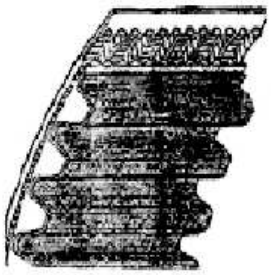
M.E.C. SYNCHRONOUS TIMING BELT® HTD®
for industrial transmission

Discount Ref. 11 Group D

HTD® MEANS HIGH TORQUE DRIVE

The synchronous HTD® belts are characterised by a new profile (rounded notched) which make it possible to transmit more power with the same pitch as traditional synchronous notched belts. To this the following advantages are added:
Reduction of noise and interference, increased resistance against notched being skipped and shearing stress, precise angular transmission and constant speed up to 50 mt/sec. , low tensioning, excellent reliability, compact dimensions and moderate maintenance.

M.E.C. SYNCHRONOUS TIMING BELT® STD®
for industrial transmission



STD® MEANS HIGH TORQUE DRIVE

In addition to the advantage above indicated for HTD® belts the following advantages are added:

a) longer life thanks to the new profile edge and to a higher quality of the material used for the belt manufacture.
b) Temperature resistance between –40° and 100°C, resistance to atmospheric agents and moderately to the oil
c) No noise
d) Moderate maintenance
e) These belts permit the synchrony transmission, made in the past by means of chain , and therefore high power transmission with low revolution number.

Classification of M.E.C. TIMING BELT® HTD® and STD®

M.E.C. TIMING BELT® HTD® and STD® , identified by commercial names, are available in the following pitch diameters and standard widths.

Pitch code	Commercial name	Pitch mm	Notch thickness mm	Tot. thickness mm	Standard Widths mm
5	3 M	3	1,2	2,4	6-9-15
6	5 M	5	2,1	3,6	9-15-25
7	8 M	8	3,3	5,6	20-30-50-85
3	8 MS	8	3	5,3	20-30-50-85
8	14 M	14	6,1	10	40-55-85-115-170
9	20 M	20	9	13,2	115-170-230-290-340

Identification of M.E.C. TIMING BELT® HTD® and STD® belts

M.E.C. TIMING BELT® HTD® belts are identified by their pitch length in mm , pitch diameter in mm, and width in mm.
Example:
A belt with a pitch length of 960 mm, pitch diameter of 8 mm and a width of 50 mm is described as follows :

960 8M 50

M.E.C. TIMING BELT® HTD® and STD® TOLERANCE

Tables A, B, C show respectively the width, developement and thickness telerances of the M.E.C. TIMING BELT HTD and STD.

Table A - Width tolerance of M.E.C. TIMING BELT 3-5-8-14 M HTD and 8M super STD

Width in mm		Width Tolerance (mm)		
Over	Up to	Up to 800 mm pitch length	Up to 800 mm over 1760 mm pitch length	Over 1760 mm pitch length
-	9	+ 0,4 - 0,8	+ 0,4 - 0,8	- -
9	40	± 0,8	+ 0,8 - 1,2	+ 0,8 - 1,2
40	50	+ 0,8 - 1,2	± 1,2	+ 1,2 - 1,5
50	85	+ 1,2	± 1,5	+ 1,5 - 2,0
85	170	± 1,5	+ 1,5 - 2	± 2 - 1,2
>170			± 4,8	± 4,8

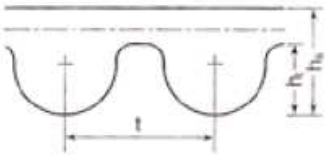
Tolerance of width of 20M type belts is 8 mm for any width or development

Table B - tolerance on development of M.E.C. TIMING BELT HTD and STD belts

Belt width in mm		Tolerance mm	Belt width in mm		Tolerance mm
Over	Up to		Over	Up to	
-	250	± 0,40	2500	2750	± 1,05
250	380	± 0,45	2750	3000	± 1,10
380	500	± 0,50	3000	3250	± 1,15
500	750	± 0,60	3250	3500	± 1,20
750	950	± 0,65	3500	3750	± 1,25
950	1250	± 0,75	3750	4000	± 1,30
1250	1500	± 0,80	4000	4250	± 1,35
1500	1750	± 0,85	4250	4500	± 1,40
1750	2000	± 0,90	4500	5000	± 1,50
2000	2250	± 0,95	5000	-	± 1,60
2250	2500	± 1,00			

Table C - Thickness of M.E.C. TIMING BELT and relative

Type	Thickness measured on notch mm	Degree of tolerance mm
3 M	2,4	± 0,2
5 M	3,6	± 0,25
8 M	5,6	± 0,4
8 MS	5,3	± 0,4
14 M	10,0	± 0,6
20 M	13,2	± 0,8



Section	t mm	h_s mm	h_t mm
3 M	3	2,4	1,2
5 M	5	3,6	2,1
8 M	8	5,6	3,4
8 MS	8	5,3	3
14 M	14	10,0	6,1
20 M	20	13,2	9,0

All M.E.C. TIMING BELT HTD and STD belts have a ground outside surface and a specifial fibreglass insert to ensure fluid movement.

M.E.C. TIMING BELT® HTD® BELTS

Pitch 5M

N°□ Teeth	Type and pitch development□ in mm	Belt Width 9mm	15mm	25mm
60	300-5 M			
66	330-5 M			
70	350-5 M			
75	375-5 M			
80	400-5 M			
85	425-5 M			
90	450-5 M			
95	475-5 M			
100	500-5 M			
107	535-5 M			
113	565-5 M			
120	600-5 M			
123	615-5 M			
124	620-5 M			
126	630-5 M			
127	635-5 M			
133	665-5 M			
140	700-5 M			
142	710-5 M			
*148	740-5 M			
151	755-5 M			
160	800-5 M			
178	890-5 M			
185	925-5 M			
*190	950-5 M			
200	1000-5 M			
210	1050-5 M			
225	1125-5 M			
254	1270-5 M			
*284	1420-5 M			
300	1500-5 M			
*319	1595-5 M			
*358	1790-5 M			
*360	1800-5 M			
*379	1895-5 M			
*400	2000-5 M			
*505	2525-5 M			

Pitch 8M

N°□ Teeth	Type and pitch□ development□ in mm	Belt Width 20mm	30mm	50mm	85mm
47	376-8 M				
53	424-8 M				
60	480-8 M				
70	560-8 M				
75	600-8 M				
78	624-8 M				
80	640-8 M				
82	656-8 M				
90	720-8 M				
98	784-8 M				
100	800-8 M				
110	880-8 M				
114	912-8 M				
115	920-8 M				
120	960-8 M				
130	1040-8 M				
140	1120-8 M				
150	1200-8 M				
160	1280-8 M				
163	1304-8 M				
166	1328-8 M				
170	1360-8 M				
180	1440-8 M				
200	1600-8 M				
220	1760-8 M				
225	1800-8 M				
250	2000-8 M				
281	2248-8 M				
300	2400-8 M				
350	2800-8 M				

Napomena: *crvene strelice u tablicama upućuju na podatke za birani model na tribometru!*

C SENZORI

Sadržaj C

Prilog C1 – Tehnički podaci za tenzometarski senzor sile tipa LC307-1K - za senzorsku glavu 157
Prilog C2 – Tehnički podaci pojačala tipa RM 4220 - pojačalo tenzometarskih senzora sila..... 158
Prilog C3 – Tehnički podaci apsolutnog linearnog enkodera tipa LC 481 – enkoder linearnog modula (mjerač položaja i brzine modula)..... 160
Prilog C4 – Tehnički podaci inkrementnog rotacijskog enkodera tipa ERN 480 – enkoder rotacijskog diska (mjerač položaja i brzine modula)..... 167
Prilog C5 – Tehnički podaci termopara tipa OMEGA SA1XL-T – mjerenje temperature uzoraka ispitivanja trenja..... 171
Prilog C6 – Tehnički podaci termopara tipa OMEGA TC-T-NPT-U-72 – mjerenje temperature klima komore..... 173
Prilog C7 – Tehnički podaci pojačala termoparova tipa OMEGA DRF-TCT-24VDC..... 174

Prilog C1 – Tehnički podaci za tenzometarski senzor sile tipa LC307-1K - za senzorsku glavu

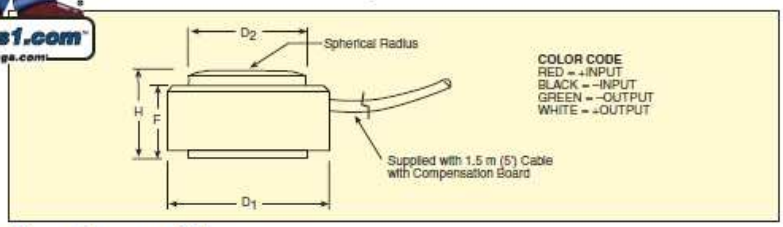
MINIATURE HIGH-CAPACITY "TOP HAT" LOAD CELL
0-250 lb TO 0-100,000 lb CAPACITIES

LC307 Series
Compression
0-250 lb to 0-100,000 lb
0-114 kg to 0-45,372 kg

1 Newton = 0.2248 lb
1 daNewton = 10 Newtons
1 lb = 454 g
1 t = 1000 kg = 2204 lb

LC307-500, $375, shown larger than actual size.

Starts at
$375



Dimensions: mm (in)

CAPACITY (lb)	D1	D2	H	F
250	13 (0.50)	6.9 (0.27)	9.7 (0.38)	9.1 (0.36)
500	13 (0.50)	7.1 (0.28)	9.7 (0.38)	9.1 (0.36)
1000	13 (0.50)	7.9 (0.31)	9.7 (0.38)	9.1 (0.36)
2000	13 (0.50)	10 (0.41)	9.7 (0.38)	9.1 (0.36)
3000	13 (0.50)	11 (0.45)	9.7 (0.38)	8.3 (0.33)
5000	16 (0.63)	13 (0.53)	15 (0.60)	13 (0.51)
7500	22 (0.88)	17 (0.67)	16 (0.63)	14 (0.54)
10,000	22 (0.88)	19 (0.76)	16 (0.63)	14 (0.54)
50,000	44 (1.75)	32 (1.25)	35 (1.38)	33 (1.29)
100,000	51 (2.00)	38 (1.50)	41 (1.63)	39 (1.54)

Small in size but not in performance, Series LC307 top hat load cells are designed for applications with minimum space and high-capacity loads up to 100,000 lb. Rugged all stainless steel construction and high-performance strain gages ensure superior linearity and stability. Temperature compensation is done by a miniature circuit board in the load cell's cable. These cells are designed to be mounted on a smooth, flat surface.

MOST POPULAR MODELS HIGHLIGHTED!

To Order *(Specify Model Number)*

CAPACITY lb	CAPACITY kg	MODEL NO.	PRICE	COMPATIBLE METERS**
250	114	LC307-250	$375	DPiS, DP41-S, DP25B-S
500	227	LC307-500	375	DPiS, DP41-S, DP25B-S
1000	455	LC307-1K	375	DPiS, DP41-S, DP25B-S
2000	909	LC307-2K	375	DPiS, DP41-S, DP25B-S
3000	1361	LC307-3K	375	DPiS, DP41-S, DP25B-S
5000	2269	LC307-5K	460	DPiS, DP41-S, DP25B-S
7500	3403	LC307-7.5K	460	DPiS, DP41-S, DP25B-S
10,000	4537	LC307-10K	460	DPiS, DP41-S, DP25B-S
50,000	22,686	LC307-50K	575	DPiS, DP41-S, DP25B-S*
100,000	45,372	LC307-100K	575	DPiS, DP41-S, DP25B-S*

Comes with 5-point NIST-traceable calibration.
** 4-digit meter. ** See section D for compatible meters.*
Ordering Examples: LC307-5K,** 5000 lb capacity top hat load cell, **$460.
LC307-500,** 500 lb capacity top hat load cell, **$375.

SPECIFICATIONS
Excitation: 5 Vdc
Output: 1.5 mV/V nominal
Accuracy: 0.75% FS BFSL (includes linearity, hysteresis and repeatability)
Zero Balance: ±2% FSO
Operating Temp Range: -54 to 121°C (-65 to 250°F)
Compensated Temp Range: 16 to 71°C (60 to 160°F)
Thermal Effects:
Span: ±0.018% rdg/°C
Zero: ±0.018% FSO/°C
Safe Overload: 150% of capacity
Ultimate Overload: 300% of capacity
Bridge Resistance: 350 Ω minimum
Full Scale Deflection: 0.001 to 0.003"
Electrical Connection: 1.5 m (5') 4-conductor cable with compensation board
Protection Class: IP54

ACCESSORY

MODEL NO.	PRICE	DESCRIPTION
OP-17	$15	Reference Book: Measure for Measure

F-29

Prilog C2 – Tehnički podaci pojačala tipa RM 4220 - pojačalo tenzometarskih senzora sila

Data Sheet

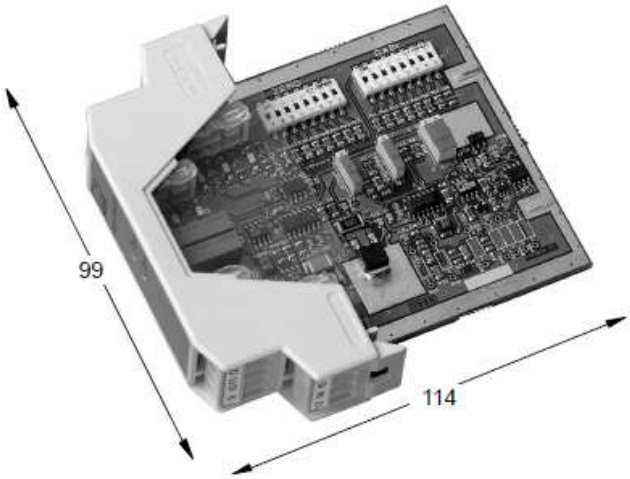
RM4220

Amplifier for SG-Transducers

Special features

- Amplifier for up to four 350 Ω transducers
- To use for mounting on DIN rails
- Output ± 10 V, 0...10 V and 4...20 mA
- Adjustment via DIP switches and potentiometers
- Service frendly via using plug in terminal

Dimensions (in mm; 1 mm = 0.03937 inches)



View from above

View of mounting side

Specifications

Type		RM4220
Accuracy class		0.1
Zero adjustment Maximum for impedance 87 Ω	 mV/V	 ±2.00
Amplifier gain Maximum Minimum		 8500 80
Strain gage full bridge Bridge excitation voltage Strain gage impedance Strain gage sensitivity	 V_{DC} Ω mV/V	 5/10 ≥ 80 0.3...12
Input current Input impedance	nA Ω	5 typ. 10^{10}
Output current Maximum non-linearity Output impedance Load resistance	mA % FSO MΩ Ω	4/20 ±0.015 typ. 40 max. 800
Output voltage Output short-circuit current Max. non-linearity	V mA % FSO	0/10 or ±10 ±22 G = 1000 (±0.001)
Filter (3rd order) Maximum Minimum / standard	 Hz Hz	 5000 ±10 3 ±10%
Thermal drift Input offset voltage drift Thermal sensitivity drift	V output µV/°C ppm/°C	±10 typ. ±0.2 / ±5 G 150
Max. current consumption	mA	200
Fixture		Mounting rail DIN EN 50022
Connection		Screw terminal
Power supply	V_{DC}	24 ±8
Operating temperature range	°C [°F]	0...+70 [32...158]
Storage temperature range	°C [°F]	-40...+85 [-40...185]
Temperature stabilization time	min	15
Inflammability		VO (UL94)
Degree of protection		IP 20
Dimensions (LxWxH)	mm	115 x 100 x 23
Housing material		Polyamide PA
Color		grey
Weight, approx.	g	130

Prilog C3 – Tehnički podaci apsolutnog linearnog enkodera tipa LC 481 – enkoder linearnog modula (mjerač položaja i brzine modula)

Linear Encoders for Numerically Controlled Machine Tools

Linear encoders from HEIDENHAIN for numerically controlled machine tools can be used nearly everywhere. They are ideal for machines and other equipment whose feed axes are in a closed loop, such as milling machines, machining centers, boring machines, lathes and grinding machines. The beneficial dynamic behavior of the linear encoders, their highly reliable traversing speed, and their acceleration in the direction of measurement predestine them for use on highly-dynamic conventional axes as well as on direct drives.

HEIDENHAIN also supplies linear encoders for other applications, such as
- Manual machine tools
- Presses and bending machines
- Automation and production equipment

Please request further documentation, or inform yourself on the Internet at www.heidenhain.de.

Advantages of linear encoders
Linear encoders measure the position of linear axes without additional mechanical transfer elements. The control loop for position control with a linear encoder also includes the entire feed mechanics. Transfer errors from the mechanics can be detected by the linear encoder on the slide, and corrected by the control electronics. This can eliminate a number of potential error sources:
- Positioning error due to thermal behavior of the recirculating ball screw
- Hysteresis
- Kinematic error through ball-screw pitch error

Linear encoders are therefore indispensable for machines that must fulfill high requirements for **positioning accuracy** and **machining speed.**

Mechanical design
The linear encoders for numerically controlled machine tools are sealed encoders: An aluminum housing protects the scale, scanning carriage and its guideway from chips, dust, and fluids. Downward-oriented elastic lips seal the housing.

The scanning carriage travels in a low-friction guide within the scale unit. A coupling connects the scanning carriage with the mounting block and compensates the misalignment between the scale and the machine guideways.

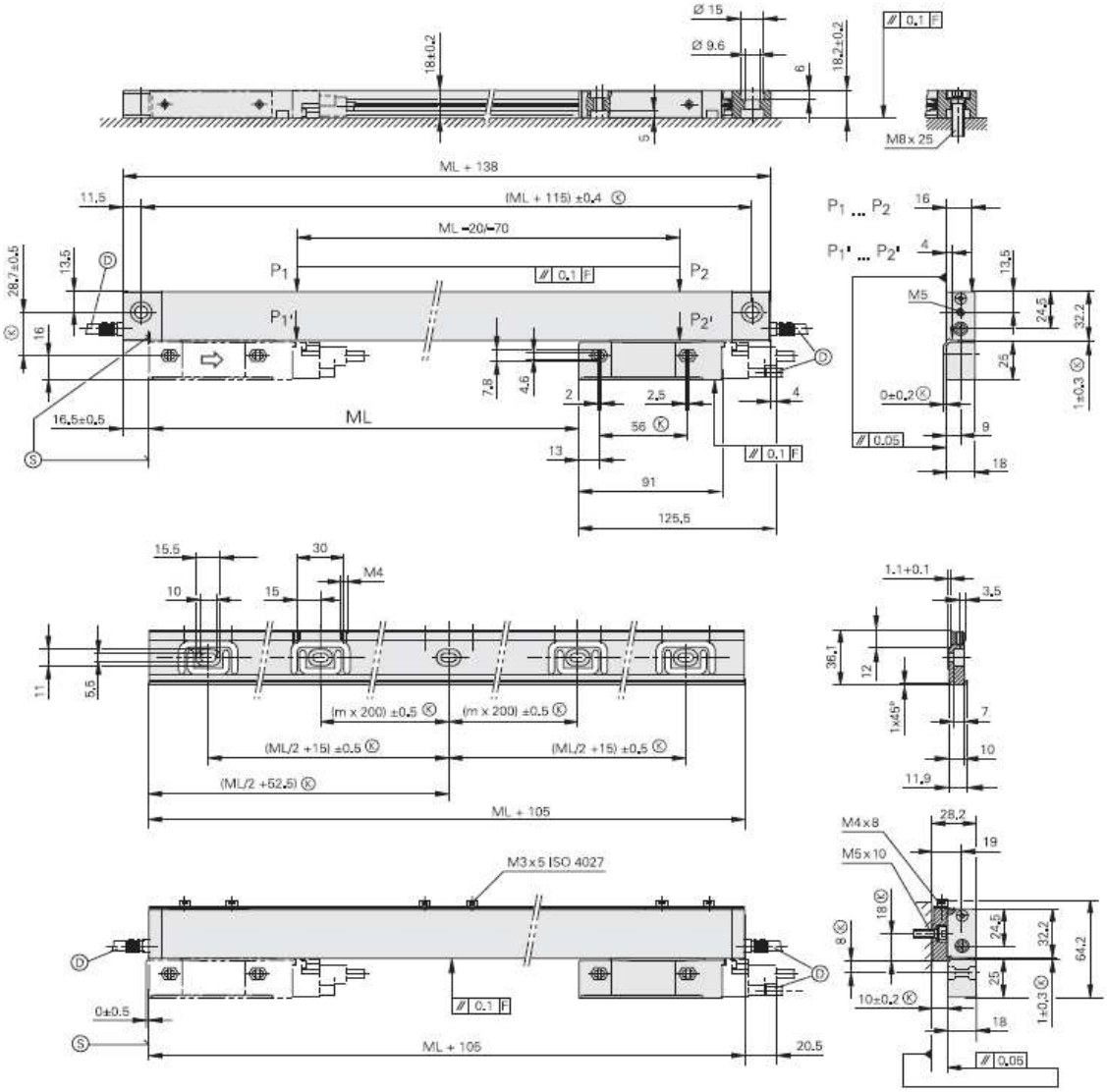
Depending on the encoder model, lateral and axial offsets of ± 0.2 to ± 0.3 mm between the scale and mounting block are permissible.

LC 481/LC 491

- **Absolute linear encoder**
- **High positioning accuracy and traversing speed through single-field scanning**
- **For limited installation space**

Dimensions in mm

Tolerancing ISO 8015
ISO 2768 - m H
< 6 mm: ±0.2 mm



Ⓓ = Without mounting spar
Ⓑ = With mounting spar
F = Machine guideway
P = Gauging points for alignment
Ⓚ = Required mating dimensions
Ⓓ = Compressed air inlet
Ⓢ = Beginning of measuring length (ML)
⇨ = Direction of scanning unit motion for output signals in accordance with interface description

Mounting spar

ML	m
70 ... 520	0
570 ... 920	1
1020 ... 1340	2
1440 ... 1740	3
1840 ... 2040	4

Product Information LC 481/LC 491 9/2005

Thermal behavior
The combination of increasingly rapid machining processes with completely enclosed machines leads to ever-increasing temperatures within the machine's work envelope. Therefore, the thermal behavior of the linear encoders used becomes increasingly important, since it is an essential criterion for the working accuracy of the machine.

As a general rule, the thermal behavior of the linear encoder should match that of the workpiece or measured object. During temperature changes, the linear encoder must expand or retract in a defined, reproducible manner. Linear encoders from HEIDENHAIN are designed for this.

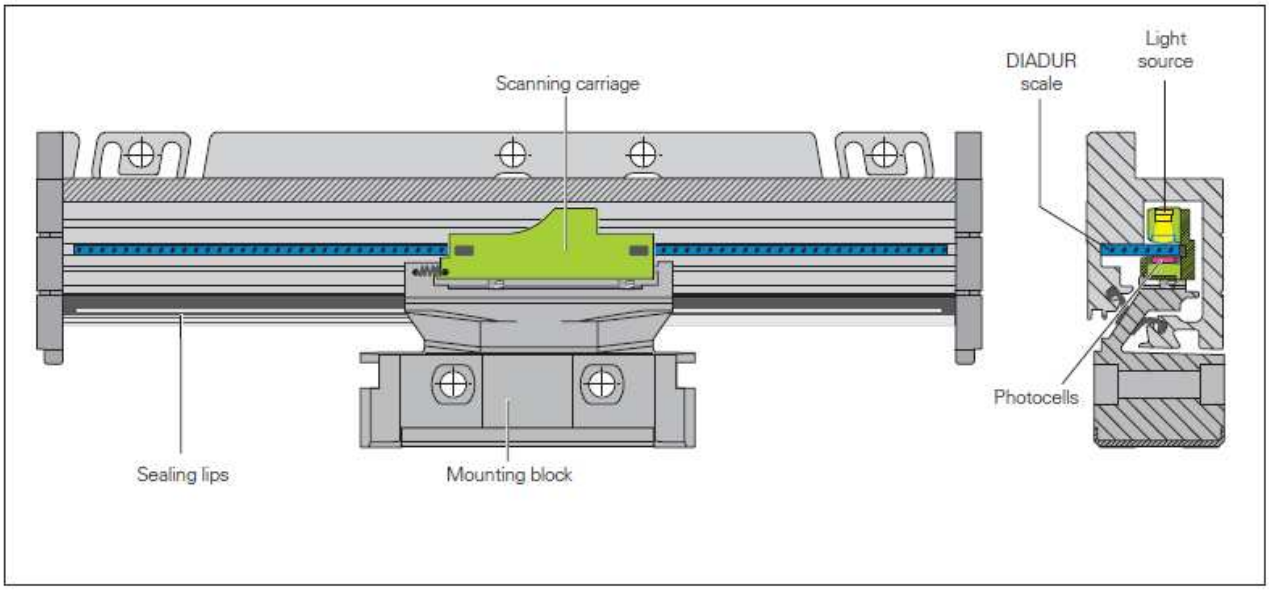
The graduation carriers of HEIDENHAIN linear encoders have defined coefficients of thermal expansion (see *Specifications*). This makes it possible to select the linear encoder whose thermal behavior is best suited to the application.

Dynamic behavior
The constant increases in efficiency and performance of machine tools necessitate ever-higher feed rates and accelerations, while at the same time the high level of machining accuracy must be maintained. In order to transfer rapid and yet exact feed motions, very high demands are placed on rigid machine design as well as on the linear encoders used.

Linear encoders from HEIDENHAIN are characterized by their high rigidity in the measuring direction. This is a very important prerequisite for high-quality path accuracies on a machine tool. In addition, the low mass of components moved contributes to their excellent dynamic behavior.

Availability
The feed axes of machine tools travel quite large distances—a typical value is 10000 km in three years. Therefore, robust encoders with good long-term stability are especially important: They ensure the constant availability of the machine.

Due to the details of their design, linear encoders from HEIDENHAIN function properly even after years of operation. The contact-free principle of photoelectrically scanning the measuring standard, as well as the ball-bearing guidance of the scanning carriage in the scale housing ensure a long lifetime. This encapsulation, the special scanning principles and, if needed, the introduction of compressed air, make the linear encoders very resistant to contamination. The complete shielding concept ensures a high degree of electrical noise immunity.

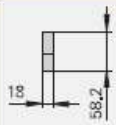
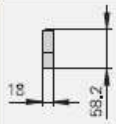
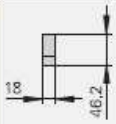


Schematic design of the **LC 183** sealed linear encoder

Selection Guide

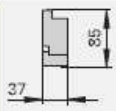
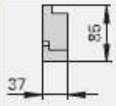
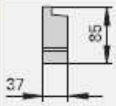
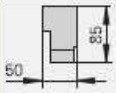
Linear encoders with slimline scale housing

The linear encoders with **slimline scale housing** are designed for **limited installation space.** Larger measuring lengths and higher acceleration loads are made possible by using mounting spars or clamping elements.

	Cross section	Measuring step[1]	Accuracy grade	Measuring length
Absolute linear measurement • Glass scale		To 0.1 µm	± 5 µm ± 3 µm	70 mm to 1240 mm *With mounting spar or clamping elements:* 70 mm to 2040 mm
Incremental linear measurement with very high repeatability • Steel scale • Small signal period		To 0.1 µm	± 5 µm ± 3 µm	50 mm to 1220 mm
Incremental linear measurement • Glass scale		To 0.5 µm	± 5 µm ± 3 µm	70 mm to 1240 mm *With mounting spar:* 70 mm to 2040 mm

Linear encoders with full-size scale housing

The linear encoders with **full-size scale housing** are characterized by their **sturdy construction, high resistance to vibration** and **large measuring lengths.** The scanning carriage is connected with the mounting block over an oblique blade that permits mounting both in **upright and reclining positions** with the same protection rating.

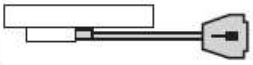
Absolute linear measurement • Glass scale		To 0.1 µm	± 5 µm ± 3 µm	140 mm to 4240 mm
Incremental linear measurement with very high repeatability • Steel scale • Small signal period		To 0.1 µm	± 3 µm ± 2 µm	140 mm to 3040 mm
Incremental linear measurement • Glass scale		To 0.5 µm	± 5 µm ± 3 µm	140 mm to 3040 mm
Incremental linear measurement for large measuring lengths • Steel scale tape		To 0.1 µm	± 5 µm	440 mm to 30040 mm

[1] Recommended measuring step for position measurement

Specifications	LC 481	LC 491F	LC 491M
Measuring standard Thermal expansion coefficient	DIADUR glass scale with absolute track and incremental track *Without mounting spar:* approx. $8 \cdot 10^{-6}$ K^{-1}, *with mounting spar:* approx. $9 \cdot 10^{-6}$ K^{-1}		
Accuracy grade*	± 3 µm, ± 5 µm		
Measuring length ML* in mm Mounting spar recommended	70 120 170 220 270 320 370 420 470 520 570 620 720 770 820 920 1020 1140 1240		
Only with mounting spar	1340 1440 1540 1640 1740 1840 2040		
Absolute position values	EnDat 2.1	Fanuc 01 serial interface	Mitsubishi High Speed Serial Interface
Measuring step	Approx. 0.02 µm[1)]	*Accuracy ± 3 µm:* 0.01 µm, *accuracy ± 5 µm:* 0.05 µm	
Calculation time t_{cal}	< 1 ms	–	
Incremental signals Grating period/signal period Cutoff frequency –3dB	∿ 1 V_{PP} 20 µm ≥ 150 kHz	–	
Power supply	5 V ± 5%/< 300 mA without load. Remote sensing is possible		
Electrical connection Max. cable length	Separate adapter cable (1 m/3 m/6 m/9 m) connectable to mounting block Upon request		
Traversing speed	≤ 180 m/min		
Required moving force	≤ 5 N		
Vibration 55 to 2000 Hz **Shock** 11 ms **Acceleration in measuring direction**	*Without mounting spar:* ≤ 100 m/s^2 (IEC 60068-2-6) *With mounting spar:* ≤ 200 m/s^2 (IEC 60068-2-6) ≤ 300 m/s^2 (IEC 60068-2-27) ≤ 100 m/s^2		
Operating temperature	0 to 50 °C		
Protection IEC 60529	IP 53 when installed acc. to mounting instructions, IP 64 with compressed air from DA 300		
Weight	*Encoder:* 0.2 kg + 0.5 kg/m measuring length, *mounting spar:* 0.9 kg/m		

* Please indicate when ordering

[1)] After 1024-fold interpolation of the incremental signals

Connecting Elements and Cables	LC 481	LC 491F	LC 491M
Adapter cable complete With M23 coupling (male), 17-pin Cable length 1 m/3 m/6 m/9 m Cable diameter 6 mm	Id. Nr. 369129-xx 	Id. Nr. 337439-xx 	
Connecting cable complete With M23 connector (female), 17-pin Cable diameter 8 mm	With D-sub connector (female) Id. Nr. 332115-xx 	With Fanuc connector Id. Nr. 534855-xx 	With Mitsubishi connector Id. Nr. 344625-xx
Connecting cable with one connector With M23 connector (female) Cable diameter 8 mm	Id. Nr. 309778-xx 	–	
Adapter cable complete Cable diameter 6 mm	With D-sub connector (female) Id. Nr. 370474-xx 	With Fanuc connector Id. Nr. 532759-xx 	With Mitsubishi connector Id. Nr. 367425-xx 

Product Information LC 481/LC 491 9/2005

Linear Encoders with Large Cross Section

The LB, LC, LF and LS full-size linear encoders are fastened over their entire length onto a machined surface. This gives them a **high vibration rating.** The inclined arrangement of the sealing lips permits **universal mounting** with vertical or horizontal scale housing with equally high protection rating.

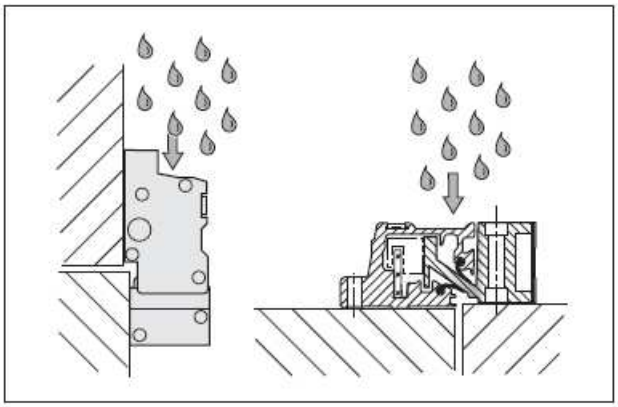
Thermal behavior
The thermal behavior of the LB, LC, LF and LS 100 linear encoders with large cross section has been optimized:

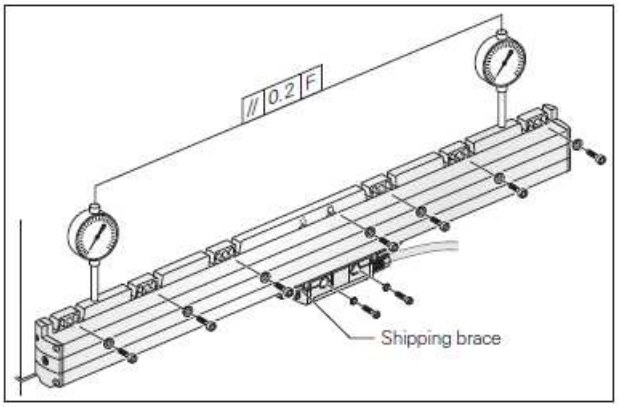
On the **LF** the steel scale is cemented to a steel carrier that is fastened directly to the machine element.

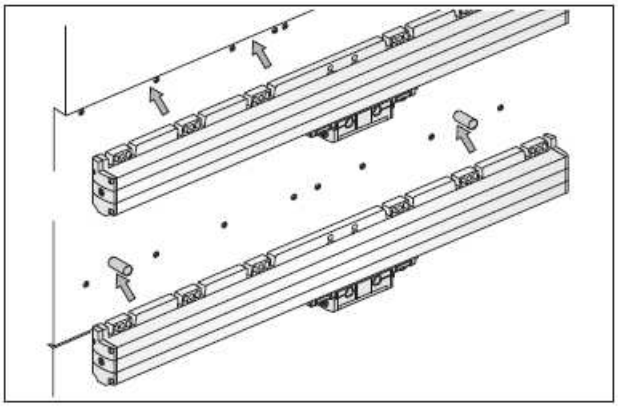
On the **LB** the steel scale tape is clamped directly onto the machine element. The LB therefore takes part in all thermal changes of the mounting surface.

LC and **LS** are fixed to the mounting surface at their midpoint. The flexible fastening elements permit reproducible thermal behavior.

Mounting
It is surprisingly simple to mount the sealed linear encoders from HEIDENHAIN: You need only align the scale unit at several points along the machine guideway. Stop surfaces or stop pins can also be used for this. The shipping brace already sets the proper gap between the scale unit and the scanning unit. The lateral gap is to be set during mounting. If the shipping brace needs to be removed before mounting due to a lack of space, then the mounting gauge is used to set the gap between the scale unit and the scanning unit easily and exactly. You must also ensure that the lateral tolerances are maintained.



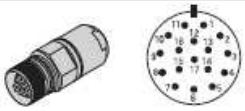




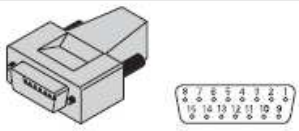
Electrical Connection

LC 481

17-pin coupling M23



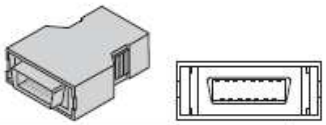
15-pin D-sub connector, female, for HEIDENHAIN controls and IK 220



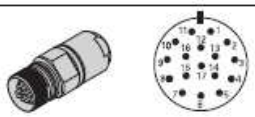
	Power supply					Incremental signals				Absolute position values			
	7	1	10	4	11	15	16	12	13	14	17	8	9
	1	9	2	11	13	3	4	6	7	5	8	14	15
	U_P	**Sensor** U_P	**0 V**	**Sensor** 0 V	**Inside shield**	**A+**	**A–**	**B+**	**B–**	**DATA**	**$\overline{\text{DATA}}$**	**CLOCK**	**$\overline{\text{CLOCK}}$**
	Brown/ Green	Blue	White/ Green	White	/	Green/ Black	Yellow/ Black	Blue/ Black	Red/ Black	Gray	Pink	Violet	Yellow

LC 491F

20-pin Fanuc connector



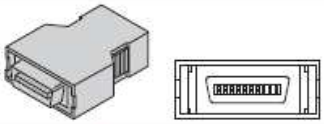
17-pin coupling M23



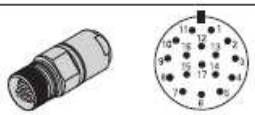
	Power supply					Absolute position values			
	9	18/20	12	14	16	1	2	5	6
	7	1	10	4	–	14	17	8	9
	U_P	**Sensor** U_P	**0 V**	**Sensor** 0 V	**Shield**	**Serial Data**	**$\overline{\text{Serial Data}}$**	**Request**	**$\overline{\text{Request}}$**
	Brown/Green	Blue	White/Green	White	–	Gray	Pink	Violet	Yellow

LC 491M

20-pin Mitsubishi connector



17-pin coupling M23



	Power supply				Absolute position values			
	20	19	1	11	6	16	7	17
	7	1	10	4	14	17	8	9
	U_P	**Sensor** U_P	**0 V**	**Sensor** 0 V	**Serial Data**	**$\overline{\text{Serial Data}}$**	**Request Frame**	**$\overline{\text{Request Frame}}$**
	Brown/Green	Blue	White/Green	White	Gray	Pink	Violet	Yellow

Shield on housing; **U_P** = power supply voltage
Sensor: The sensor line is connected internally with the corresponding power line
Vacant pins or wires must not be used!

Prilog C4 – Tehnički podaci inkrementnog rotacijskog enkodera tipa ERN 480 – enkoder rotacijskog diska (mjerač položaja i brzine modula)

Rotary encoders with mounted stator coupling

Rotary encoders for separate shaft coupling

The catalogs for
- Angle Encoders with Integral Bearing
- Angle Encoders without Integral Bearing
- Exposed Linear Encoders
- Sealed Linear Encoders
- Position Encoders for Servo Drives
- HEIDENHAIN subsequent electronics

are available upon request.

This catalog supersedes all previous editions, which thereby become invalid. The basis for ordering from HEIDENHAIN is always the catalog edition valid when the contract is made.

Standards (ISO, EN, etc.) apply only where explicitly stated in the catalog.

Mechanical Design Types and Mounting

Rotary Encoders with Integral Bearing and Stator Coupling

ECN/EQN/ERN rotary encoders have integrated bearings and a mounted stator coupling. They compensate radial runout and alignment errors without significantly reducing the accuracy. The encoder shaft is directly connected with the shaft to be measured. During angular acceleration of the shaft, the stator coupling must absorb only that torque caused by friction in the bearing. The stator coupling permits axial motion of the measured shaft:

ECN/EQN/ERN 400:	± 1 mm
ERN 1000:	± 0.5 mm
ECN/ERN 100:	± 1.5 mm

Mounting

The rotary encoder is slid by its hollow shaft onto the measured shaft, and the rotor is fastened by two screws or three eccentric clamps. For rotary encoders with hollow through shaft, the rotor can also be fastened at the end opposite to the flange. Rotary encoders of the ECN/EQN/ERN 1300 series are particularly well suited for repeated mounting (see brochure titled *Position Encoders for Servo Drives*). The stator is connected without a centering collar on a flat surface. The **universal stator coupling** of the ECN/EQN/ERN 400 permits versatile mounting, e.g. by its thread provided for fastening it from outside to the motor cover. Dynamic applications require the highest possible natural frequencies f_N of the system (also see *General Mechanical Information*). This is attained by connecting the shafts on the flange side and fastening the coupling by four cap screws or, on the ERN 1000, with special washers (see *Mounting Accessories*).

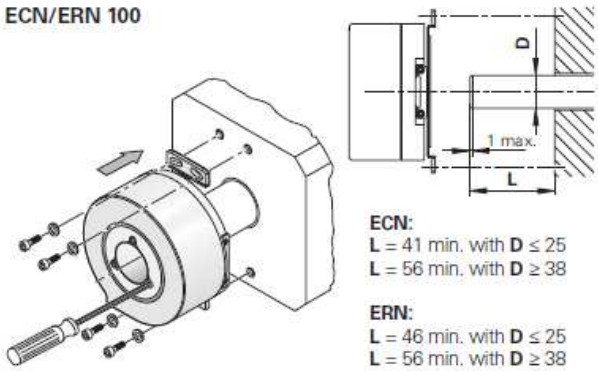
Natural frequency f_N with coupling fastened by 4 screws

	Stator coupling	Cable	Flange socket	
			Axial	Radial
ECN/EQN/ERN 400	Standard	1550 Hz	1500 Hz	1000 Hz
	Universal	1400 Hz[1)]	1400 Hz	900 Hz
ECN/ERN 100		1000 Hz	–	400 Hz
ERN 1000		950 Hz[2)]	–	–

[1)] Also when fastening with 2 screws
[2)] Also when fastening with 2 screws and washers

If the encoder shaft is subject to high loads, for example from friction wheels, pulleys, or sprockets, HEIDENHAIN recommends mounting the ECN/EQN/ERN 400 with a bearing assembly (see *Mounting Accessories*).

ECN/ERN 100

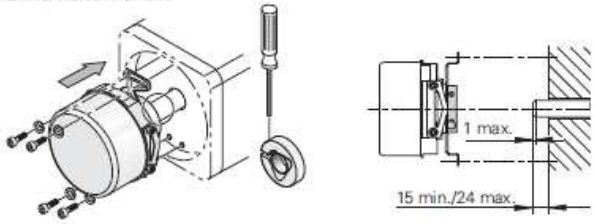


ECN:
L = 41 min. with **D** ≤ 25
L = 56 min. with **D** ≥ 38

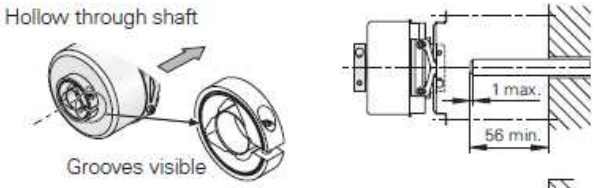
ERN:
L = 46 min. with **D** ≤ 25
L = 56 min. with **D** ≥ 38

ECN/EQN/ERN 400 e.g. with standard stator coupling

Blind hollow shaft

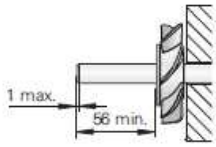


Hollow through shaft



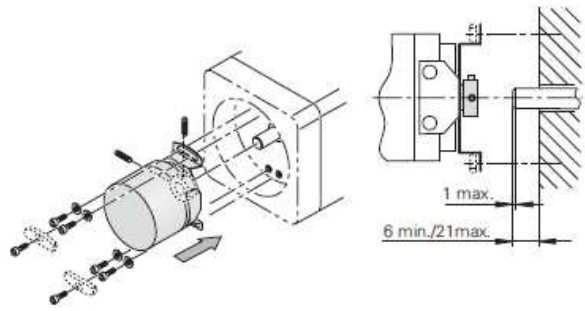
Grooves visible

ECN/EQN/ERN 400
e.g. with universal stator coupling



Hollow through shaft

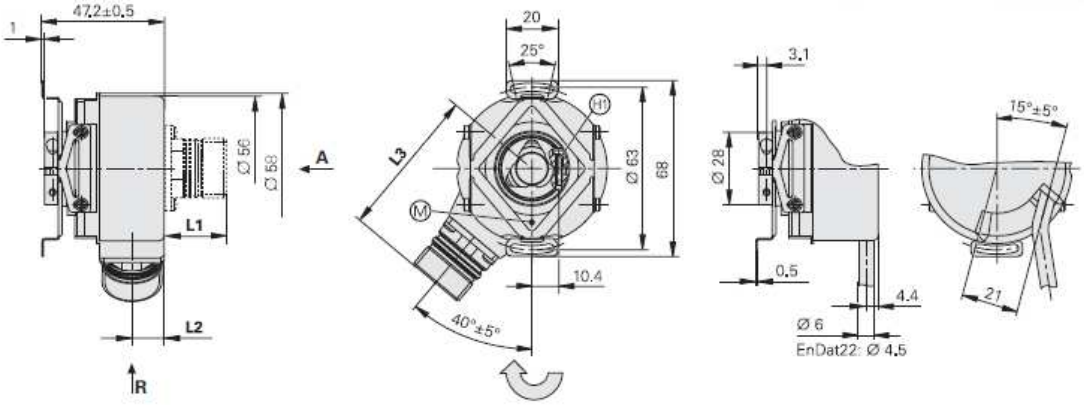
ERN 1000



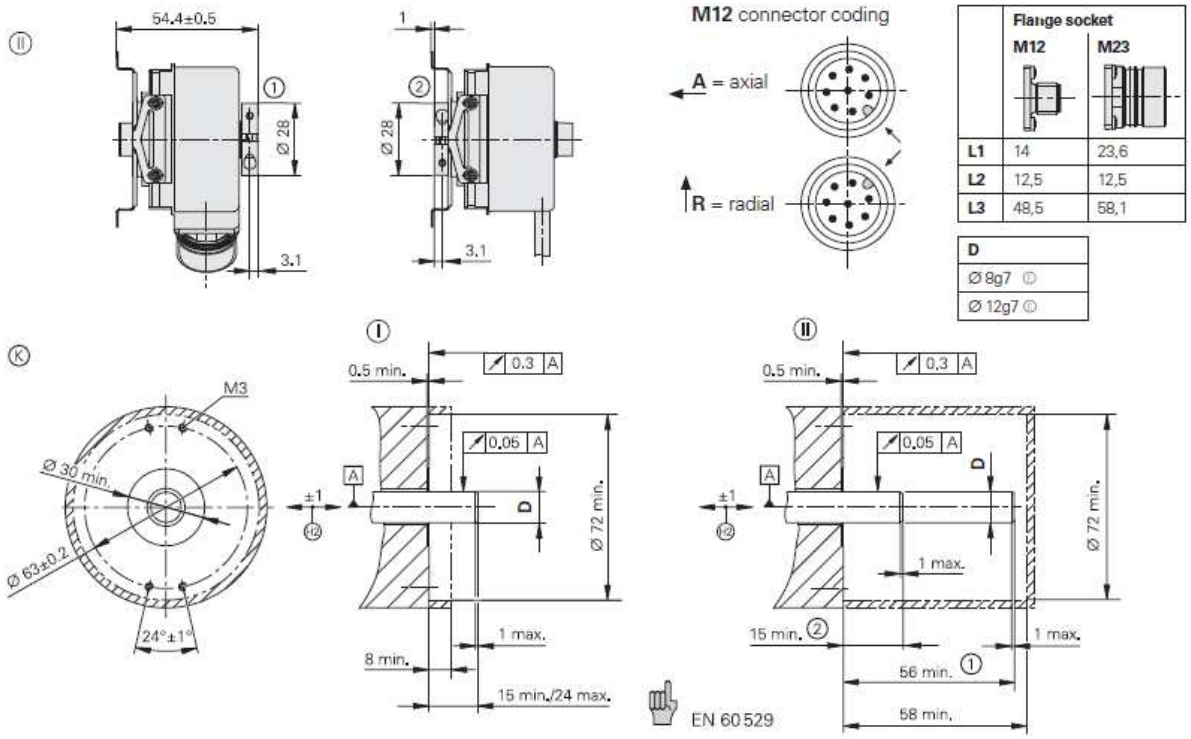
ECN, EQN, ERN 400 Series

- Rotary encoders with mounted stator coupling
- Blind hollow shaft or hollow through shaft

Blind hollow shaft



Hollow through shaft



Dimensions in mm

Tolerancing ISO 8015
ISO 2768 - m H
< 6 mm: ±0.2 mm

Cable radial, also usable axially
- = Bearing of mating shaft
- = Bearing of encoder
- = Required mating dimensions
- = Measuring point for operating temperature
- = Clamping screw with hexalobular socket X8
- = Compensation of mounting tolerances and thermal expansion no dynamic motion permitted
- = Clamping ring on housing side (status at delivery)
- = Clamping ring on coupling side (optionally mountable)
- Direction of shaft rotation for output signals as per the interface description

	Incremental			
	ERN 420	**ERN 460**	**ERN 430**	**ERN 480**
Absolute position values*	–			
Ordering designation				
Positions per revolution	–			
Revolutions	–			
Code	–			
Elec. permissible speed Deviations[1]	–			
Calculation time t_{cal}	–			
Incremental signals	⊓⊔TTL		⊓⊔HTL	∿ 1 V_{PP}[2]
Line counts*	250[4] 500[4] **1000** **1024** **1250** **2000** **2048** **2500** **3600** **4096** **5000**			
Cutoff frequency –3 dB Scanning frequency Edge separation *a*	– ≤ 300 kHz ≥ 0.39 µs			≥ 180 kHz – –
System accuracy	1/20 of grating period			
Power supply*	**5 V** ± 10 %	**10 to 30 V**	**10 to 30 V**	**5 V** ± 10 %
Current consumption without load	120 mA	100 mA	150 mA	120 mA
Electrical connection*	• **Flange socket** M23, radial and axial (with blind hollow shaft) • **Cable** 1 m, **without connecting element**			
Shaft*	**Blind hollow shaft** or **hollow through shaft; D = 8 mm** or **D = 12 mm**			
Mech. perm. speed *n*[3]	≤ 6000 min^{-1}/≤ 12000 min^{-1} [5]			
Starting torque at 20 °C below –20 °C	*Blind hollow shaft:* ≤ 0.01 Nm *Hollow through shaft:* ≤ 0.025 Nm ≤ 1 Nm			
Moment of inertia of rotor	≤ 4.3 · 10^{-6} kgm^2			
Permissible axial motion of measured shaft	± 1 mm			
Vibration 55 to 2000 Hz **Shock** 6 ms/2 ms	≤ 300 m/s^2; *Flange socket version:* 150 m/s^2 (EN 60068-2-6) ≤ 1000 m/s^2/≤ 2000 m/s^2 (EN 60068-2-27)			
Max. operating temp.[3]	100 °C	70 °C	100 °C	
Min. operating temperature	*Flange socket or fixed cable:* –40 °C *For frequent flexing:* –10 °C			
Protection EN 60529	IP 67 at housing (IP 66 with hollow through shaft); IP 64 at shaft inlet			
Weight (approx.)	0.3 kg			

Prilog C5 – Tehnički podaci termopara tipa OMEGA SA1XL-T – mjerenje temperature uzoraka ispitivanja trenja

NEW

The "All-in-One" Surface Thermocouple

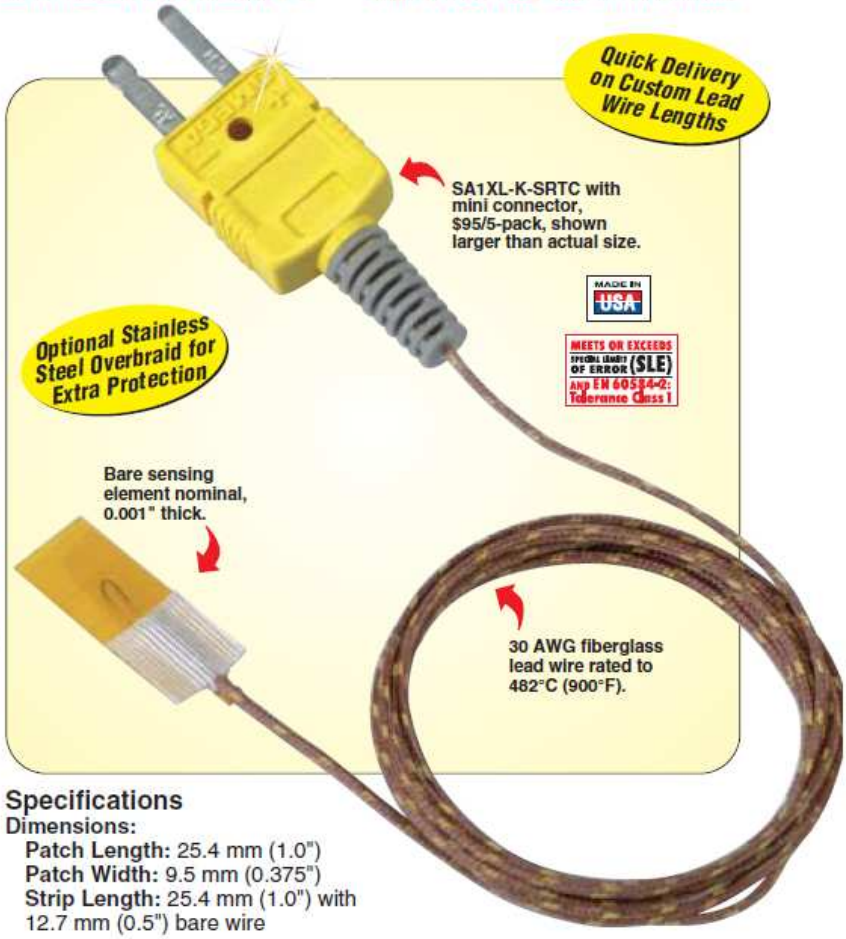
Fiberglass-Insulated Thermocouple Wire Leads

High or Low Temperatures! *Self-Adhesive or Cement-On!* *Super-Fast Response All the Time!*

SA1XL
Starts at
$80
5-Pack

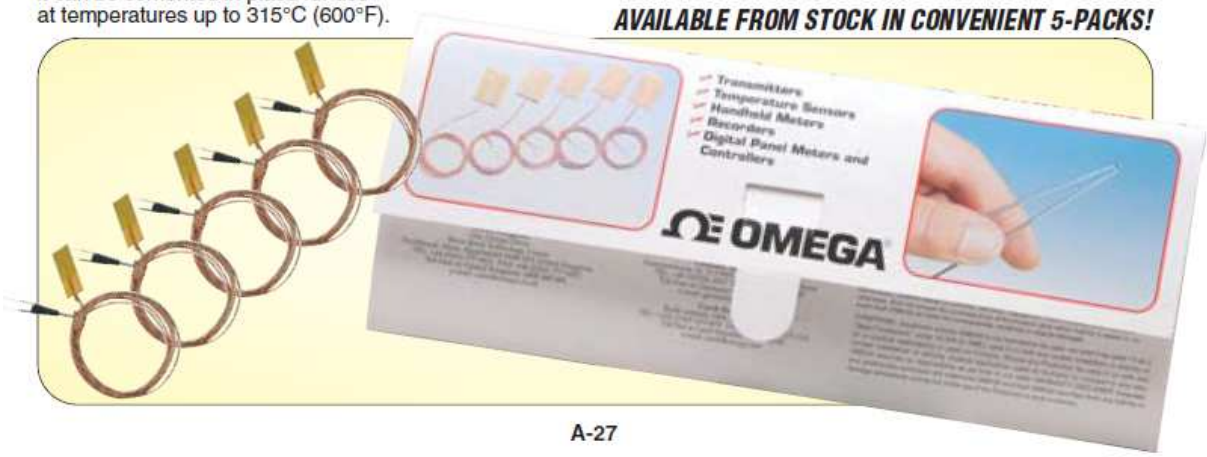
- Stocked in 1, 2, and 3 m (40, 80, and 120") Lengths
- Custom Lead Lengths Available
- Available in J, K, T, and E Calibrations
- Stripped Leads Standard (Molded Miniature Connector with Integral Strain Relief Optional)
- Easy-to-Install Silicone-Based, Self-Adhesive Backing [Rated to 260°C (500°F)]
- Sensor Rated to 315°C (600°F) When Used as a "Cement-On" (OMEGABOND® Air Set Cements Available—Place Sensor and Encapsulate with OMEGABOND® Air Set Cement)

OMEGA® introduces the next generation of our surface-mount fast-response thermocouples. The new SA1XL thermocouple achieves response times of less than 0.15 seconds. This thermocouple is constructed using a Polyimide/fiberglass-junction insulation along with a fiberglass-insulated lead wire. The SA1XL can be used as a self-adhering thermocouple for temperatures up to 260°C (500°F) or it can be cemented in place for use at temperatures up to 315°C (600°F).



Specifications
Dimensions:
Patch Length: 25.4 mm (1.0")
Patch Width: 9.5 mm (0.375")
Strip Length: 25.4 mm (1.0") with 12.7 mm (0.5") bare wire

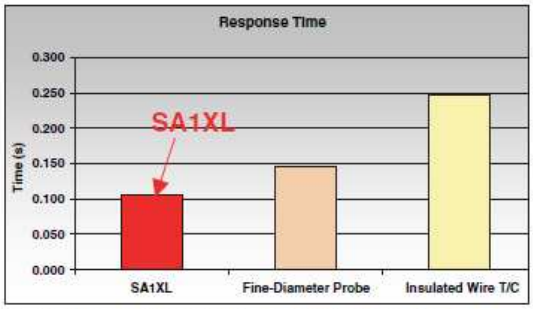
AVAILABLE FROM STOCK IN CONVENIENT 5-PACKS!



A-27

OMEGABOND®, starts at $22.50, see accessory chart or page F-21 for additional information.

The self-adhesive mounting strip is ideal for "targeted" placement of the sensor element. Once the element is in place, it can be used "as is", for applications such as electronic component temperature monitoring during board fabrication. It can also be cemented in place using OMEGABOND® for higher temperatures.



Tests show that the SA1XL temperature sensor is significantly faster than a typical insulated 30 AWG thermocouple or fine-diameter, metal-sheathed probe.

Accessories

Model No.	Price	Description
OB-100-16	$32	OMEGABOND® 100 1 lb kit, fast-setting, 2-part epoxy (sets in 8 to 12 min.)
OB-200-16	55	OMEGABOND® 200 1 lb kit, high temperature, 2-part epoxy
OB-400	36	OMEGABOND® 400 powder, 8 fluid oz (one part cement; just mix with water)
OB-700	36	OMEGABOND® 700 powder, 8 fluid oz (one part cement; just mix with water)

Please visit omega.com for additional OMEGABOND® products.

Available with Stainless Steel Overbraid!

For applications requiring more durable lead wire, OMEGA's SA1XL surface thermocouples are availabe with Stainless Steel overbraid. Add suffix "-SB" to the model number and $11 per foot (5-pack) for lengths greater than 3 m (120").

Ordering Example: SA1XL-K-72-SB, *$100 + (3 X $11) =* ***$133.***

MOST POPULAR MODELS HIGHLIGHTED!

To Order *(Specify Model Number)*

Model No.	Price	SS Braid -SB Option**	Description
SA1XL-(*)	$80	$100	5-pack, self-adhesive thermocouple, 1 m (40"), stripped ends
SA1XL-(*)-72	100	133	5-pack, self-adhesive thermocouple, 2 m (80"), stripped ends
SA1XL-(*)-120	120	178	5-pack, self-adhesive thermocouple, 3 m (120"), stripped ends
SA1XL-(*)-SRTC	95	115	5-pack, self-adhesive thermocouple, 1 m (40"), molded SMP male
SA1XL-(*)-72-SRTC	115	148	5-pack, self-adhesive thermocouple, 2 m (80"), molded SMP male
SA1XL-(*)-120-SRTC	135	193	5-pack, self-adhesive thermocouple, 3 m (120"), molded SMP male

** Insert calibration K, J, T or E.* ***Insert "-SB" for stainless steel overbraid.*

Ordering Examples: SA1XL-K-72-SRTC, *5-pack Type K, super-fast, self-adhesive thermocouple, 2 m (80") fiberglass-insulated leads, with a molded-on miniature connector with strain relief, and* ***OB-400*** *high-temperature air set cement, 8 fluid oz, $115 + 36 =* ***$151.***
SA1XL-K-72-SRTC-SB, *5-pack Type K, self-adhesive thermocouple, 2 m (80"), with SS overbraid,* ***$148.***

A-28

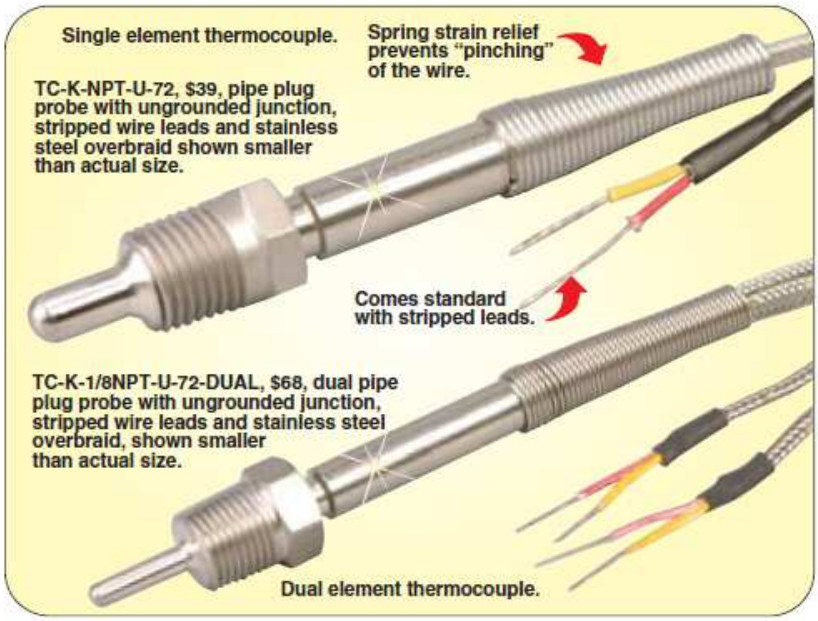
Prilog C6 – Tehnički podaci termopara tipa OMEGA TC-T-NPT-U-72 – mjerenje temperature klima komore

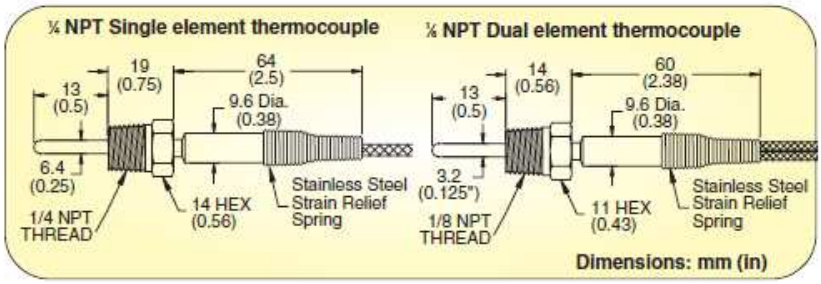
Rugged Pipe Plug Thermocouple Probe

TC-(*)-NPT Series
Starts at
$34

MEETS OR EXCEEDS SPECIAL LIMITS OF ERROR (SLE) AND EN 60584-2: Tolerance Class 1

- Rugged 304 SS Design with Strain Relief Spring
- Single and Dual Elements
- Dual Thermocouples Can Provide a Compact Way of Sending the Same Temperature Signal to 2 Separate Pieces of Equipment
- ¼ NPT or ⅛ NPT Mounting Thread
- 2 m (80") Stainless Steel Braid Over Fiberglass Lead Wire
- 20 AWG, Stranded For ¼ NPT 24 AWG, Stranded For ⅛ NPT Stainless Steel Overbraid–Resists Abrasions and Cuts, Yet Remains Flexible
- Withstands Pressures to 2500 psi at Ambient Temperatures
- Grounded and Ungrounded Junction Is Ideal For Vessel Application, Pressurized Chambers and Pipelines
- Exposed Junction Designed For Air Temperature Measurement and Monitoring of Gas Streams
- Stripped Leads Standard SMP Connectors, Optional
- Choice J, K, T or E Thermocouple Types
- Grounded, Ungrounded or Exposed Junctions
- Special Custom Designs Having Different NPT Threads, Tip Diameters or Tip Lengths Are Also Available
- Flush Tip Available, Consult Custom Engineering





MOST POPULAR MODELS HIGHLIGHTED!

To Order *(Specify Model Number)*

Mounting Thread	Model No.	Price G**/E**	Price U**	Additional Price 300 mm (12") Lead Wire
¼	TC-(*)-NPT-(**)-72	$34	$39	$2.25
	TC-(*)-1/4 NPT-(**)-72-DUAL	60	68	4.00
	TC-(*)-1/4 NPT-(**)-72-SMP	39	44	2.25
	TC-(*)-1/4 NPT-(**)-72-SMP-DUAL	68	77	4.00
⅛	TC-(*)-1/8 NPT-(**)-72	$34	$39	$2.25
	TC-(*)-1/8 NPT-(**)-72-DUAL	60	68	4.00
	TC-(*)-1/8 NPT-(**)-72-SMP	39	44	2.25
	TC-(*)-1/8 NPT-(**)-72-SMP-DUAL	68	77	4.00

** Specify calibration: **J, K, T** or **E**.*
*** Specify junction type: **G** (Grounded), **E** (Exposed), **U** (Ungrounded).*
For lead wire length over 2m (80"), use additional price per 300 mm (12") increments and modify model number.

Prilog C7 – Tehnički podaci pojačala termoparova tipa OMEGA DRF-TCT-24VDC

NEW

DRF Series DIN Rail Mount Configurable Signal Conditioners

$170
Basic Modules

1 YEAR WARRANTY CE

- **Voltage, Current, Frequency, Resistance, Potentiometer, Thermocouple, RTD and Load Cell Input Modules**
- **Field-Configurable Signal Ranges**
- **Provide up to 3500 Veff Isolation Between Input and Output and Power (Isolation is Model Specific)**
- **Compatible with Standard 35 mm DIN Rail**

The DRF Series DIN rail signal conditioners are designed to accept a broad range of input signals, such as AC and DC voltage and current, frequency, temperature (thermocouple and RTD), and process transducers, and provide standard process outputs of either 4 to 20 mA or 0 to 10 Vdc. The DRF Series features a modern housing design, that is easily mounted on standard 35 mm DIN rails. Connections are safely and securely made through pluggable screw terminal connectors, with input and output connections on the opposite sides of the module.

Functionality
The DRF Series is designed to maximize functionality. The front door of the housing provides easy access to span and offset potentiometers that may be used to field adjust the input and output signal range.

Isolation
The input, output and power circuits are isolated by 3500 volts of galvanic isolation. Isolation protects against potentially damaging voltages from passing through the signal conditioners into connected systems. It also provides improved measurement accuracy by minimizing the effects of ground loops and electrical noise.

Outputs
Each DRF Series signal conditioner is available with current and voltage output (only one may be used at a time). Available output types include 4 to 20 mA and 0 to 10 Vdc. Although pre-configured before shipping from the factory, the output may be changed by moving an internal jumper.

Standard outputs are linear and proportional to the signal input. Thermocouple input modules feature special circuitry to linearize the output to the actual temperature rather than to the non-linear signal produced by thermocouple sensors.

Specifications

(COMMON TO ALL MODELS)
Power: 24 Vdc ±10%, 230 Vac ±10% 50/60 Hz, 115 Vac ±10% 50/60 Hz
Power Consumption: <3.8 VA
Output: 4 to 20 mA and 0 to 10 Vdc
Maximum Voltage Output: 11 Vdc approx.
Minimum Voltage Output: -1 Vdc approx.
Minimum Load Resistance (Voltage): ≥1 KΩ
Maximum Current Output: 22 mA approx.
Maximum Current Output: -1.5 mA approx.
Maximum Load Resistance (current): ≤400 Ω
Accuracy: <0.2% or <0.3% depending on model
Linearity: <0.1% or <0.2% depending on model
Thermal Drift: <150 ppm/°C or 250 ppm/°C typical depending on model
Response Time: 70 mS (Process and DC input models); 250 mS (Temperature and AC input models)

Isolation*:
Input to Output: 3500 Veff
Power to Input: 3500 Veff
Power to Output: 3500 Veff (for AC powered models), 1K Veff (for DC powered models)
*Tested True RMS, 60 sec. leak <1 mA
Electrical Connections: Plug-in screw terminals
Protection: IP-30
MECHANICAL DIMENSIONS
Weight:
(DC Powered Models): 120 g (4.2 oz)
(AC Powered Models): 200 g (7 oz)
Dimensions:
(DC Powered models):
110 H x 22.5 W x 93 mm D (4.3 x 0.9 x 3.7")
(AC Powered models):
110 H x 37 W x 93 mm D (4.3 x 1.46 x 3.7")
Operating Temperature: 0 to 60°C (32 to 140°F)
Storage Temperature: -20 to 70°C (-4 to 158°F)

H

NEW

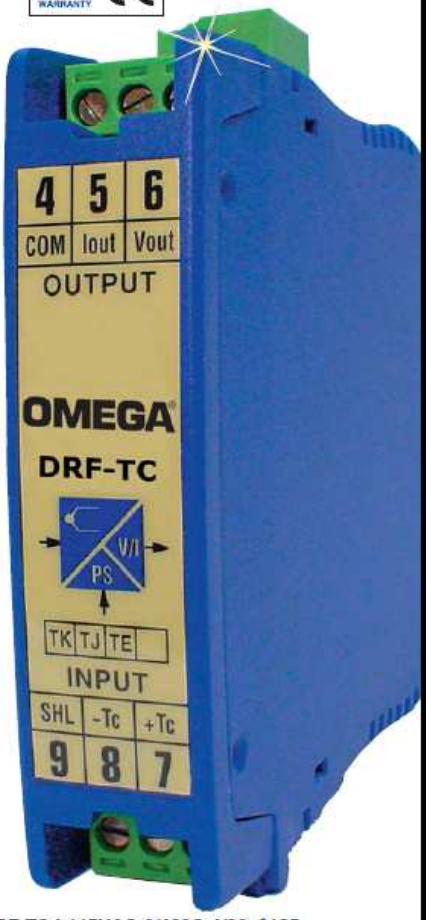
DRF-TC Thermocouple Input Signal Conditioner

1 YEAR WARRANTY CE

$185
Basic Module

- Models for J, K, T, E, R and S Thermocouples
- Accuracy 0.3%
- 250 ms Response Time
- Upscale Break Protection
- Linearized Output
- Galvanic Isolation Between Input, Output and Power

The DRF-TC thermocouple signal conditioners accept thermocouple input and provide a linearized and isolated 0 to 10 Vdc or 4 to 20 mA output. Models are available with three different power options; 24Vdc, 120 Vac and 240 Vac. The DRF-TC conditioners are ideally suited for industrial applications. All models mount on a standard 35 mm DIN rail and provide galvanic isolation between input, output and power up to 3500 Veff (model specific). To insure maximum measurement accuracy the units feature cold junction compensation, 0.2% linearity and less than 0.1°C/1°C thermal drift due to compensation. Module response time is 250 ms or less.



DRF-TCJ-115VAC-0/400C-4/20, $185, shown larger than actual size

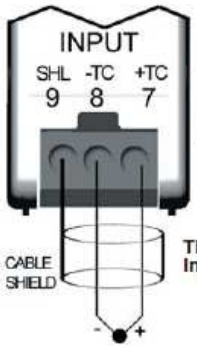
Range Code Table

Range Code	Range	J	K	T	E	R	S
0/100C	0 to 100°C				X		
0/150C	0 to 150°C	X	X				
0/175C	0 to 175°C				X		
0/200C	0 to 200°C			X			
0/250C	0 to 250°C	X	X				
0/300C	0 to 300°C			X	X		
0/400C	0 to 400°C	X	X	X			
0/500C	0 to 500°C				X		
0/700C	0 to 700°C	X	X				
0/800C	0 to 800°C				X		
0/1200C	0 to 1200°C		X				
0/1600C	0 to 1600°C						X
850/1700C	850 to 1700°C					X	
Minimum Span*		85°C	85°C	100°C	85°C	100°C	100°C

** Custom ranges may be obtained by adjusting on-board zero and span potentiometers. The minimum range is limited by the minimum span specification.*

Specifications

Accuracy: <0.3% full scale
Linearity: <0.2% full scale
Thermal Drift: <250 ppm/°C typical
Thermocouple CJC Drift: 0.1°C/°C
Response Time: <250 mS (90% of signal)
Input Impedance: 1 MΩ
Over Voltage Protection: 10 V



Thermocouple probe types: J, K, E, T, R, S (one model for each thermoucouple type)

Thermocouple Input

ALL MODELS AVAILABLE FOR FAST DELIVERY!

To Order *(Specify Model Number)*

Model No.	Price	Description
DRF-TCJ-(*)-(**)-(***)	$185	Signal conditioner for J type thermocouple
DRF-TCK-(*)-(**)-(***)	185	Signal conditioner for K type thermocouple
DRF-TCT-(*)-(**)-(***)	185	Signal conditioner for T type thermocouple
DRF-TCE-(*)-(**)-(***)	185	Signal conditioner for E type thermocouple
DRF-TCR-(*)-(**)-(***)	185	Signal conditioner for R type thermocouple
DRF-TCS-(*)-(**)-(***)	185	Signal conditioner for S type thermocouple
CS-3767	100	Reference Book: Electrical Engineers Handbook

** Specify Power, "24Vdc" for 24 Vdc power, "115Vac" for 115 Vac power or "230Vac" for 230 Vac power*
*** Specify range code from the Range Code Table*
**** Specify output, "4/20" for 4 to 20 mA output or "0/10" for 0 to 10 Vdc output*
Ordering Example: DRF-TCJ-115VAC-0/400C-4/20,** signal conditioner for a J thermocouple with a 0 to 400°C input range, 4 to 20 mA output and 115 Vac power, **$185.

H-3

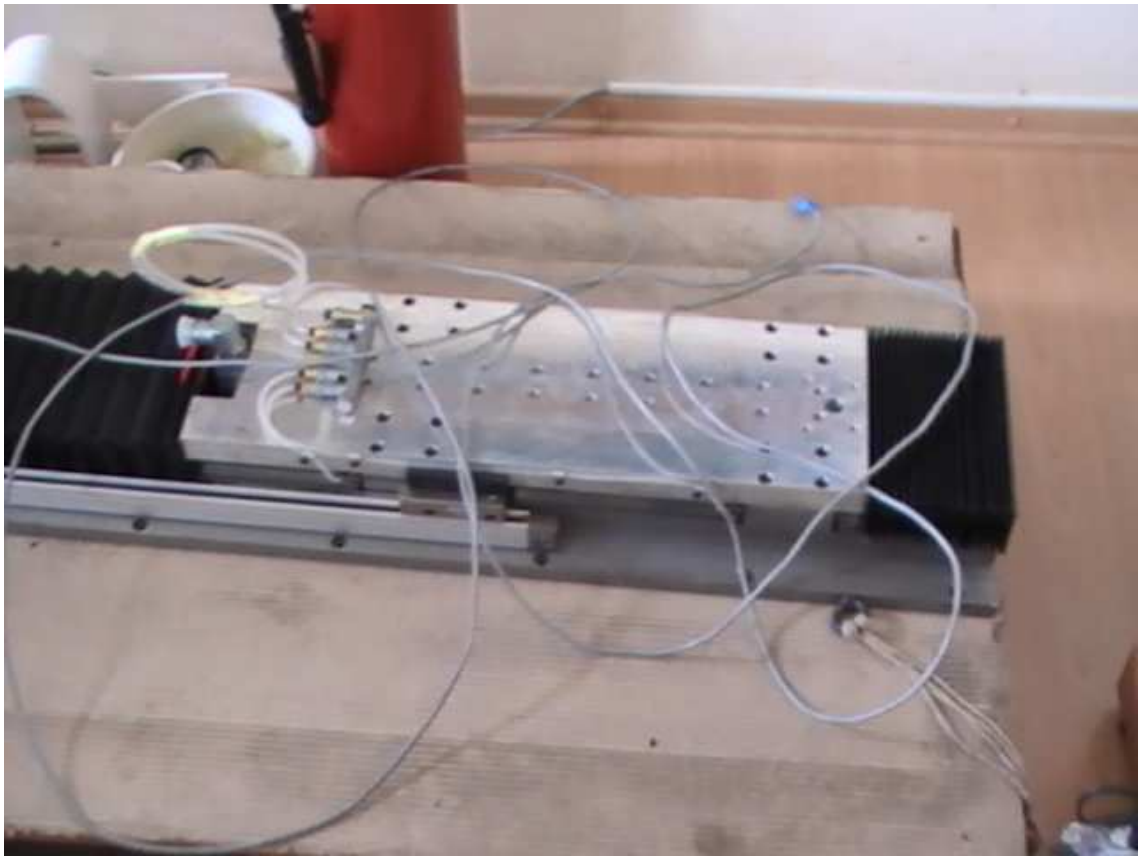
D SLIKE MODULA TRIBOMETRA PRIJE SKLAPANJA

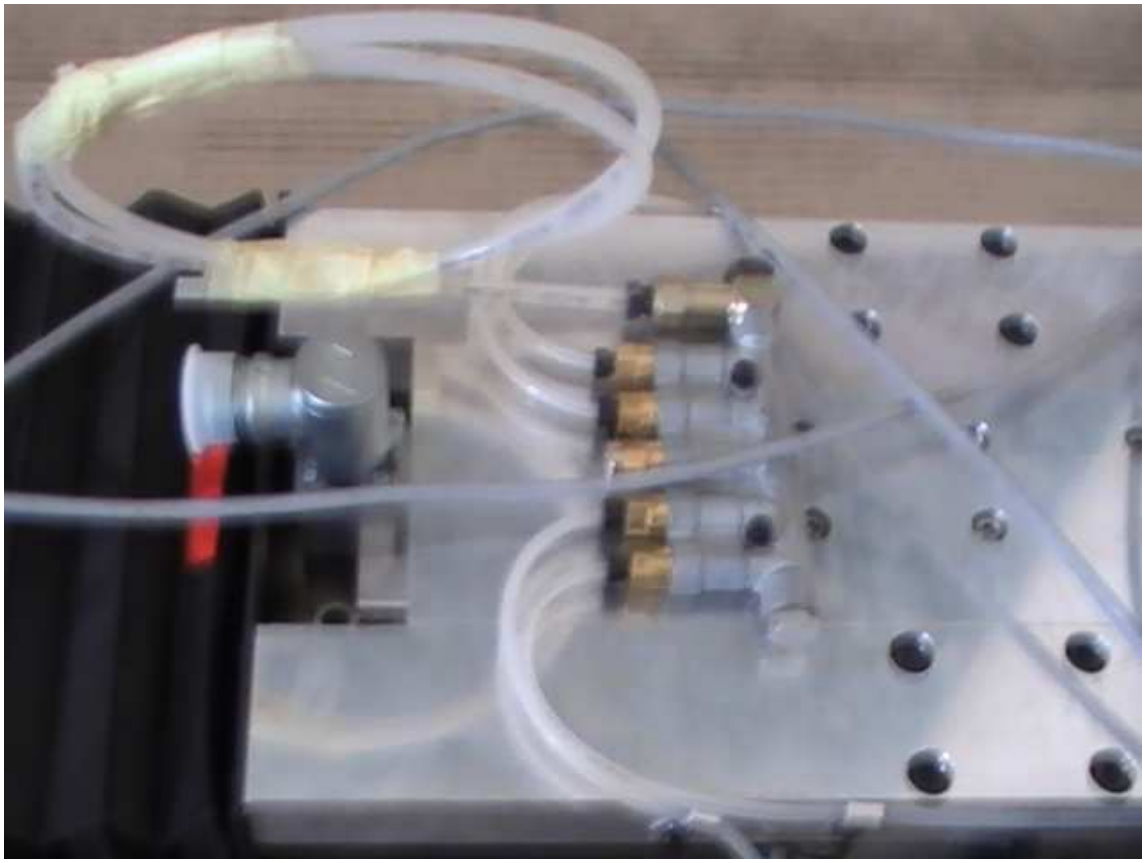
Sadržaj D

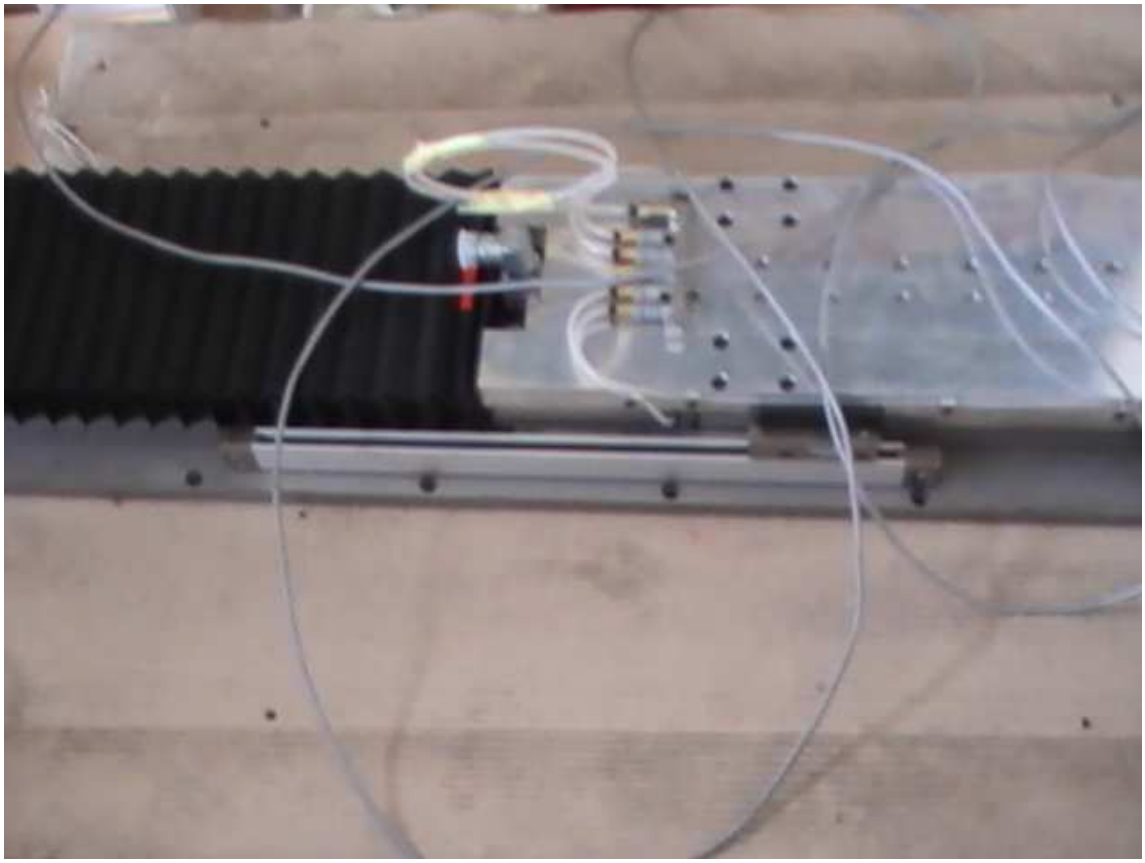
Prilog D1 – Linearna kolica na monobloku..... 178
Prilog D2 – Linearni motor na monobloku..... 179
Prilog D3 – Pritiskalica bez senzorske glave.....181

Prilog D1 – Linearna kolica na monobloku

Prilog D2 – Linearni motor na monobloku







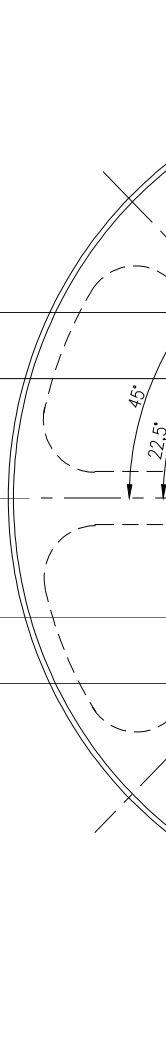
Prilog D3 – Pritiskalica bez senzorske glave

E TEHNIČKI CRTEŽI MODULA TRIBOMETRA I ELEMENATA ZA PRITEZANJE UZORAKA

Sadržaj E

Prilog E1 – Tehnički crtež diska na koji se postavljaju uzorci..... 183
Prilog E2 – Tehnički crtež nosača linearnog modula na koji se postavljaju uzorci..... 184
Prilog E3 – Tehnički crtež sklopa linearnog modula..... 185
Prilog E4 – Tehnički crtež sklopa rotacijskog modula..... 186
Prilog E5 – Tehnički crtež sklopa pritiskalice sa senzorskom glavom..... 187

ostavljaju uzorci



NAPOMENA:

1. BRIDOVE SKOSITI 0,5x45°
2. BRUNIRANO

Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj / Norma	Materijal	Dimenzije	Napomena

referentna mjera
mjera za stezanje
ispitna mjera
teorijska mjera

	Datum	Ime	Potpis
Projektirao	28.04.2008.	D.LIBL	
Ovjerio	08.2008.	M.KOSTELAC	

FSB_ZA

Objekt: TRIBOMETARSKI_SUSTAV

Podsklop: TRIBOLOŠKI_

Obrada oštrih ivica DIN 4687: +0,5 / 0; −0,2 / −0,5

Br. objekta: TS−000−000−00

Br. podsklopa: TS−000−4

Materijal: Č0361

Masa sirovca:

Kom: 1

Sirove mjere:

Odstupanje slobodnih mjera

Skidanje strugotine: DIN 7168

Zavarivanje: DIN 8570

Mj. originala:

Pozicija: 1:1

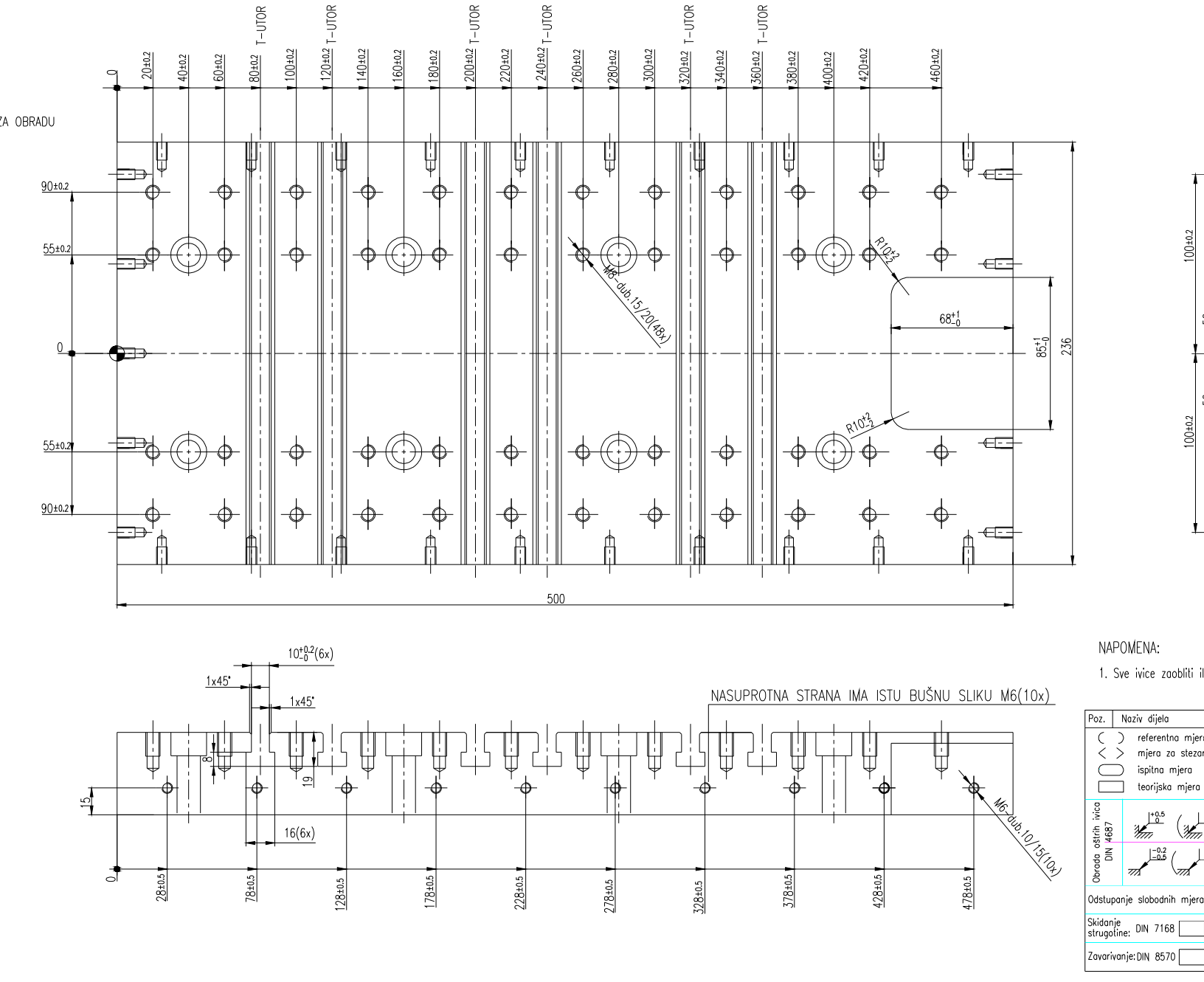
Naziv: DISK_FI_160

Broj naziva: TS−000−400−17

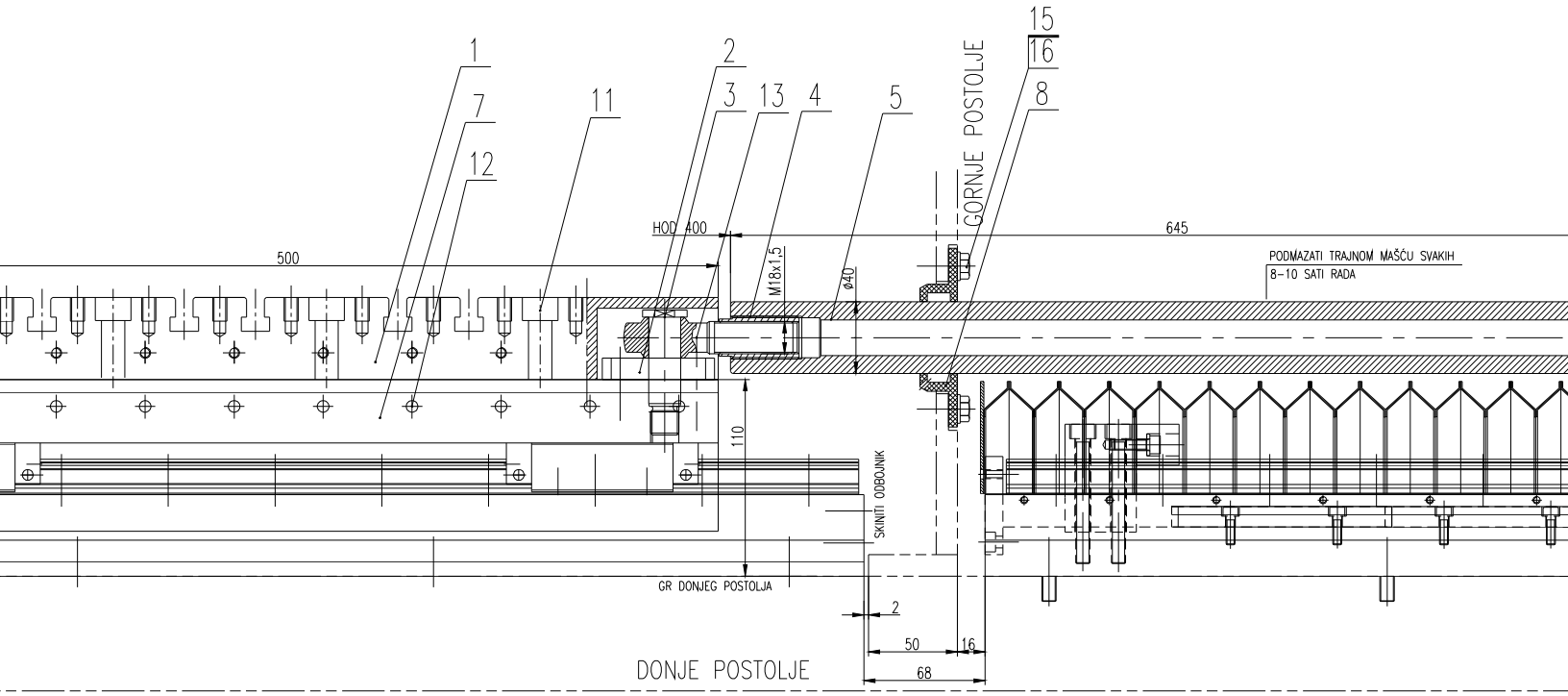
ISO−

KOTA

modula na koji se postavljaju uzorci



modula



16	OBIČNA PODLOŠKA A8	4	DIN 125	Č		
15	VIJAK S ŠEST. GLAVOM M8x20	4	DIN 933	8.8		ILI M8x16
14	IMBUS VIJAK S NIS. GLAVOM M8x20	8	DIN 6912	8.8		
13	ZGLOBNA GLAVA	2	GAKFR 18 PB		ø18/M18x1,5	INA WALZLAGER
12	VIJAK S ZAOBLJENOM GLAVOM M6x10	20	ISO 7380	8.8		ILI DIN 7985
11	IMBUS VIJAK M12x45	8	DIN 912	8.8		ILI M12x50

11	
10	
9	
8	PREGRAD
7	BOČNI ŠT
6	PODLOŽN
5	KLIPNJAČ
4	NAVOJNI
3	VIJAK M1
2	PODLOŽN
1	PLOČA
Poz.	Naziv d

( ) refe
< > mje
ispi
teor

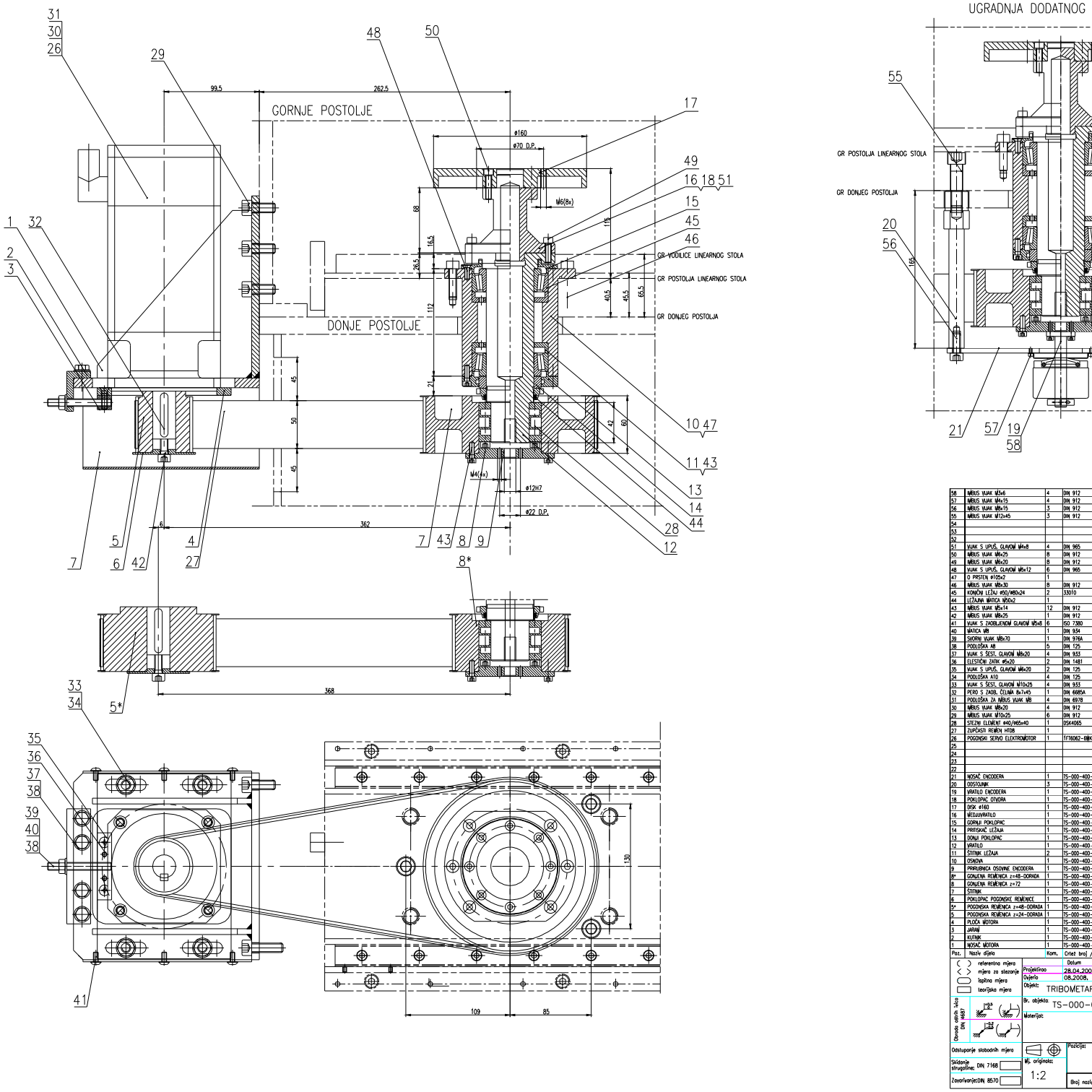
Obrada oštrih ivica DIN 4687

Odstupanje slob

Skidanje strugotine: DIN

Zavarivanje: DIN

g modula


GORNJE POSTOLJE
DONJE POSTOLJE
UGRADNJA DODATNOG
GR-VODILICE LINEARNOG STOLA
GR POSTOLJA LINEARNOG STOLA
GR DONJEG POSTOLJA
TRIBOMETAF
TS-000-
1:2

e sa senzorskom glavom

e sa senzorskom glavom - tlocrt