

UNIVERZA V LJUBLJANI

Fakulteta za strojništvo

**Razvoj in izdelava stroja za vstavljanje izolacije v
kolesni elektromotor**

Diplomsko delo Visokošolskega strokovnega študijskega programa I. stopnje
STROJNIŠTVO

Jan Capuder

Ljubljana, september 2018

UNIVERZA V LJUBLJANI

Fakulteta za strojništvo

**Razvoj in izdelava stroja za vstavljanje izolacije v
kolesni elektromotor**

Diplomsko delo Visokošolskega strokovnega študijskega programa I. stopnje
STROJNIŠTVO

Jan Capuder

Mentor: doc. dr. Miha Ambrož, univ. dipl. inž.

Ljubljana, september 2018

Prostor za podpisano temo zaključnega dela.

Kandidat
Jan CAPUDER

VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJSKI PROGRAM I. STOPNJE STROJNIŠTVO: VS I/576

NASLOV TEME: **Razvoj in izdelava stroja za vstavljanje izolacije v kolesni elektromotor**

V uvodu na kratko predstavite pomen izolacije statorskega navitja v elektromotorju in dosednji način njenega vstavljanja. V nadaljevanju izdelajte koncept zasnove avtomatizirane naprave za vstavljanje izolacije in opišite teoretične osnove njenega delovanja. V glavnem delu naloge razvijte posamezne podsklope naprave in predvidite njihovo montažo v samostojno napravo. Predstavite izdelavo posameznih podsklopov, njihovo montažo ter predvideno delovanje. Na izdelani napravi eksperimentalno preverite in analizirajte njeno delovanje in rezultate analiz predstavite v diskusiji. V zaključku izdelajte in predstavite primerjavo vstavljanja izolacije z izdelano napravo in ročnega vstavljanja po prejšnjem postopku. Podajte tudi predloge za morebitne izboljšave same naprave in njene uporabe.

Diplomsko delo je treba oddati v jezikovno in terminološko pravilni slovenščini.
Rok za oddajo tega dela je šest mesecev od dneva prevzema.

Mentor

doc. dr. Miha Ambrož, univ. dipl. inž.



Predsednik diplomske komisije

prof. dr. Roman Šturm, univ. dipl. inž.

Podpisani sem delo
prevzel v Ljubljani,

dne, 20.7.2018



Prodekan za pedagoško dejavnost I. stopnje

izr. prof. dr. Matija Jezeršek, univ. dipl. inž.



Zahvala

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Mihi Ambrožu za vso pomoč in usmerjanje pri izdelavi diplomskega dela, podjetju Elaphe, pogonske tehnologije, ki mi je omogočilo delo na projektu, vsem sodelavcem, še posebej skupini, s katero smo pripeljali projekt do cilja.

Prav posebej se zahvaljujem družini, ki me je vsa leta spodbujala, me finančno podpirala in mi nudila pomoč.

Izjava

Spodaj podpisani/-a Jan Capuder študent/-ka Fakultete za strojništvo Univerze v Ljubljani, z vpisno številko 23130039, avtor/-ica pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Razvoj in izdelava stroja za vstavljanje izolacije v kolesni elektromotor,

IZJAVLJAM,

1. a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
 - b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;
5. da soglašam z uporabo elektronske oblike pisnega zaključnega dela študija za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija;
8. da dovoljujem uporabo mojega rojstnega datuma v zapisu COBISS.

V Ljubljani, 19. 8. 2018

Podpis avtorja/-ice:



* Obkrožite varianto a) ali b).

Izvleček

UDK 621.313.13:519.6(043.2)

Tek. štev.: VS I/576

Razvoj in izdelava stroja za vstavljanje izolacije v kolesni elektromotor

Jan Capuder

Ključne besede: kolesni motor
avtomatizacija
koračni motor
pnevmatski cilinder
planetno gonilo
izdelava stroja

V diplomskem delu je opisana izdelava stroja za vstavljanje izolacije v stator kolesnega elektromotorja. V začetku so opisane teoretične osnove mogočih rešitev za rotacijsko gibanje, translacijo in za prenos momenta. Med načrtovanjem stroja smo si pomagali z grobimi skicami, prek katerih smo si zadali smernice za detajlno konstruiranje modulov. Izdelan stroj deluje brezhibno, odpravljene so tudi vse napake, ki so bile identificirane. Cikel vstavljanja izolacije je končan v šestih minutah, izolacija je vstavljena v aksialni smeri znotraj toleranc, njena višina pa je znotraj maksimalnega radija.

Abstract

UDC 621.313.13:519.6(043.2)

No.: VS I/576

Development and manufacture of Insulation insertion machine for electric in-wheel motor

Jan Capuder

Key words: in-wheel motor
 automation
 stepper motor
 pneumatic cylinder
 planetary gearbox
 machine building

The thesis describes the design and manufacture of a machine for inserting insulation into a stator of an in-wheel electric motor. The thesis starts with the theoretical basics of possible solutions for rotational motion, linear translation and principles of moment transfer. During the design of the machine we helped ourselves with rough sketches, which gave us guidelines for the final design of the machine. The insulation machine works adequately, all errors which have been identified have been eliminated. The insulation insertion cycle is completed within six minutes, the insulation is inserted in the axial direction within tolerances, the height of the insulation is also within tolerance.

Kazalo

Kazalo slik	xvii
Kazalo preglednic	xviii
Seznam uporabljenih simbolov	xix
Seznam uporabljenih okrajšav	xx
1 Uvod.....	1
1.1 Ozadje problema	1
1.2 Cilji.....	1
2 Teoretične osnove in pregled literature	3
2.1 Pogon	3
2.1.1 Koračni motor	3
2.1.1.1 Koračni motor s permanentnim magnetom	3
2.1.1.2 Značilnosti	5
2.1.1.3 Uporaba.....	5
2.2 Prenos momenta	6
2.2.1 Objemna gredna vez	6
2.2.2 Zveza s prečnim zatičem	6
2.3 Planetno gonilo.....	7
2.3.1 Opis.....	8
2.3.2 Lastnosti.....	9
2.3.3 Uporaba.....	9
2.4 Pnevmatški cilindri.....	10
2.4.1 Enosmerni pnevmatski cilindri	10
2.4.2 Dvosmerni pnevmatski cilindri.....	11
3 Metodologija raziskave.....	13
3.1 Koncipiranje	13
3.1.1 Podajalni modul	14
3.1.2 Vstavljalni modul.....	14
3.1.3 Oblikovni modul	15
3.1.4 Pogonski modul	16
3.1.5 Celica	17

3.2 Preračuni.....	18
3.2.1 Preračun pogonskega modula.....	19
3.2.2 Preračun sil v podporah na gredi	20
3.3 Eksperimentalni del	21
3.3.1 Podajalni modul.....	21
3.3.2 Vstavljalni modul	23
3.3.3 Pogonski modul	24
3.3.4 Oblikovni modul.....	26
3.3.5 Celica.....	27
3.3.6 Zagon in testiranje stroja	28
4 Rezultati.....	33
5 Diskusija	37
6 Zaključki.....	39
7 Literatura	41
Zahvala	v
Izjava	vii
Izvleček	ix
Abstract	xi
Kazalo	xiii
Kazalo slik	xvii
Kazalo preglednic	xviii
Seznam uporabljenih simbolov	xix
Seznam uporabljenih okrajšav.....	xx
1 Uvod	1
1.1 Ozadje problema	1
1.2 Cilji	1
2 Teoretične osnove in pregled literature.....	3

2.1 Pogon	3
2.1.1 Koračni motor	3
2.1.1.1 Koračni motor s permanentnim magnetom	3
2.1.1.2 Značilnosti	5
2.1.1.3 Uporaba.....	5
2.2 Prenos momenta	6
2.2.1 Objemna gredna vez	6
2.2.2 Zveza s prečnim zatičem	6
2.3 Planetno gonilo.....	7
2.3.1 Opis.....	8
2.3.2 Lastnosti.....	9
2.3.3 Uporaba.....	9
2.4 Pnevmatški cilindri.....	10
2.4.1 Enosmerni pnevmatski cilindri	10
2.4.2 Dvosmerni pnevmatski cilindri.....	11
3 Metodologija raziskave.....	13
3.1 Koncipiranje	13
3.1.1 Podajalni modul	14
3.1.2 Vstavljalni modul.....	14
3.1.3 Oblikovni modul	15
3.1.4 Pogonski modul	16
3.1.5 Celica	17
3.2 Preračuni	18
3.2.1 Preračun pogonskega modula	19
3.2.2 Preračun sil v podporah na gredi	20
3.3 Eksperimentalni del.....	21
3.3.1 Podajalni modul	21
3.3.2 Vstavljalni modul.....	23
3.3.3 Pogonski modul	24
3.3.4 Oblikovni modul.....	26
3.3.5 Celica	27
3.3.6 Zagon in testiranje stroja	28
4 Rezultati	33
5 Diskusija.....	37

6	Zaključki.....	39
7	Literatura	41

Kazalo slik

Slika 2.1: Koračni motor Fastech 86 XL.....	3
Slika 2.2: Prerez koračnega motorja	4
Slika 2.3: Potek delovanja koračnega motorja	5
Slika 2.4: Objemna gredna vez z enodelnim pestom	6
Slika 2.5: Primer prečnega zatiča za prenos momenta	7
Slika 2.6: Valjasto zviti vzmetni zatič.....	7
Slika 2.7: Enostopenjsko planetno gonilo	8
Slika 2.8: Planetno gonilo z dvema zobnikoma z zunanjim ozobjem.....	9
Slika 2.9: Dvosmerni pnevmatski cilinder z dodatnim vodenjem in mehansko zaporo za povratni gib.....	10
Slika 2.10: Enosmerni pnevmatski cilinder z dodatno vzmetjo za povratni gib	11
Slika 2.11: Dvosmerni pnevmatski cilinder z dodatnim preciznim vodenjem s krogličnimi vodili	11
Slika 3.1: Koncept celotnega stroja.....	13
Slika 3.2: Koncept podajalnega modula.....	14
Slika 3.3: Koncept vstavljalnega modula	15
Slika 3.4: Koncept oblikovnega modula	16
Slika 3.5: Koncept pogonskega modula.....	17
Slika 3.6: Koncept celice stroja za vstavljanje izolacije	18
Slika 3.7: Lamelirano jedro s tolerancami.....	19
Slika 3.8: Shematski prikaz delovanja sil.....	20
Slika 3.9: Podajalni modul	21
Slika 3.10: Idealna oblika vrha izolacije	22
Slika 3.11: Vstavljalni modul.....	23
Slika 3.12: Pogonski modul	24
Slika 3.13: Gred	25
Slika 3.14: Oblikovni modul	26
Slika 3.15: Celica	27
Slika 3.16: Nastavljanje višine stroja in vstavljalnega modula aksialno.....	29
Slika 3.17: Nastavljanje oblikovnega in podajalnega modula.....	30
Slika 4.1: Stroj za vstavljanje izolacije med delovanjem.....	33
Slika 4.2: Nastavljen vstavljalni in podajalni modul.....	35

Kazalo preglednic

Preglednica 3.1: Vrednosti parametrov za preračun tolerance pogonskega modula. 19

Seznam uporabljenih simbolov

Oznaka	Enota	Pomen
D	mm	premer gredi
D_n	mm	premer pesta
d_1	mm	premer vzmetnega zatiča
s	mm	debelina stene vzmetnega zatiča
p	/	os planetnika
P	/	planetnik
C	/	planetna gred
A	/	centralni zobnik – sončnik
F	N	sila
L_o	mm	širina ostanka
L_u	mm	širina utora
T_{pu}	mm	toleranca pozicije utora
T_{su}	mm	toleranca širine utora
T_{bs}	mm	toleranca jedra <i>skewinga</i>
T_f	mm	toleranca reduktorja
D_i	mm	debelina izolacije
D_p	mm	debelina potiskača
<hr/> Indeksi <hr/>		
n		pesto
o		ostanek
u		utor
pu		pozicija utora
su		širina utora
bs		jedro <i>skewinga</i>
f		reduktor
i		izolacija
p		potiskač

Seznam uporabljenih okrajšav

Okrajšava	Pomen
LJ	lamelirano jedro
MGPM	kratkohodni pnevmatski cilinder

1 Uvod

1.1 Ozadje problema

Zaradi potreb po izdelavi sestavljalne linije kolesnega električnega motorja smo v podjetju, v katerem opravljam dejavnosti za diplomsko delo, začeli projekt, imenovan RS Line. V okviru tega projekta, ki je koordiniral vse naloge, povezane s postavitvijo sestavljalne linije statorskega dela elektromotorja, smo morali izdelati določene stroje, prek katerih bo tekla tekoči trak s paletami, ali pa bodo ti stali ob liniji. Eden izmed strojev je tudi stroj za vstavljanje izolacije v stator elektromotorja, ki je opisan v diplomskem delu. Ker je izdelava linije za sestavo elektromotorja potekala še s partnerskim podjetjem in je sestavljanje takšnih kolesnih elektromotorjev znano samo našemu podjetju, smo morali sestaviti sestavljalni postopek in podati vse predloge za umestitev strojev, ki jih bomo izdelali, v proizvodnjo. Na podlagi zahtev in sestavljalnega postopka smo lahko začeli izdelovanje strojev.

1.2 Cilji

Zaradi zahtev avtomobilske industrije, ki pravi, da morajo imeti vsi deli, prek katerih se prenaša visoka napetost, dvojno izolativno zaščito, v lamelirano jedro vstavljamo izolacijo. Pred strojem za vstavljanje izolacije smo izolacijo vstavljali na ročni pripravi; ta je vzela veliko časa in ni bilo zagotovljene ponovljivosti. Glavni cilj dela je izdelati stroj, ki bo zmožen vstaviti izolacijo v lamelirano jedro kolesnega elektromotorja v zahtevanem času, tj. 12 minut. Izolacija mora biti vstavljena z določeno ponovljivostjo, vrhovi ne smejo presegati določenega radija, aksialna poravnava glede na lamelirano jedro mora biti v mejah toleranc. Floris stroja mora biti tak, da je primeren za pošiljanje na evropaleti dimenzij 1200×800 mm. Celoten stroj mora biti konstruiran tako, da je njegova ergonomija prilagojena delavcu na Kitajskem.

2 Teoretične osnove in pregled literature

2.1 Pogon

2.1.1 Koračni motor



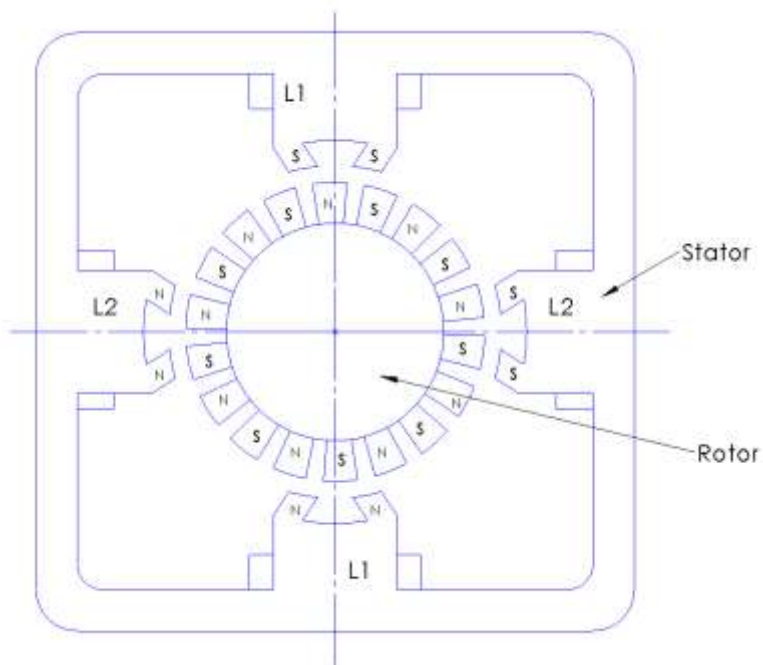
Slika 2.1: Koračni motor Fastech 86 XL

Koračni motorji (slika 2.1) so elektromehanske naprave, ki pretvarjajo digitalne vhodne impulze v mehansko rotacijsko gibanje. So enosmerni brezkrtačni električni motorji. Vsak polni krog rotacije je razdeljen na enako število korakov [4].

2.1.1.1 Koračni motor s permanentnim magnetom

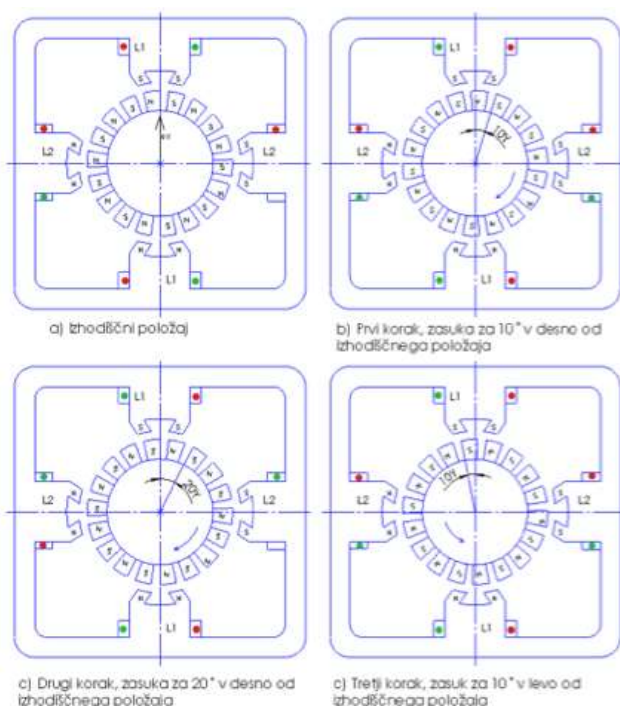
Koračni motorji imajo ime po svojem delovanju, saj se rotor ne vrti sinhrono, ampak po korakih. Če je frekvenca krmiljenja majhna, so koraki tudi vidni. Tako je kot koraka pri

koračnem motorju s permanentnim rotorjem odvisen od razmerja števila magnetnih polov na statorju in števila magnetnih polov na rotorju. Poli so fiksni in omejeni, kar pa je odvisno od značilnosti magnetnega materiala.



Slika 2.2: Prerez koračnega motorja

Rotor ima na svojem obodu lamele. Narejen je iz trajnega magneta, tako da so na njem lamele namagnetene izmenično glede na pol. Na statorju, ki je hkrati tudi ohišje (slika 2.2), ni pa vedno nujno, so nameščena navitja L 1 in L 2, sestavljena iz dveh delov. Navitji v parih pola tako ustvarjata magnetno polje. Vedno si južni in severni pol para pola ležita nasproti [8].



Slika 2.3: Potek delovanja koračnega motorja

Rotor se vedno ustavi tako, da je lamela s severnim polom nasproti z južnim polom lamele na statorju (slika 2.3 a). Če tok spremeni smer v navpičnem zgornjem navitju L1, navitji L2 pa je ne spremenita, se rotor zamakne za polovično širino lamele (slika 2.3 b). Naslednji korak je sprememba smeri toka v navitju L2, posledično pa se spremeni polariteta v vodoravnem paru pola. V tem primeru se rotor zavrti za celoten korak. Tako se lahko vsaka sprememba polaritete v vrstnem redu L1, L2, L1 odzove kot rotacija rotorja za en celoten korak. Koračnim motorjem s permanentnim magnetom lahko spreminjamo tudi smer vrtenja, in sicer s pravilno menjavo smeri toka v navitjih L1 in L2 [8].

2.1.1.2 Značilnosti

Značilnosti vseh koračnih motorjev sta dobro nadzorovano gibanje rotacije in nizka cena. Odlikujeta jih zanesljivost in majhna potreba po vzdrževanju. Največji navor imajo v mirovanju in nimajo kumulativne napake [5].

2.1.1.3 Uporaba

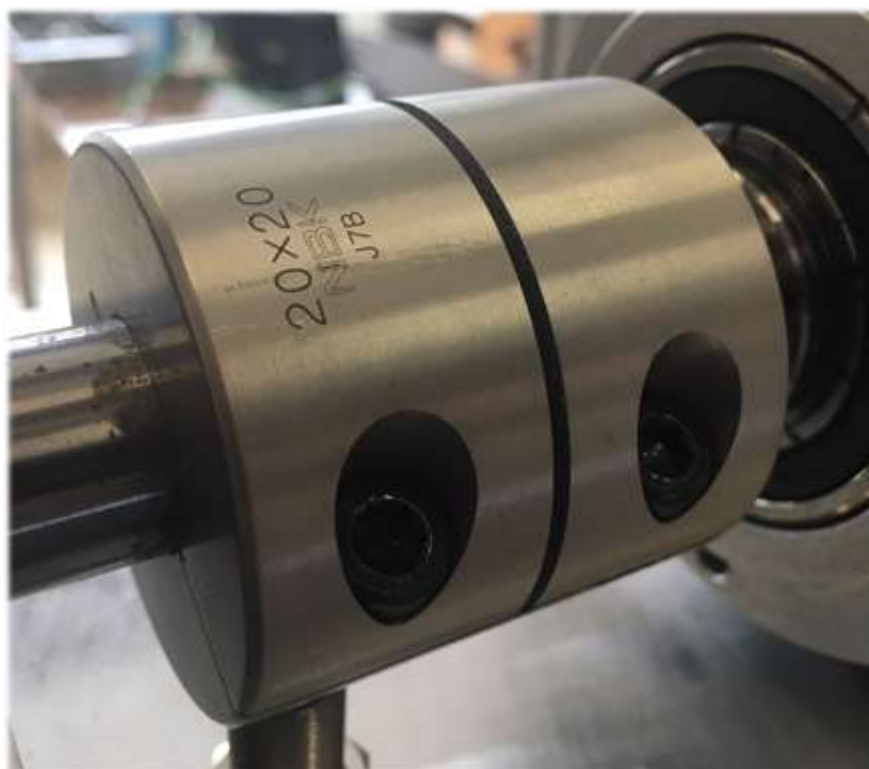
Velika prednost hitrega, natančnega pozicioniranja in cenovno zelo dostopnega produkta naredi koračne motorje uporabne na zelo širokem spektru območij. Tako smo jih uporabili tudi v naši aplikaciji za vrtenje statorja med vstavljanjem izolacije. Uporabljajo se tudi v:

- koordinatnih strojih XYZ; v to skupino spadajo 3D-tiskalniki, lažji obdelovalni stroji;
- krmiljenju ventilov in črpalk s sprejemljivo hitrostjo;
- montaži njih linijah za izvršitve raznih gibov za avtomatsko tehtanje in označevanje;
- splošni strojni industriji za avtomatizirane stroje za strojno obdelavo;
- medicini za vzorčevalce, respiratorje, črpalke in v strojih za analizo krvi [4], [5].

2.2 Prenos momenta

2.2.1 Objemna gredna vez

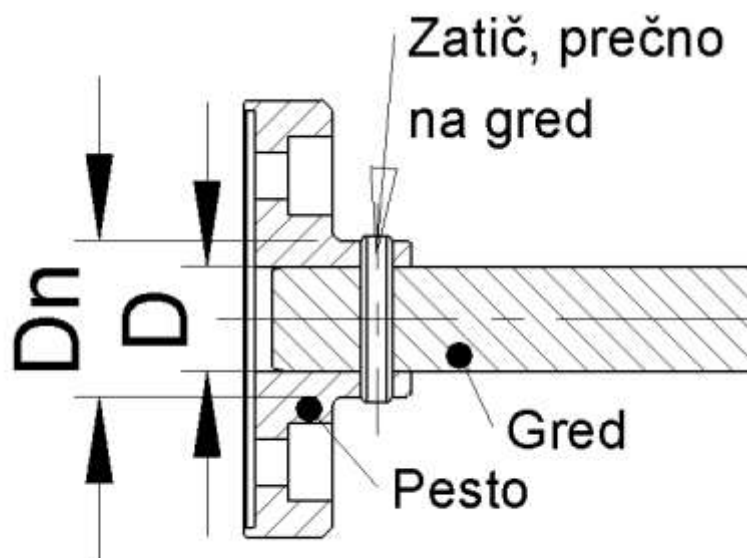
Objemna gredna vez (slika 2.4) poveže pesto in gred v stalno in togo, vendar razstavljivo zvezo. Gredna vez prenaša vrtilni moment s trenjem, prav tako pa tudi sunke, udarce ... Gradiva, iz katerih se izdelujejo objemne gredne vezi, so predvsem jeklo ter temprana, jeklena in siva litina. Uporabljamo jih tam, kjer je lahko zagotovljena soosnost pri montaži in izdelavi montažnih delov. Odlikuje jih dolga živiljenjska doba, ker se njihovi deli ne obrabljajo hitro in ne zahtevajo vzdrževanja [1].



Slika 2.4: Objemna gredna vez z enodelnim pestom

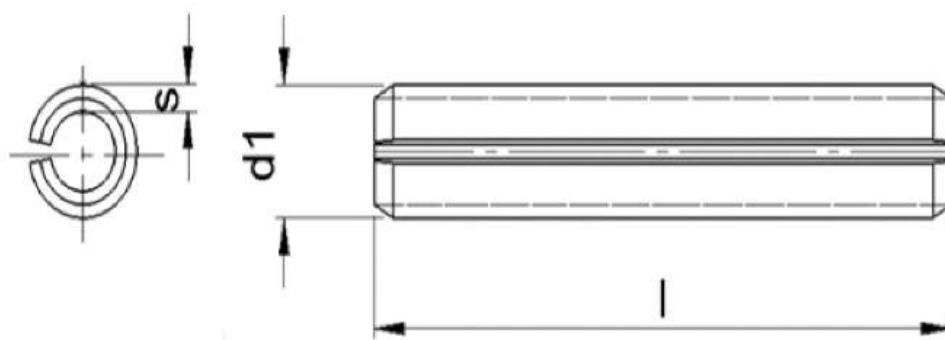
2.2.2 Zveza s prečnim zatičem

Zvezo z zatičem (slika 2.5) štejemo med trdne razstavljive zveze. Zatiči so strojni element, ki se ga pogosto uporablja za trdno razstavljivo zvezo pesta z gredjo, omejitev hoda, centriranje, varovanje pozicije ali natančno fiksiranje strojnega elementa, za enkratno nastavitvev na mesto ali večkratno ponovljivo fiksiranje. V splošnem so zatiči iz tršega materiala, kot je material, ki ga spajamo [9].



Slika 2.5: Primer prečnega zatiča za prenos momenta

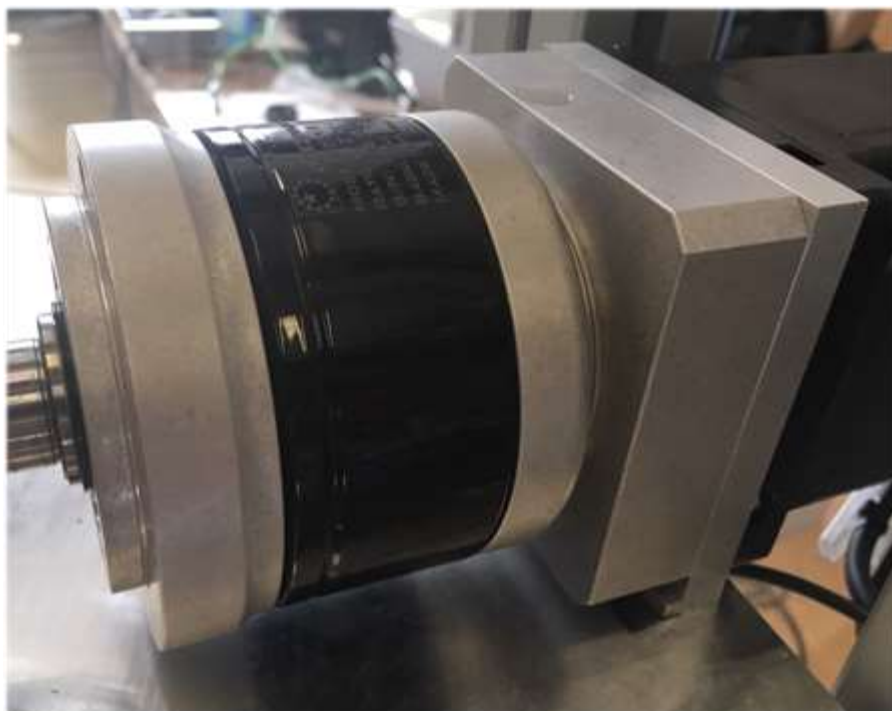
Vzmetni zatiči so zatiči, ki se med montažo v luknjo deformirajo in tvorijo tesen ujem. Uporabljamo jih kot varnostne zatiče ali kot zatič, pri katerem so luknje samo grobo obdelane – izvrtine H 12. Najbolj uporabljeni so spiralno in valjasto zviti vzmetni zatiči (slika 2.6) [2].



Slika 2.6: Valjasto zviti vzmetni zatič

2.3 Planetno gonilo

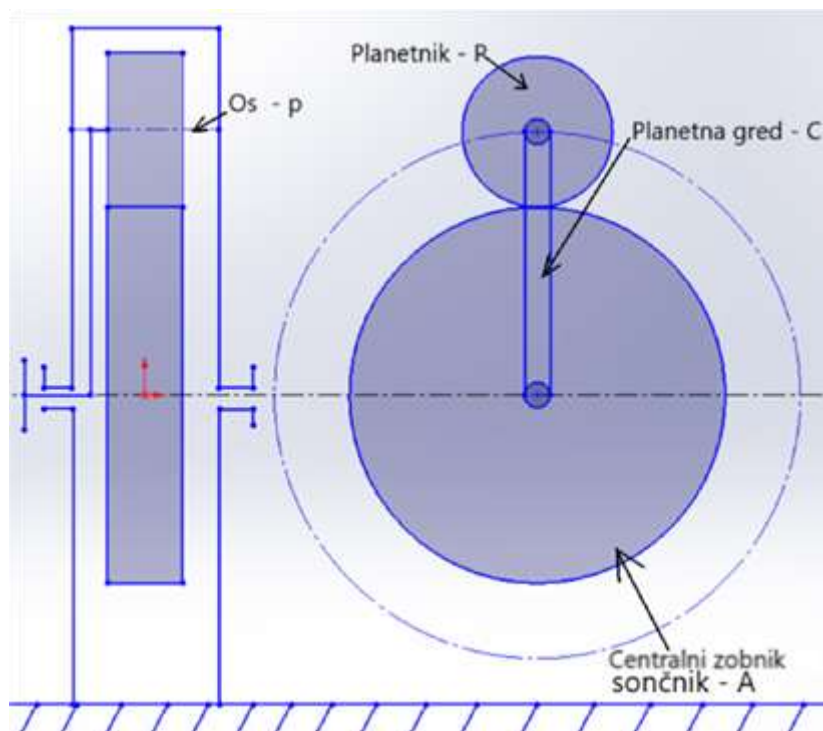
Planetna gonila so gonila, pri katerih je minimalno ena os, na katero je pritrjen zobnik, rotirajoča okrog centralne osi. V tehniški praksi so postala čedalje bolj uveljavljena, saj so majhnih dimenzij, imajo boljše izkoristke kot stoječa gonila, so vzdržljiva in imajo veliko prestavno razmerje (slika 2.7) [6].



Slika 2.7: Enostopenjsko planetno gonilo

2.3.1 Opis

Planetna gonila lahko uporabljamo kot samostojna gonila, ki imajo pogonsko in odgonsko gred. Takšna vrsta gonil se izdeluje v masovnih količinah in se uporablja v iste namene kot vse druge prenosnike moči [7].



Slika 2.8: Planetno gonilo z dvema zobnikoma z zunanjim ozobjem

Najpreprostejši izvedbi planetnega gonila sta izvedba z dvema zobnikoma z zunanjim ozobjem (slika 2.8) ter izvedba z zobnikom z enim notranjim in enim zunanjim ozobjem. Izvedba z dvema zunanjima zobnikoma je sestavljena iz enega centralnega zobnika sončnika »A« s pripadajočo gredjo in ene gredi z ročico, ki se imenuje planetna gred »C«, na kateri je os »p« in na njej planetnik »P«, ki kroži okrog sončnika »A« [6].

2.3.2 Lastnosti

V primerjavi s stoječimi klasičnimi gonili imajo planetna gonila nekaj prednosti:

- so kompaktna: zavzamejo malo prostora, kar posledično pomeni, da imajo majhno težo;
- prenašajo veliko moč na enoto volumna;
- imajo lahko veliko prestavno razmerje na zelo preprost način;
- dobra sposobnost porazdeljevanja moči med zobniki in posledično manjša obraba;
- zaradi velikega števila zobnikov je potrebnih veliko kosov, kar poveča vzdrževanje gonila;
- gonila lahko vzporedno ali zaporedno povezujemo modularno med seboj in tako večamo ali manjšamo prestavno razmerje [6].

2.3.3 Uporaba

Planetna gonila so zaradi svojih specifikacij in prednosti zaželeni na vseh področjih, na katerih potrebujemo redukcijo ali multiplikacijo vrtilnega momenta. Mi smo ga uporabili za redukcijo izhodne hitrosti gredi in povečanja momenta na pogonski gredi. Uporabljamo

jih tudi v avtomobilski industriji v avtomatskih menjalnikih, gospodarskih vozilih v pestu koles, gradbeni mehanizaciji, vetrnih turbinah in v gospodinjstvu v paličnih mešalnikih. Z njimi se srečujemo dejansko povsod: v strojogradnji, robotih, letalski in vesoljski tehnologiji, orodjih in v kmetijski mehanizaciji [6], [7].

2.4 Pnevmatiski cilindri

Pnevmatiski cilindri so delovne komponente, ki energijo stisnjenega zraka spreminjajo v premočrtno gibanje. V osnovi delimo cilindre na enosmerne, dvosmerne in na posebne izvedbe, ki so lahko standardnih ali namenskih izvedb. Pri vgradnji pnevmatskih cilindrov moramo paziti, da jim lahko omejimo hod samo mehansko. Za uravnavanje hitrosti uporabljamo dušilke, ki regulirajo pretok zraka skozi pnevmatski cilinder [3].



Slika 2.9: Dvosmerni pnevmatski cilinder z dodatnim vodenjem in mehansko zaporo za povratni gib

2.4.1 Enosmerni pnevmatski cilindri

Enosmerni pnevmatski cilindri (slika 2.10) energijo stisnjenega zraka pretvarjajo v premočrtno gibanje. V cilinder dovajamo stisnjen zrak za delovni gib skozi standardni priključek, ki je hkrati tudi priključek za povratni gib. Ta je običajno izveden s silo teže bremena, ki batnico potisne nazaj v prvotno lego, ali pa je v pnevmatski cilinder vgrajena vzmet. Obstaja več izvedb enosmernih pnevmatskih cilindrov. Za natančnejše vodenje lahko izberemo cilindre, ki imajo vgrajena dodatna vodila – kroglična ali drsna. Enosmerne pnevmatske cilindre uporabljamo, ko potrebujemo manjše sile, kratke hode in manjše hitrosti. Krmilimo jih z ventili 3/2 [3], [12].



Slika 2.10: Enosmerni pnevmatski cilinder z dodatno vzmetjo za povratni gib

2.4.2 Dvosmerni pnevmatski cilindri

Dvosmerni pnevmatski cilindri (slika 2.9) opravljajo delo v obeh smereh – v delovnem in povratnem gibu.



Slika 2.11: Dvosmerni pnevmatski cilinder z dodatnim preciznim vodenjem s krogličnimi vodili

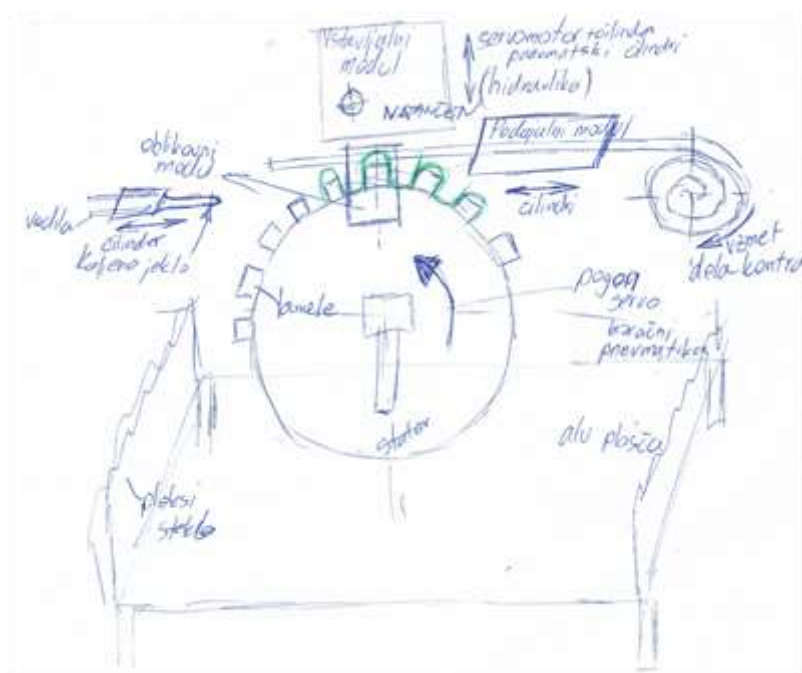
Dvosmerni pnevmatski cilindri so po standardu izdelani do premera bata 50 mm in dolž in 2.500 mm, vendar se lahko uporabljajo tudi v večjih dimenzijah. Dvosmerni pnevmatski cilindri (slika 2.11) imajo boljše vodenje batnice in dopuščajo manjše prečne sile kot enosmerni. Poraba zraka je enaka za delovni in povratni gib. Dosegajo hitrosti pomika batnice do 2.000 mm/s in sile do 48.000 N. Z dušilnim ventilom uravnavamo izpust zraka iz valja in tako upočasnimo gibanje batnice. Dvosmerne pnevmatske cilindre z dodatnimi

drsnimi vodili smo uporabili pri vstavljalnem modulu za potiskanje izolacije v utor, podajalnem modulu za podajanje izolacije in v oblikovnem modulu za premikanje oblikovne igle [3].

3 Metodologija raziskave

3.1 Koncipiranje

Pred začetkom detajlnega konstruiranja smo se lotili koncipiranja. Pogledali smo, v kakšnem stanju pride stator do postaje za vstavljanje izolacije in kaj mora stroj narediti, da zadosti zahtevam, ki so bile podane v začetku projekta. Načrtovanje smo začeli tako, da smo pregledali, kako je izolacija vstavljena v lamelirano jedro ter kakšna so še dovoljena odstopanja v radialni in aksialni smeri; na podlagi teh podatkov smo lahko začeli risanje osnutkov (slika 3.1) posameznih operacij, ki bi se morale izvesti, da vstavimo izolacijo v lamelirano jedro.

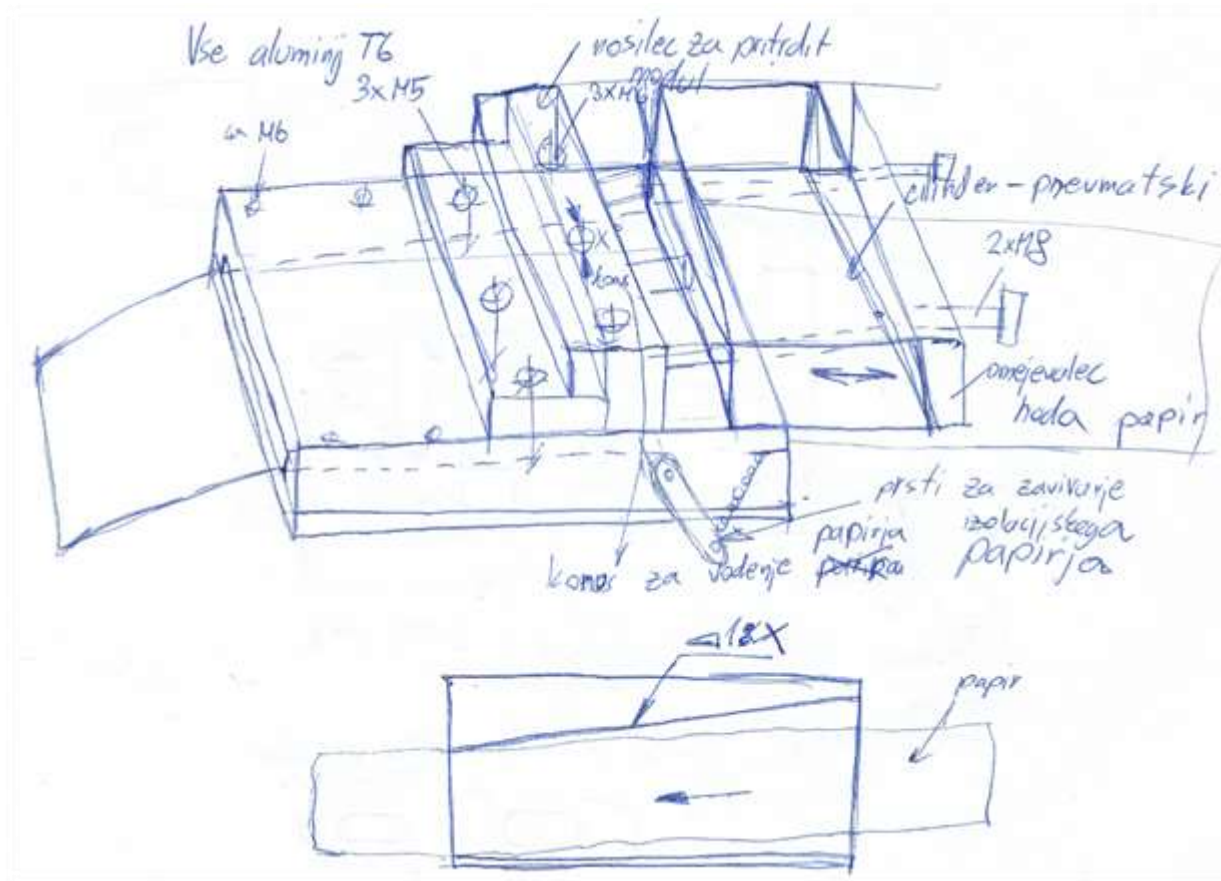


Slika 3.1: Koncept celotnega stroja

Po potrjenem konceptu, ki nam je dal večno predstavbo stroja, smo celoten stroj razdelili na posamezne module. To smo storili zaradi lažjega detajlnega konstruiranja stroja, lažje komunikacije med ekipo, ki sodeluje pri projektu, in posledično zaradi lažjega razdeljevanja nalog, saj je tako lažje definirati posamezniku, kaj mora narediti in v kakšnem obsegu so njegove naloge. S slike 3.1 je razvidno, da smo v koncept stroja umestili podajalni modul.

3.1.1 Podajalni modul

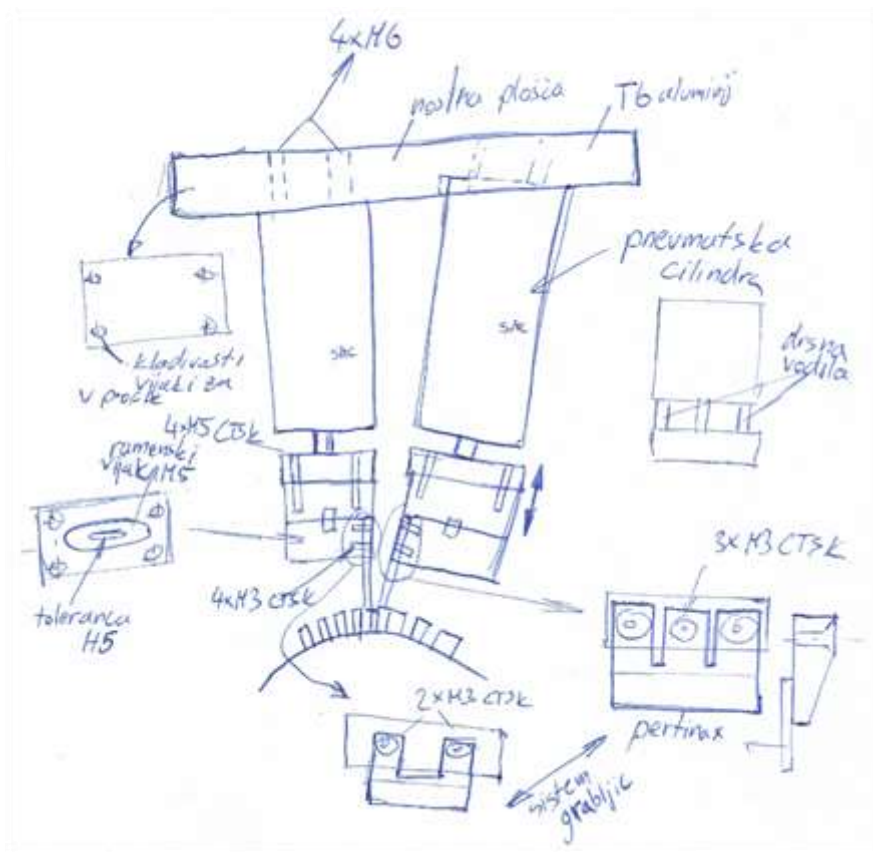
Podajalni modul (slika 3.2) bo opravljal nalogo podajanja izolacije do vstavljalnega modula. Med koncipiranjem smo morali upoštevati to, da je vodenje izolacije do vstavljanja zelo pomembno, saj se lahko naguba in posledično uniči. Zasnova modula je morala biti takšna, da je bila kar se da prilagodljiva in nastavljiva, kar bi nam pri zagonu in prvem nastavljanju zelo poenostavilo delo.



Slika 3.2: Koncept podajalnega modula

3.1.2 Vstavljalni modul

Modul, ki izolacijo potisne v utor, smo poimenovali vstavljalni modul (slika 3.3).

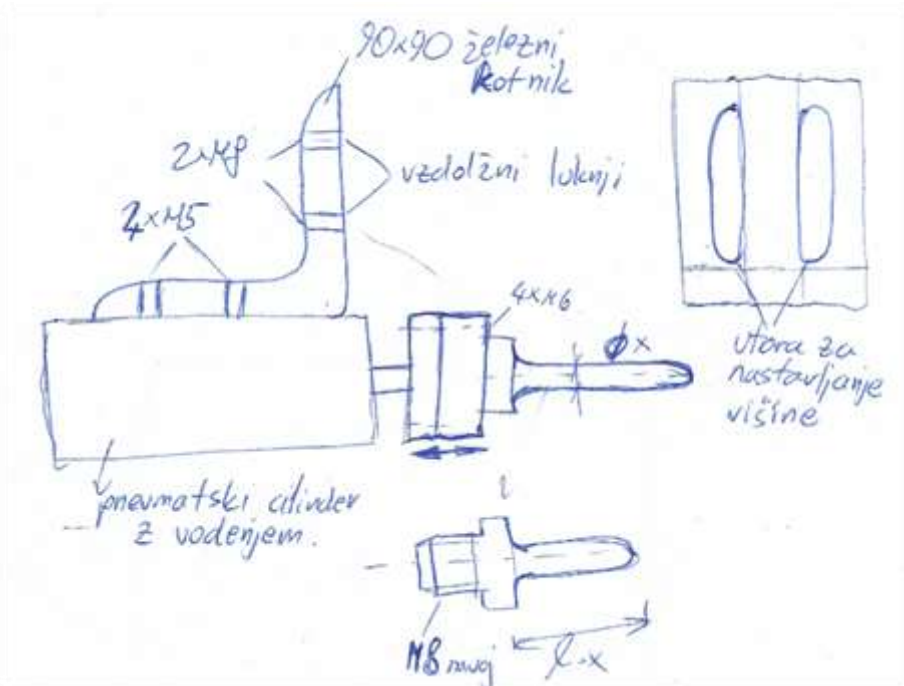


Slika 3.3: Koncept vstavljalnega modula

Posebej smo morali biti pozorni, da bo modul narejen tako, da bo lahko dostopen za nastavljanje, saj je do napak in popravkov iz izkušenj največkrat prišlo na tem modulu. Natančnost vstavljanja in hitrost sta bili pri načrtovanju vstavljalnega modula ključni.

3.1.3 Oblikovni modul

Da so vrhovi izolacije kar se da enaki in znotraj dovoljenih odstopanj, smo načrtovali oblikovni modul (slika 3.4).

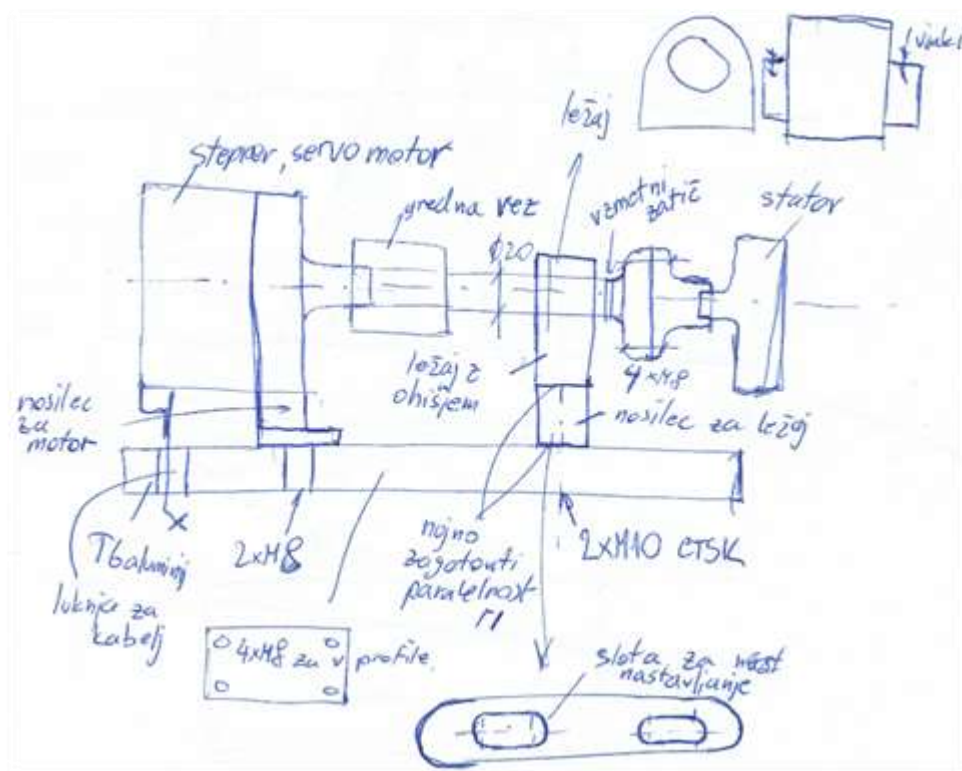


Slika 3.4: Koncept oblikovnega modula

Ta modul smo v koncipiranju načrtovali manj podrobno kot druge module, saj je bila samo ena komponenta – oblikovna igla – težje izvedljiva, a ne toliko modelirno kot glede načina izdelave, saj je premer igle precej majhen in iz kaljenega jekla.

3.1.4 Pogonski modul

Pogon statorja med delovanjem smo uvrstili v pogonski modul (slika 3.5).

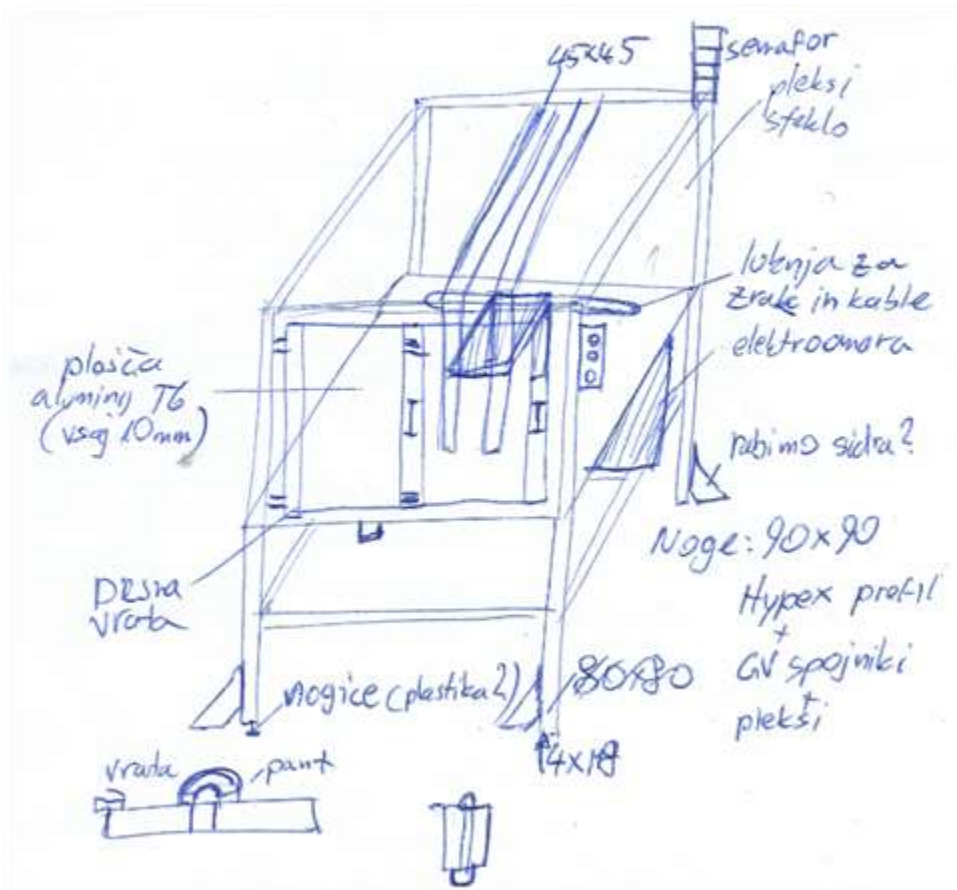


Slika 3.5: Koncept pogonskega modula

Tu smo morali zagotoviti rotacijo za določen kot zelo natančno, saj bi ob zgrešenem kotu zasuka zgrešili pravi utor na lameliranem jedru in uničili izolacijo; tako bi prišlo do strojeloma na vstavljalnem modulu.

3.1.5 Celica

Da smo lahko povezali vse module v stroj, smo skupaj vseh profilov, zaščitnega pleksistekla, vezne elemente, priključke za elektriko, zrak in elektroomaro umestili v modul celice (slika 3.6).



Slika 3.6: Koncept celice stroja za vstavljanje izolacije

3.2 Preračuni

Med načrtovanjem vsakega modula smo se vprašali, kaj je pomembno, da posamezni modul izvede: hitrost, natančnost ali modul samo zadosti operaciji in ga poskušamo narediti cenovno zelo ugodnega ali ga poskušamo čim hitreje modelirati in poslati modelirane kose na obdelavo.

Na podlagi teh vprašanj smo se odločali tudi, ali je pomembno, da izračunamo posamezne komponente modula, da bodo zadostile zahtevam, ki smo si jih postavili. Tako smo se odločili, da nam je zelo pomembna natančnost pozicioniranja statorja, da vedno vstavimo izolacijo v pravi utor na lameliranem jedru. Izračunan podatek bi nam dal informacijo, ali je izbrani koncept pozicioniranja zadovoljiv in ali smo izbrali pravo planetno gonilo.

Iz izkušenj pri izdelavi prejšnjih strojev za vstavljanje izolacije, pri katerih je bil izziv povesa gredi, na katero je pritrjen stator, se je stator vidno povetil v trenutku, ko je potiskač pritiskal izolacijo v utor. Temu smo se hoteli izogniti, zato smo izračunali povese gredi v trenutku, ko je potiskač v utoru z največjo mogočo teoretično silo, ki jo izvede cilindar. Podani izračun bi nam dal potrditev, da smo izbrali pravi premer in material, iz katerega bo izdelana gred.

3.2.1 Preračun pogonskega modula

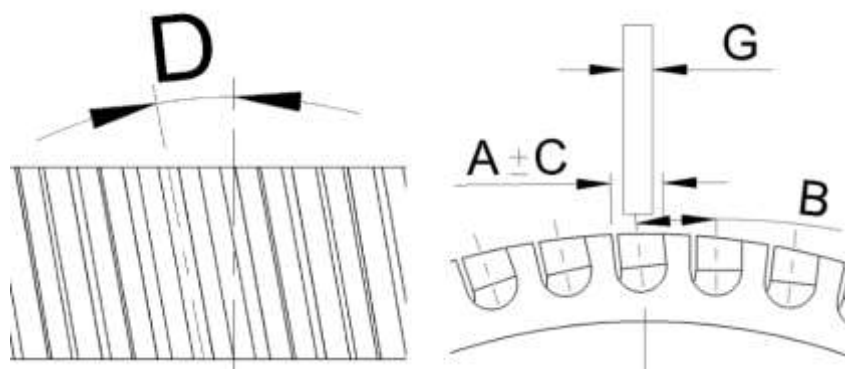
Ob predpostavki, da so vsi podatki, ki smo jih zbirali iz dokumentacijskih risb in tehnične dokumentacije kupljenih komponent, pravilni, lahko rečemo, da bo preračun koncepta pogonskega modula dal pravilen rezultat. Ker je postopek vstavljanja izolacije tak, da s potiskači potisnemo izolacijo v utor, obstaja verjetnost, da z njimi utora ob slabo izdelanem stroju ali slabo izdelanem lameliranem jedru ne bomo zadeli. Da smo lahko potrdili koncept pogonskega modula, je bil potreben preračun tolerančne verige pogona in lameliranega jedra. Tako smo uporabili enačbo 3.1. Od širine utora smo odštevali tolerance.

$$L_o = L_u - 2 \cdot T_{pu} - 2 \cdot T_{su} - 2 \cdot T_{bs} - 2 \cdot T_r - 2 \cdot D_i - D_p = -0,282 \text{ mm} \quad (3.1)$$

Pri tem je:

Preglednica 3.1: Vrednosti parametrov za preračun tolerance pogonskega modula.

L_o	širina ostanka	-0,282 mm
L_u	širina utora	A mm
T_{pu}	toleranca pozicije utora	B mm
T_{su}	toleranca širine utora	C mm
T_{bs}	toleranca jedra <i>skewinga</i>	D mm
T_r	toleranca reduktorja	E mm
D_i	debelina izolacije	F mm
D_p	debelina potiskača	G mm

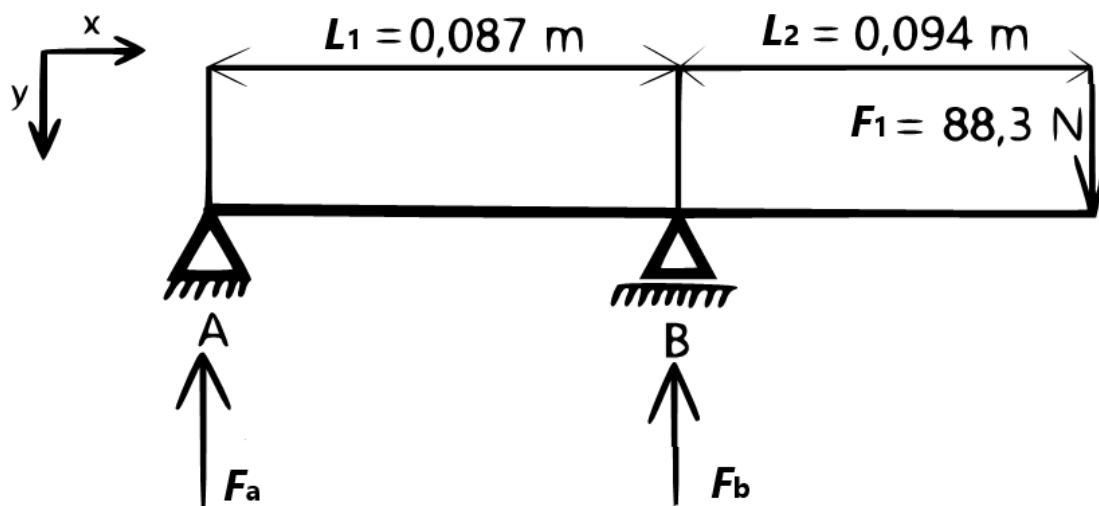


Slika 3.7: Lamelirano jedro s tolerancami

Iz rezultata je razvidno, da če so vsi parametri na maksimalni vrednosti, potiskača ne bosta zadela utora. Tu poudarimo, da je ob predpostavki, da potiskača zašilimo oziroma zaokrožimo, koncept smiseln in bo deloval. Zaradi zaupnosti podatkov so namesto dejanskih dimenzij podane simbolne črke, ki predstavljajo dimenzije.

3.2.2 Preračun sil v podporah na gredi

Da smo lahko izbrali premer gredi in ustrezne ležaje, smo izračunali sile v podporah. Predpostavimo, da težo gredi zaradi majhne mase zanemarimo.



Slika 3.8: Shematski prikaz delovanja sil

Zapis ravnovesnih enačb:

$$\sum F_x = 0 \quad (3.2)$$

$$\sum F_y = 0 \quad (3.3)$$

$$\sum M_a = 0 \quad (3.4)$$

Vidimo, da sile ne delujejo v smeri x-osi, zato nadaljujemo s silami v y-smeri.

$$-F_a - F_b + F_1 = 0 \quad (3.5)$$

Ker z enačbe (3.2) ne moremo dobiti vrednosti sil v podporah, se lotimo momentne enačbe okrog podpore A.

$$F_b \cdot L_1 - F_1 \cdot (L_1 + L_2) = 0 \quad (3.6)$$

Iz enačbe (3.6) izrazimo člen F_b .

$$F_b = \frac{F_1 \cdot (F_1 + L_2)}{L_1} = \frac{88,3 \cdot (0,087 + 0,094)}{0,087} = 183,7 \text{ N} \quad (3.7)$$

Ko smo dobili silo v podpori B, jo vstavimo v enačbo (3.5) in izrazimo še silo v podpori A.

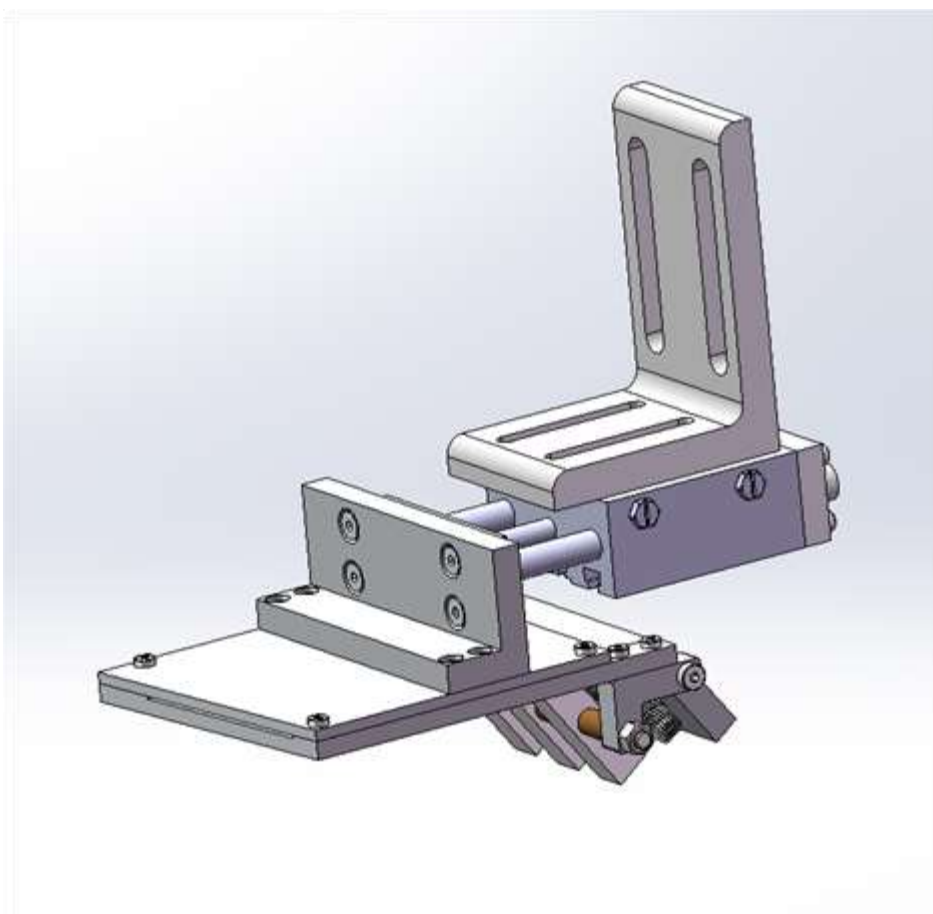
$$F_a = -F_b + F_1 = -183,7 + 88,3 = -94,4 \text{ N} \quad (3.8)$$

Iz rezultatov so razvidne statične obremenitve na ležaj. Dovoljena statična obremenitev za izbrani ležaj SKF SYK 20 TF je 12 Kn, kar potrjuje, da bodo izbrani ležaji zdržali dano obremenitev.

3.3 Eksperimentalni del

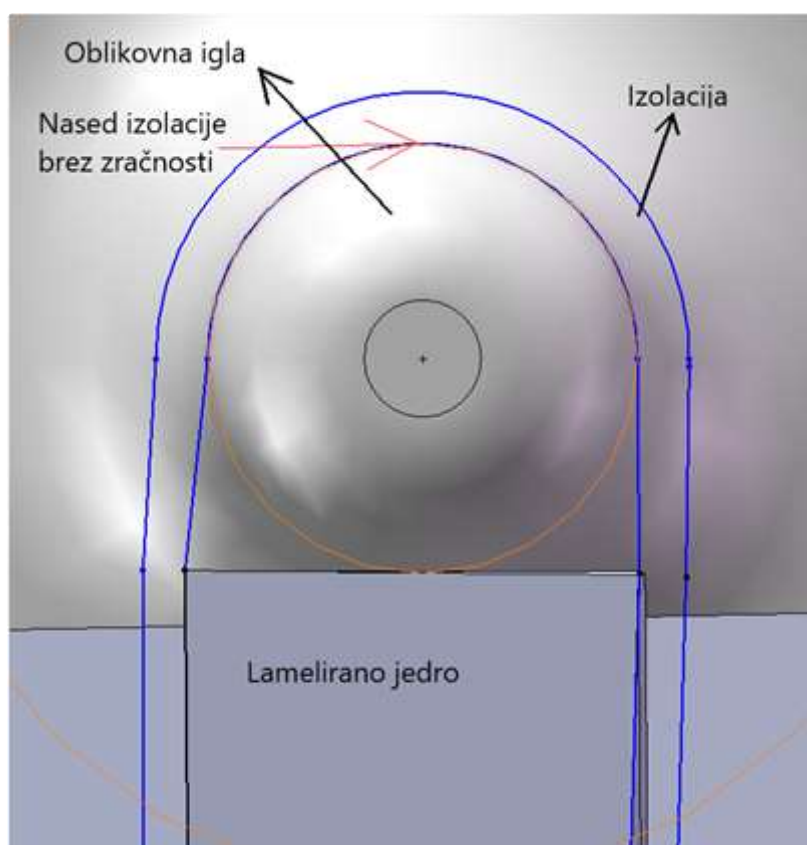
3.3.1 Podajalni modul

Glavna naloga podajalnega modula (slika 3.9) je, da podaja in predeformira izolacijski papir, ki ga vstavljamo v lamelirano jedro. Predeformiranje izolacije je pomembno za zagotavljanje ponovljivosti, idealne oblike vrha izolacije (slika 3.10) in poteka vstavljanja izolacije v utore.



Slika 3.9: Podajalni modul

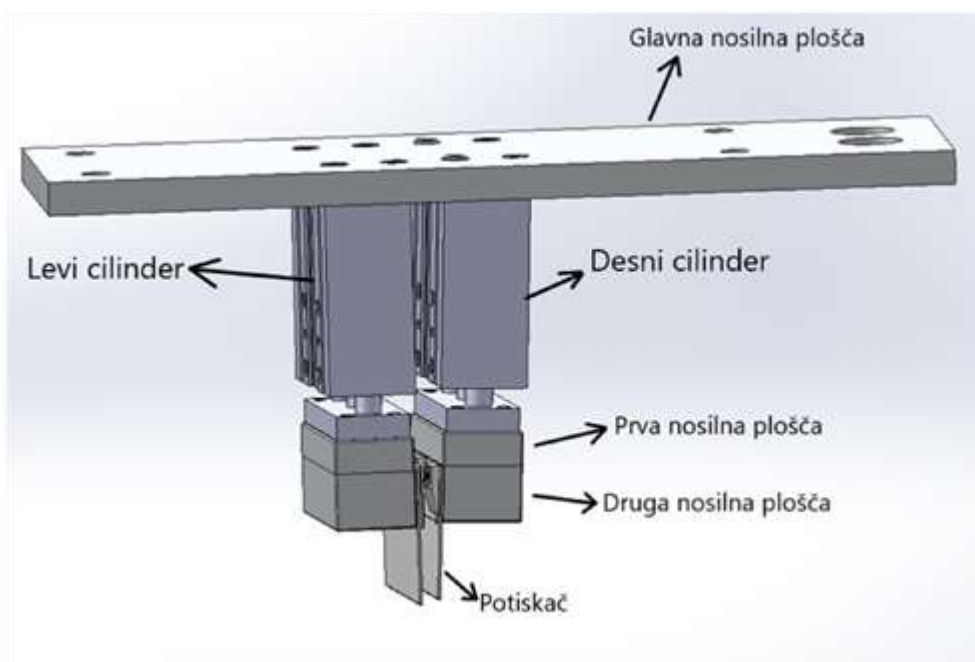
Predeformacijo in vstavljanje izolacijskega papirja dosežemo z linearnim pomikanjem modula z dvosmernim pnevmatičnim cilindrom proizvajalca SMC z oznako MGPM12-25Z [12]. Odločitev za takšno izvedbo linearnega giba smo izbrali na podlagi izkušenj konstrukterjev, ugodne cene, hitre dobave in zaradi preproste implementacije v stroj. Cilinder smo opremili še z mehanskim omejevalcem hoda (slika 2.9), saj za delovanje ne potrebujemo celotne dolžine, ki jo ponuja cilindar. Posebnost uporabljenega cilindra je ta, da ima vgrajena drsna vodila, ki pomagajo, da papir natančneje in bolj nadzorovano pripeljemo do lameliranega jedra. Hod lahko omejimo samo v smeri vračanja cilindra in ne v smeri podajanja izolacije. Modul je zasnovan tako, da vključuje samozaporni mehanizem, ki dovoljuje izolacijskemu papirju, da ga lahko potiskamo po kanalu modula, preprečuje pa zdrs papirja nazaj proti kolutu. Izolacijski papir je napeljan čez kanal v podajalnem modulu, prek katerega je omogočena aksialna vodljivost papirja. Kanal je z ene strani paralelen na stator, druga stran pa je izdelana pod kotom, tako da se papir postopoma pomika proti robu kanala. Celoten modul je pritrjen na standarden kotni profil, v katerega smo naredili utore za nastavitev modula vzdolž podajalnega pnevmatskega cilindra proti vrtišču statorja in nastavitev modula po višini. Elementi, uporabljeni za sestavo modula, so pretežno iz aluminijeve zlitine 6082 T6, saj bo stroj postavljen v okolje z visoko vsebnostjo vlage in tako izpostavljen visokemu tveganju rje na modulu.



Slika 3.10: Idealna oblika vrha izolacije

3.3.2 Vstavljalni modul

Glavna funkcija vstavljalnega modula (slika 3.11) je potiskanje izolacije v utore v lameliranem jedru. Linearne pomike smo zagotovili s pnevmatičnima cilindroma proizvajalca SMC z oznako MGPM12-25Z [12]. Za takšno izvedbo pomikanja izolacije v utor smo se odločili zaradi preprostosti vgradnje cilindra in hitrosti pomika, ki je v tem primeru implementacije precej ključen element. Oba cilindra sta pritrjena na glavno nosilno ploščo, ki jo lahko nastavljamo v aksialni smeri vrtenja statorja. Glavna nosilna plošča služi tudi kot nosilec za podajalni modul. Prva nosilna ploščica na cilindru je pritrjena s štirimi vijaki z ugreznjeno glavo, tako da se ti lahko skrijejo pod drugo ploščico, ki se premika aksialno in tangencialno v smeri vrtenja statorja. To smo zagotovili tako, da smo v spodnjo ploščico naredili ugreznjen utor, prek katerega se lahko pozicija ploščice nastavlja s prilagodljivim vijakom. Tako smo dobili natančno nastavljivost dveh prostostnih stopenj z enim vijakom. Funkcija spodnje ploščice je prav tako drženje potisnih ploščic, ki smo jih izdelali iz materiala Isoval FR4-HF. Izbrani tip pnevmatičnega cilindra proizvajalca SMC smo izbrali, zato ker je ustrezen z vidikov velikosti, hoda, ki ga zagotavlja, kratkega dobavnega roka in ugodne cene. Izbrali smo tip, pri katerem sta zagotovljena dodatno vodenje z drsnimi pušami in preprečitev vrtenja bata, kar nam je privarčevalo veliko časa z vidika konstruiranja modula in iskanja drugih rešitev za natančnejše vodenje in preprečitev rotacije bata.



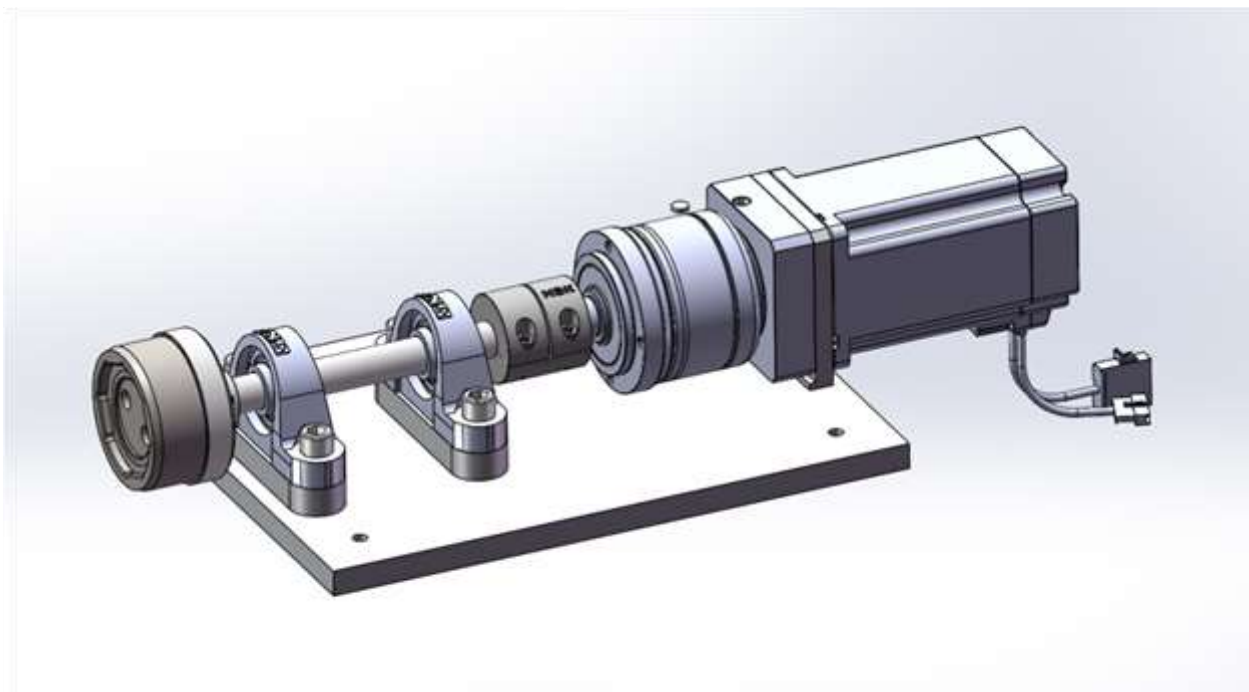
Slika 3.11: Vstavljalni modul

Celotna sekvenca se ponovi tolikokrat, kolikor je utorov na lameliranem jedru. Levi cilindar najprej pritisne začetek izolacije do utora, kamor bomo potisnili izolacijo. Aktivira se oblikovni cilindar, ki zagotavlja višino vrha izolacije. Potem se aktivira cilindar, ki podaja izolacijo. Ko je cilindar, ki podaja izolacijo, v iztegnjeni končni poziciji, z desnim cilindrom pritisnemo izolacijo čez oblikovno iglo v utor. Za konec s podajalnim cilindrom

izvedemo še eno podajanje, tako da je izolacija pripravljena za naslednji utor. Stator se zavrti v nasprotni smeri urnega kazalca do novega utora in sekvenca je končana. To zaporedje korakov se ponovi tolikokrat, kolikor je utorov v lameliranem jedru.

3.3.3 Pogonski modul

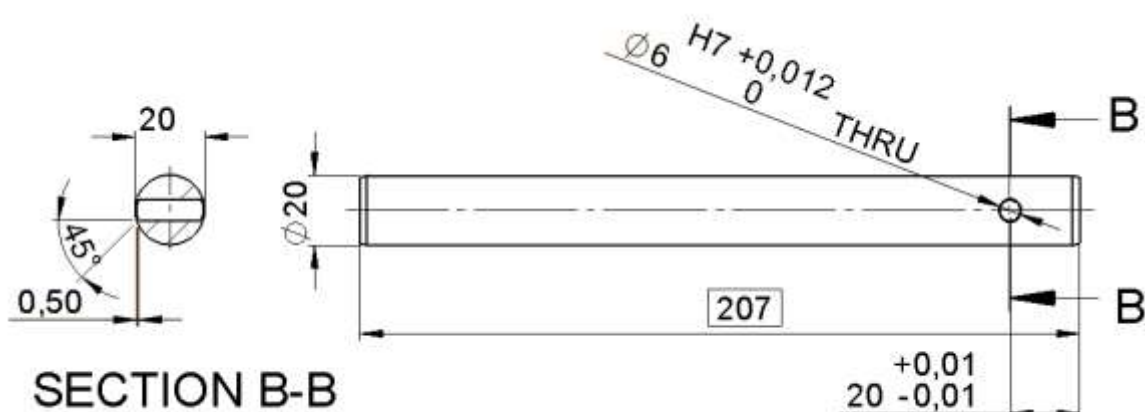
Funkcija pogonskega modula je, da nam zagotovi rotacijo statorja za določen kot zasuka, ko ga potrebujemo. Pogonski modul (slika 3.12) je ključen za natančno radialno pozicijo statorja med vstavljanjem izolacije.



Slika 3.12: Pogonski modul

Vse komponente pogonskega modula so pritrjene na nosilno ploščo, izdelano po meri, iz aluminijeve zlitine 6082 T6. Ta nosilna plošča pa je pritrjena na nosilne aluminijaste profile, ki tvorijo nosilno konstrukcijo pogonskega modula. Rotacijo nam zagotavlja zaprtzančni koračni motor proizvajalca Fastech z oznako Ezi-Servo M86L. Za tak tip motorja smo se odločili, ker je bil za naše zahteve dovolj natančen, cenovno ugoden in hitro dobavljiv. Prav tako smo prihranili na času s programiranjem sekvence, saj je koračni motor precej preprosto krmiliti. Posebnost koračnega motorja Ezi-Servo je, da s hitrostjo in prehodom na mikrokorak navor motorja ne pada. Zaradi vztrajnosti statorja, ki jo moramo premagovati med procesom, smo se odločili še za planetni reduktor znamke Apex Dynamics z oznako PEII 090 [11]. Izbira za planetni reduktor je bila lahka, saj je majhnih gabaritnih dimenzij in lahke izvedbe. To je bil za nas pomemben podatek, saj smo poskušali čim bolj zmanjšati vztrajnostni moment celotnega pogonskega modula, ker lahko rotacijo končnega pesta, ki drži stator, izvajamo hitreje in prav tako lahko pojemke izvajamo pozneje, kar pomeni, da določen kot rotacije, ki ga potrebujemo, izvedemo

hitreje, kot bi ga, če bi imeli skupni vztrajnostni moment komponent večji. Dobra lastnost planetnega gonila je tudi veliko prestavno razmerje, tako da smo lahko uporabili manjši koračni motor in tako prihranili nekaj denarja. Koračni motor in planetni reduktor sta privijačena na nosilec, ki je pritrjen na nosilno ploščo. Na izhod planetnega gonila je privijačena toga aluminijasta sklopka znamke Nabeya Bi-Tech z oznako MRGS-C-20-20. Ta tip sklopke smo izbrali, ker je bila sklopka lahko vgradljiva, preproste izvedbe in cenovno ugodna. Njen namen je izključno prenos momenta s planetnega gonila na uletajeno gred. Ker je sklopka toga in ne poravnava razlik koncentričnosti, smo kose, ki podpirajo gred, izdelali po višini letajaja ter tako zagotovili koncentričnost med gredjo in izhodno gredjo reduktorja. Gred (slika 3.13) [14] je premera 20 mm in je uletajena z dvema krogličnima letajema z integriranim ohišjem znamke SKF z oznako SYK 20 TF [15]. Priporočena toleranca čepa, ki ga vstavimo v letaj, je bila h6. Gred je bila kupljena iz jekla Cf 60 in je obdelana na toleranco h6, tako da smo v podjetju gred odrezali na določeno mero in izvrtali luknjo za vzmetni zatič. Za tako izvedbo gredi smo se odločili zaradi konstrukterskih izkušenj, ker je bila izvedba precej preprosta in hitro dobavljiva.

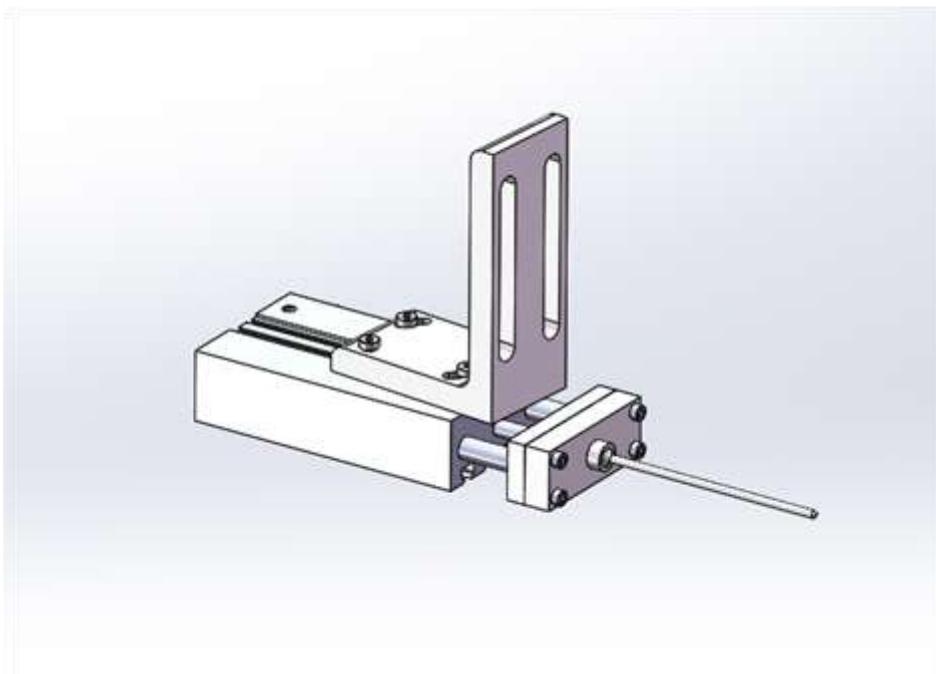


Slika 3.13: Gred

Na izhodu gredi je z vzmetnim zatičem, ki prenaša moment in zagotavlja aksialno pozicijo, pritrjen okrogel nosilec, ki nosi negativno geometrijo statorskega dela, določenega za pritrnitev na stroj. Vzmetni zatič [16] je bil za nas najboljša rešitev za pozicioniranje negativne geometrije statorskega dela, saj je izvrtina lahko narejena brez dodatne obdelave, dobavni rok zatiča pa je bil izjemno kratek, saj je to standardni del, ki je vedno na voljo po ugodni ceni. Ta okrogel kos prenaša moment z geometrijsko zvezo in zagotavlja aksialno pozicijo statorja med delovanjem. To, da je ta lahko pritrjen in se vrti, nam zagotavlja aksialna sila, ki jo zagotovimo s hitrovpenjalnim mehanizmom. Skozi stator je pritrjena gred, ki je oporna točka za mehanizem. Gred, ki gre skozi stator, ima na koncu vrezan navoj, na katerega privijačimo hitrovpenjalni mehanizem [10]. Dolžina navoja na mehanizmu je primerljiva s petimi obrati hitrovpenjalnega mehanizma. Tako najprej vstavimo stator, privijačimo hitrovpenjalni mehanizem in obrnemo ročko, ki zagotovi primerljivo silo ter tako pozicionira stator v končno lego.

3.3.4 Oblikovni modul

Za zagotavljanje ponovljivosti višine in pravega radija zaokrožitve izolacijskega traku, ki je nad površjem lameliranega jedra, smo konstruirali oblikovni modul (slika 3.14).

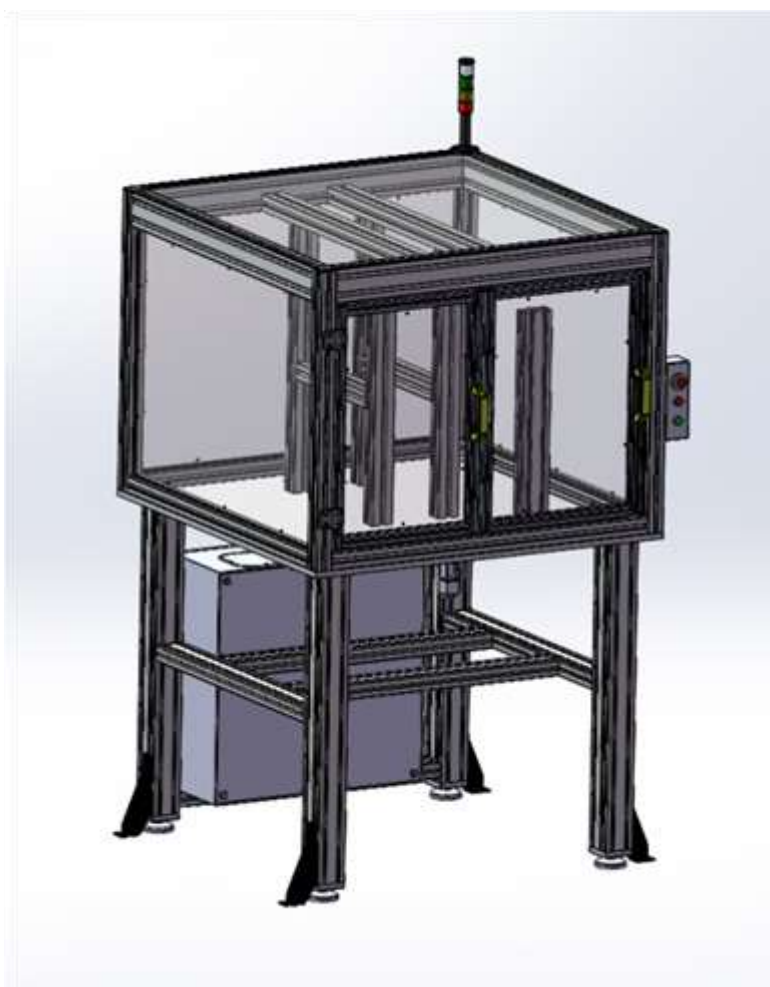


Slika 3.14: Oblikovni modul

Modul sestavljajo tri komponente: nosilec, pnevmatski cilindar in oblikovna igla. Nosilec je standarden, jeklen, kotnik 90×40 mm, v katerega smo naredili utore za kladiavaste vijake M8 in luknje za pritrnitev pnevmatskega cilindra. Z njimi je mogoča nastavitve kota delovanja, tako da se igla, ko je v iztegnjenem položaju, popolnoma prilega kotu zoba na lameliranem jedru. Utori so narejeni po višini, tako da je možnost nastavitve v radialni smeri statorja. Pnevmski cilindar je proizvajalca SMC z oznako MGPM12-75 [12]. Hod batnice cilindra je 75 mm, kar je dovolj, da lahko z iglo pokrijemo celotno širino lameliranega jedra in tako nudimo podporo celotni širini izolacije. Premer oblikovne igle je standardnega premera. Ker je oblikovna igla med premikanjem cilindra v stiku z zobom lameliranega jedra, smo izbrali iglo iz kaljenega jekla. Premer igle smo določili na podlagi širine zoba lameliranega jedra. Če je premer igle večji, kot je zob lameliranega jedra, ne izolacije moremo potisniti v utor. Če je premer igle manjši, kot je zob jedra, pa je verjetnost, da se izolacija, ko jo potiskamo v utor, poškoduje na robovih lameliranega jedra in vrhovi izolacije niso pravih dimenzij. Zaradi poznejših postopkov izdelave motorja je najbolje, da je premer igle zelo blizu širine zoba. Med izbiranjem premera smo pazili še na faktor servisiranja in dobavljivosti rezervnih delov, tako da smo izbrali standardni premer igle, ki je hitro dobavljiv.

3.3.5 Celica

Celica (slika 3.15) je povezovalni element vseh modulov. V grobem je sestavljena iz aluminijastih profilov in pleksistekla [13]. Ko smo jo konstruirali, smo morali paziti na postavitev modulov, funkcionalnost, hitro izdelavo in na gabarite stroja. Zadnji so bili pomembni zaradi končne lokacije, saj so evropalette, na katerih potuje stroj, standardnih dimenzij in jih ne moremo prekoračiti. Pri izbiri komponent za izdelavo celice smo iskali polizdelke, ki jih potem sestavimo v končno rešitev. Ker je končna razlika cene materiala za celico pri sorazmerno majhnem stroju majhna, nam je bila pomembnost podpore, odzivnosti in zanesljivosti dobavnega roka ključnega pomena. Uspelo nam je najti proizvajalca, ki nam je ponujal vse sestavne dele za celico.



Slika 3.15: Celica

Noge stroja so iz aluminijastih profilov 80×80 mm. Posebnost teh profilov je, da imajo v svoji geometriji, po kateri so ekstrudirani, že pripravljene štiri luknje, v katere lahko vrežemo navoj M8. To nam je pomagalo pri privijačenju nog v osnovno ploščo. V nožno konstrukcijo smo prav tako vstavili nosilni profil za elektroomaro. Da je stroj stabilen in se lahko prilagodi tlom, smo na vsak nožni profil privijačili še podporno nogo in podporni kotnik. Ta služi kot sidro, ki ga z vijakom zasidramo v končno pozicijo ob tekočem traku.

To nam zagotavlja še večjo stabilnost stroja, zmanjšuje tresljaje in posledično verjetnost, da bi prišlo do odvitja kakšnega elementa v stroju in posledično do strojeloma. Na zgornjo površino nosilne plošče so iz profilov 45×45 mm narejeni trije okvirji, v katere so pritrjena pleksistekla. Dve strani pleksistekel sta pritrjeni z gumijastim trakom, ki je vstavljen v režo profila in pritiska steklo ob profil ter ga tako drži v poziciji. Eno steklo je servisno. To je pritrjeno s hitroodstranljivimi vijaki. Prek te strani in vrat se bosta izvajala redni pregled stroja in vzdrževanje. Vrata so izdelana iz aluminijastih profilov 30×30 mm in pleksistekla. Zasnovali smo jih po drsnem principu. Vrata so dvokrilna. Ko so zaprta, sta krili iztegnjena, ko vrata odpremo, pa se desno krilo vrat zadrša po utoru profila ter se zloži ob levo krilo in levi bok stroja. Na levem krilu vrat je pod krilom privijačen ključ, ki služi za zaklep varnostne ključavnice. Vsi elementi vrat so standardni kosi podjetja Hypex, ki nam jih je dobavilo. Pokrov stroja je prav tako izdelan iz pleksistekla. Osrednja konstrukcija celice je iz aluminijastih profilov 25×25 mm in zagotavlja nosilne elemente, na katere privijačimo druge module.

3.3.6 Zagon in testiranje stroja

V ekipi, ki je izdelovala stroj, je bil tudi konstrukter – avtomatik, ki je programiral sekvenco in sestavil elektroomaro. Ko smo imeli napisano sekvenco, smo lahko s programom testirali, ali je ta delujoča in ali je pravilno napisana receptura za vstavljanje izolacije; testirali smo lahko mogoče napake, predvsem programske, ki bi se lahko zgodile med delovanjem. Če med načrtovanjem smo stroj načrtovali tako, da smo v profile, ki tvorijo noge, dodali plastične noge. S temi nogami smo tako nastavili celoten stroj v vodoravni položaj (slika 3.16 a). Začeli smo testiranje rotacije pogonskega modula.

Nato so začeli nastavljanje začetne točke vstavljanja izolacije. To smo določili na podlagi izkušenj s sestavljanjem elektromotorjev. Namestili smo stator na stroj s hitrovpensjalnim mehanizmom. Zavrteli smo pogonski modul s koračnim motorjem in tako so vijaki M5, s katerimi smo privijačili objemno gredno vez, aktivirali končno stikalo. S tem smo dobili referenčno točko, iz katere smo nato izhajali, da smo določili prvi utor za vstavitev izolacije. To je bilo za nastavljanje pogonskega modula vse, kar smo v tej fazi lahko naredili.

Nato smo se lotili vstavljalnega modula, saj je ključen za nadaljnje nastavljanje stroja. Celoten modul je narejen tako, da ga je mogoče nastavljati v vseh treh oseh. Območje nastavljanja v vsaki osi je odvisno od funkcije, ki jo opravlja, in tega, ali za to potrebuje veliko manevrskega prostora. Tako smo najprej na vsakem pnevmatskem cilindru v vstavljalnem modulu nastavili aksialno celoten modul glede na lamelirano jedro na statorju (slika 3.16 b) in kot utor lameliranega jedra. To smo storili z ramenskim vijakom M4. Ta nam je zagotovil prehodni ujem med njegovo tolerirano površino rame in tolerirano površino na utoru, v katerega je bil vstavljen. Nato smo nastavili razdaljo, do katere pritisnemo izolacijo v lamelirano jedro. V utoru v lameliranem jedru, v katerega pritisneta potiskača, smo položili jekleno palico premera 1,5 mm. Odvijali smo nosilca potiskača, tako da sta potiskača ostala še vedno na svojem mestu, vendar smo ju z malo sile še vedno lahko premikali. Pnevmatika cilindra smo tako iztegnili v končno lego. Če se je potiskač dotaknil jeklene palice, smo nosilca privijačili; drugače smo ročno potisnili potiskač do jeklene palice in privijačili njegov nosilec. Tako smo nastavili razdaljo, do katere pritisnemo izolacijski papir v utor. Ko so bili cilindri iztegnjeni, smo lahko nastavili še

končna stikala na cilindru, ki pošljejo signal računalniku, da je cilindar prišel v končno lego in da lahko nadaljuje naslednji korak.



Slika 3.16: Nastavljanje višine stroja in vstavljalnega modula aksialno

Ko smo imeli nastavljen vstavljalni modul, smo lahko nastavili oblikovni modul (slika 3.17 a). Pomembno je bilo, da smo oblikovno iglo nastavili tako, da se njen zašiljen konec malo podrsa po zobu lamelirnega jedra (slika 3.10); tako zagotovimo da je izolacija vstavljena na točno določeno višino, ki nam je pomembna pri operaciji rezanja izolacije, ki jo izvedemo v poznejšem postopku sestavljanja statorskega dela elektromotorja. Končne pozicije induktivnih zaznaval smo nastavili v končne pozicije hoda cilindra, saj nam ni bilo pomembno, kje se cilindar ustavi.

Pri podajalnem modulu smo najprej nastavili pozicijo (slika 3.17 b), saj je bilo pomembno da modul ni preblizu lameliranega jedra; ko vstavimo izolacijo, se namreč radij poveča za debelino oblikovne igle in paziti moramo, da se modul ne zadene v izolacijo. Točnost pozicije modula nam je bila tudi pomembna, da smo modul nastavili tako, da je izhodna širina utora, iz katerega prihaja izolacija, aksialno poravnana s širino lameliranega jedra. Utor na modulu za podajanje je širši za 1,4 mm od lameliranega jedra. Zato smo utor pozicionirali tako, da je na vsaki strani za 0,7 mm širši, kot je jedro. Nato smo nastavili dolžino izolacije, ki jo bomo podali. To smo nastavili z dvema vijakoma M8, ki sta privijačena na pnevmatskem cilindru. Nastavljali smo povratni hod cilindra in tako nastavili dolžino izolacije, ki jo podamo. Bolj kot privijačimo vijaka, manj izolacije podamo. Pomembno je bilo, da smo nastavili pravo dolžino podajanja, saj smo, če smo nastavili prekratko podajalno dolžino, s potiskači strgali izolacijo med podajanjem, ker se je močno napela čez oblikovno iglo, in ko sta se sprožila vstavljalna cilindra, sta jo s potiskači pretrgala. Če smo nastavili predolgo dolžino podajanja, izolacija ni popolnoma

objela oblikovne igle in je bil vrh izolacije previsok ter je odstopal od idealne oblike. Aksialno pozicijo glede na lamelirano jedro smo morali nastaviti tudi na nosilcu, ki drži kolot z izolacijo na mestu. Če kolot ni bil poravnán z lameliranim jedrom, se je izolacija močno nagubala in je bila posledično uničena. To smo storili s podlaganjem podložk med okrogel nosilec za izolacijo in profilom, ki drži kolot na mestu, v katerega je nosilec privijačen. Tako smo uravnavali gubanje izolacije med kolutom in podajalnim modulom.



Slika 3.17: Nastavljanje oblikovnega in podajalnega modula

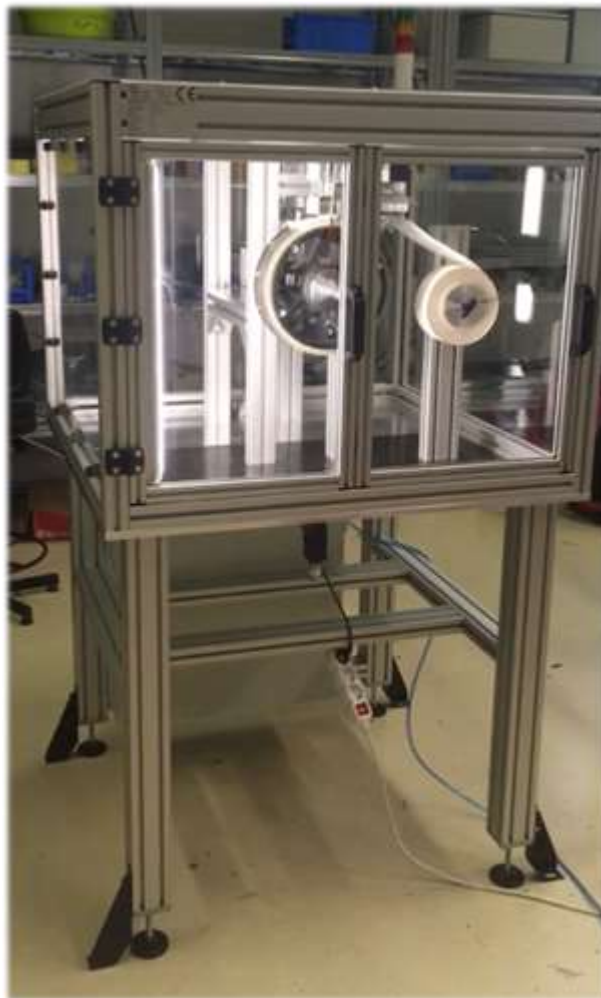
Delovna sekvenca stroja je takšna, da se njen del ponovi tolikokrat, kolikor je utorov v lameliranem jedru. Tako smo lahko testirali korak za korakom in preprosto primerjali vrh izolacije s prejšnjim vrhom izolacije, ki je bil narejen. Poznali smo idealno obliko vrha izolacije (slika 3.10) in tako smo za vsakih izvedenih nekaj korakov v sekvenci ustavili stroj in pregledali, ali je oblika izolacije ponovljiva in podobna idealni obliki. Če ni bila, smo ustavili sekvenco, poskušali napako popraviti in zagnati sekvenco naprej. Ob težji identifikaciji napak med delovanjem stroja smo celoten cikel snemali s kamero in tako s funkcijo počasnega posnetka na računalniku lažje identificirali, kaj je bil vzrok za napako pri vstavljanju izolacije.

Po mehansko nastavljenem stroju smo se začeli ukvarjati s testiranjem varnostne kode oziroma s tem, kaj stroj naredi in kako se odzove, če zazna napako v sistemu. Tako smo testirali, ali se pravilno odzove in sproži hitroodzračevani ventil ter odklene drsna vrata, če pritisnemo glavni rdeč gumb za izhod v sili. To smo storili tako, da smo med delovanjem pritisnili glavni rdeč gumb in opazovali, kako se je stroj odzval; kaj se zgodi, če med delovanjem zmanjka zraka ali napajanja; ali si računalnik zapomni trenutno pozicijo

statorja in korak, ki je bil izveden; ali lahko naprej vstavljamo izolacijo, ko popravimo napako. Testirali smo, ali je mogoče med delovanjem priti v delovno območje stroja z roko ali s kakšnim drugim predmetom, ki bo na voljo na mestu postaje za vstavljanje izolacije. Tako smo med delovanjem stroja poskušali priti v območje njegovega delovanja z roko in s predmeti, ki bodo operaterju na voljo na delovni postaji. Testirali smo svetlobne signale, ki jih oddaja semafor, pritrjen na pokrovu stroja – ali ob pravem poslanem signalu zasveti določena luč.

4 Rezultati

Stroj za vstavljanje izolacije (slika 4.1) je bil skonstruiran, sestavljen in zagnan v roku, ki je bil predviden. Več časa, kot je bilo predvidenega, so nam vzeli testiranje, zagon in nastavljanje stroja.



Slika 4.1: Stroj za vstavljanje izolacije med delovanjem

Celoten čas cikla skupaj z lepljenjem začetkov in koncev izolacijskega papirja ter s preverjanjem pozicije izolacijskega papirja traja šest minut, kar pomeni, da smo znotraj zahtevanega časa cikla 12 minut. To nam je uspelo s pravilno nastavljenimi dušilkami na pnevmatskih cilindrih in kratkimi časi med koraki. Tako smo, npr., preden se je končal korak podajanja izolacije, že aktivirali vstavljalni cilindri. Tako je bil, ko je bila izolacija podana do utora, potiskač tik nad izolacijo in jo nemudoma pritisnil v utor. S takimi prijemi smo časovno zmanjšali cikel vstavljanja izolacije, in sicer tam, kjer je postopek vstavljanja to dopuščal.

Celotna velikost stroja je v okviru dimenzij taka, da je lahko prenosljiva na evropaleti. Težava stroja ni velika, tako da je prenašanje mogoče že ob pomoči dveh ljudi, in ni potrebe po viličarju. Mehanizem drsnih vrat deluje tekoče brez zatikanja; ključavnica, ki zaklene vrata, se lepo prilagodi ključu, ki je pritrjen na profil drsnih vrat, in v ključavnico vstopi pod kotom. Vstopni ventil za zrak in enota za pripravo zraka sta lahko dostopna ob priklopu in odklopu zraka ali pri servisiranju enote za pripravo zraka. Prav tako je priključek za električno preprosto dosegljiv. Ergonomika stroja je dobra. Vidno polje v cikel vstavljanja izolacije je veliko, tako da lahko operater nadzoruje celoten cikel z vseh zornih kotov. Vstavitev statorja v stroj je preprosta, prav tako uporaba hitrovpenjalnega mehanizma. Semafor za prikaz stanja stroja je na vidnem mestu operaterju in drugim opazovalcem okrog njega. Stroj je hitro dostopen ob servisu ali nastavljanju z desne strani, kjer je hitro snemljivo pleksisteklo. Med osnovnim obratovanjem je onemogočen dostop z roko ali s topimi predmeti do premikajočih se in rotirajočih delov.

Pogonski modul deluje brez napak. Vsaka rotacija med vstavljanjem, ki se izvede, je natančna, tako da ne zgrešimo nobenega utora za vstavitev izolacije. Koračni motor je po celodnevem vstavljanju izolacije ostal na sobni temperaturi. Objemna gredna vez tudi po maksimalnem pospešku, ki ga premore koračni motor, ni zdrsnila in je ostala na svojem mestu. Negativna geometrija statorskega dela je izdelana po predpisanih tolerancah, tako da dobimo prehodni ujem med statorjem in negativno geometrijo, kar je v prid delavcu, saj tako brez težav nastavi stator v delovni položaj.

Vstavljalni in podajalni modul (slika 4.2) delujeta tekoče in brez težav. Na testiranju se je izkazalo, da je nastavljivost modulov v vseh smereh velika prednost, saj smo lahko stroj nastavili na optimalno delovanje brez večjih težav. Vstavljen izolacijski papir aksialno odstopa od roba lameliranega jedra maksimalno 0,3 mm, kar je znotraj predvidene tolerance 0,5 mm. Višina vrha izolacije je zelo dobro nadzorovana z oblikovnim modulom, vrhovi izolacije pa so po videzu enaki. Menjava koluta izolacije s krogličnim zatičem je hitra in preprosta. Prav tako je preprosta napeljava traku izolacije skozi podajalni modul do potiskačev. Stroj se po vstavljanju izolacije na 15 motorjih obnaša tako, kot je bil nastavljen na začetnem testiranju.



Slika 4.2: Nastavljen vstavljalni in podajalni modul

Izdelali smo celotno tehnično dokumentacijo stroja, ki jo sestavljajo delavniške risbe vseh po meri narejenih delov, sestavne risbe posameznih modulov in sestavna risba celotnega stroja.

Celoten stroj z vključenimi vsemi urami konstruiranja, sestavljanja, testiranja, s kupljenimi elementi in kosi, narejenimi po naročilu, je bil narejen znotraj predvidenega finančnega proračuna. Časovno je izdelan in preizkušen v okviru predvidenega roka. To nam je uspelo s pravilnim konstruiranjem in z izbiro komponent, ki imajo predviden dolgi dobavni rok. Tako smo se osredinjali na kose, ki so bili na zalogi pri dobaviteljih in so nam tudi finančno ustrezali.

5 Diskusija

Izdelava stroja v tako kratkem roku, kot je bil podan zaradi razvijanja novih konceptov in celotnega testiranja, je predstavljala velik izziv. V sklopu testiranja smo morali odpraviti nekaj začetnih težav, ki jih je bilo težko predvideti ob konstruiranju – nekatere zaradi obdelave kosov, ki so bili zunaj definiranega tolerančnega polja, veliko pa zaradi neizkušenosti konstrukterjev. Ko smo načrtovali koncepte posameznih modulov, smo ciljali na celoten čas cikla vstavljanja izolacije devet minut, zato da bi imel operater ob morebitnem zaustavljanju stroja ali nepričakovanih težavah čas nastaviti stroj, prepoznati težavo in jo poskušati odpraviti do takrat, ko bi prišel do stroja nov kos. Ta čas smo še skrajšali. Nekaj nam je uspelo s programiranjem in z odzivnostjo končnih stikal na cilindru, veliko pa z mehanskim nastavljanjem dušilk na cilindrih. Tu smo imeli izziv, da smo dušilke nastavili tako, da se je sekvenca odvila hitro, vendar smo morali paziti na glasnost stroja, saj se je ob odprtih dušilkah jakost zvoka cilindrov stroja občutno povečala. Pozicioniranje modulov nam je uspelo nastaviti zelo dobro, saj izolacijski papir ne odstopa zunaj podanih tolerančnih polj. Nastavljali smo izkustveno. Stroškovno smo ostali znotraj načrtanega. To nam je uspelo, ker smo za glavni pogon namesto servopogona izbrali koračni elektromotor z reduktorjem. Nekaj izzivov nam je uspelo rešiti s kupljenimi komponentami, ki so bile že razvite za naše izzive pri proizvajalcu, pri katerem smo pridobili na času in denarju, saj nam ni bilo treba razvijati novih rešitev. V ta sklop kupljenih rešitev smo umestili planetni reduktor, hitrovenjalni mehanizem in ključavnico.

6 Zaključki

Naprava za vstavljanje izolacije je bila izdelana za namen nove proizvodne linije kolesnega elektromotorja tipa S400. Izdelana je bila v takšnih dimenzijah, da se bo lahko preprosto integrirala na transportno paletu in poslala h kupcu. Z napravo smo tako rešili izziv vstavljanja izolacijskega papirja v lamelirano jedro in prispevali eno operacijo k liniji za izdelavo kolesnega elektromotorja. Ugotovili in dokazali smo naslednje:

- 1) s premišljenim načrtovanjem, koncipiranjem in z dobro izvedbo je stroj narejen v okviru podanih začetnih zahtev; zahteve smo celo preseгли in izboljšali stroj, tako da je v zahtevanem času cikla operacijo vstavljanja izolacije mogoče izvesti dvakrat;
- 2) zagnali, nastavili in testirali smo stroj, in sicer do te mere, da brez popravkov ali pomoči operaterja vstavi izolacijo v stator kolesnega elektromotorja;
- 3) rezultati merjenja in preverjanja vstavljene izolacije so pokazali, da je celotna vstavljena izolacija znotraj podanih zahtev v aksialni in radialni smeri, prav tako ponovljivost vrhov izolacije.

Predlogi za nadaljnje delo

V naslednji iteraciji bomo stroj zagnali še pri dobavitelju. V to se bo vključilo tudi izobraževanje operaterjev za delo na stroju, in sicer v smislu izobraževanja ob napakah, kaj je treba storiti in kako stroj nastaviti za pravilno delovanje. Sestavili bomo tudi obrazec, ki se bo nahajal v bližini stroja. Vanj bo operater, ko bo na stroju prišlo do napake, to zapisal. Treba bo izpolniti morebitne opazke, če se je stroj pred napako obnašal drugače, kot se sicer, napako in zakaj je prišlo do napake, če bo to mogoče ugotoviti brez pristopa osebe, ki je izdelovala stroj. Treba bo izpolniti tudi, kako je operater ukrepal ob napaki in koga je o tem obvestil. S takšnim pristopom bomo poskušali stroj narediti še bolj robusten in vzdržljiv, kar bo pripomoglo k nemotenemu delovanju linije.

7 Literatura

- [1] Igor Jančič: Strojni elementi 1, Tehniška založba Slovenije, Ljubljana 2002.
- [2] Srečko Glodež: Tehnično risanje, priročnik za tehnično risanje, Tehniška založba Slovenije, Ljubljana 2010.
- [3] W. Haring, M. Metzger, R.-C. Weber, Editor: Frank Ebel: Pneumatics basic level, Festo Didactic, Denkendorf 2013.
- [4] Ericsson: Industrial circuits application note – Stepper motor basics, dostopno na: <http://solarbotics.net/library/pdflib/pdf/motorbas.pdf>.
- [5] Xinda Hu: An introduction to stepper motors, University of Arizona, College of optical sciences, Arizona, USA, 2016, str. 1–3.
- [6] Jože Flašker, Stanislav Pehan: Prenosniki moči, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo 2005.
- [7] Jože Hlebanja: Planetna gonila, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana 1964.
- [8] Paul Acarnley, Editors: D. P. Antherton, G. W. Irwin: Stepping motors a guide to theory and practice 4th edition, The institution of Engineering and Technology, London 2007.
- [9] Herbert Wittel, Dieter Muhs, Dieter Jannasch, Joachim Voßiek: Roloff/Matek Maschinenelemente, 21. izdaja, Springer Vieweg, Wiesbaden 2013.
- [10] Halder norm+technik: Standard parts, Technical catalog, 2016.
- [11] Apex dynamics, Inc: Planetary gearboxes, Technical catalog, 2014.
- [12] SMC: Pregledni katalog, Portfelj izdelkov, 2014.
- [13] Hypex: Profile technic, Technical catalog, 2017.
- [14] Ideal Velenje: Strojni elementi, Katalog prodajnega programa, 2007.
- [15] SKF: Rolling bearings, Technical catalog, 2018.
- [16] SIST EN ISO: 8752: 2012 *Spring-type straight pins – Slotted, heavy duty*, 2008.