

TEHNIŠKI ŠOLSKI CENTER MARIBOR  
VIŠJA STROKOVNA ŠOLA  
STROJNIŠTVO

Jakob SENEGAČNIK

**NAPRAVA ZA AVTOMATSKI PRIKLOP  
VODNIKOV V FAZI PREIZKUŠANJA SONČNIH  
PANELOV V BISOL GROUP D.O.O.**

DIPLOMSKO DELO

Višješolski strokovni študij

Maribor, 2026

TEHNIŠKI ŠOLSKI CENTER MARIBOR  
VIŠJA STROKOVNA ŠOLA  
STROJNIŠTVO

Jakob SENEGAČNIK

**NAPRAVA ZA AVTOMATSKI PRIKLOP VODNIKOV V FAZI  
PREIZKUŠANJA SONČNIH PANELOV V BISOL GROUP D.O.O.**

DIPLOMSKO DELO

Višješolski strokovni študij

**AUTOMATIC CONDUCTOR CONNECTION MECHANISM IN SOLAR PANEL  
PRODUCTION TESTING PHASE AT BISOL GROUP D.O.O.**

GRADUATION THESIS

Higher vocational studies

Maribor, 2026

## **ZAHVALA**

Iskreno se zahvaljujem vsem, ki so me podpirali na moji izobraževalni poti in za vse okoliščine, ki so me izoblikovale.

Za vso osvojeno inženirsko znanje in razmišljanje, ki sem ga pridobil med praktičnim izobraževanjem ter med izdelavo diplomskega dela, se zahvaljujem mentorju, Janezu Štefulju, ki me je vodil skozi dodeljene projekte in spodbujal moje lastno razmišljanje.

Za pomoč in smernice pri izdelavi diplomskega dela se zahvaljujem mentorju, mag. Benu Arbitterju u.d.i.s. Pomagal mi je z izbiro teme in vedno pripravljen pomagati.

Za vso drugo znanje se zahvaljujem vsem profesorjem in osebju na TŠC Maribor in delovnim mentorjem.

Dodajam tudi moje starše in prijatelje, ki so z vso predanostjo verjeli vame.

Hvala.

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani Jakob Senegačnik, rojen 14. 2. 2004 v Slovenj Gradcu, študent Tehniškega šolskega centra Maribor, Višje strokovne šole, programa strojništvo, izjavljam, da je diplomsko delo z naslovom **NAPRAVA ZA AVTOMATSKI PRIKLOP VODNIKOV V FAZI PREIZKUŠANJA SONČNIH PANELOV V BISOL Group d.o.o.** avtorsko delo.

V diplomskem delu so vsi uporabljeni viri in literatura konkretno navedeni, teksti niso prepisani brez navedbe avtorjev.

Diplomsko delo je lektorirala dr. Alenka Čuš, univ. dipl. slov., ključno dokumentacijsko informacijo sem prevedel Jakob Senegačnik.

Kraj in datum: \_\_\_\_\_

Lastnoročni podpis študenta/-ke: \_\_\_\_\_

## **MENTORSTVO**

Diplomsko delo je zaključek Višješolskega strokovnega študija, smer strojništvo, opravljeno je bilo na Tehniškem šolskem centru Maribor, Višji strokovni šoli.

Študijska komisija Tehniškega šolskega centra Maribor, Višje strokovne šole, je za mentorja diplomskega dela imenovala mag. Bena Arbiterja u.d.i.s.

### **Komisija za oceno in zagovor:**

Predsednik: \_\_\_\_\_

Član/mentor: \_\_\_\_\_

Član: \_\_\_\_\_

Član/somentor: \_\_\_\_\_

Datum diplomskega izpita: \_\_\_\_\_

## **POVZETEK**

V diplomskem delu je obravnavan razvoj naprave za avtomatski priklop merilnih vodnikov na MC4 vodnike v fazi električnega preizkušanja sončnih modulov v podjetju BISOL Group d.o.o. Izhodišče je obstoječi ročni postopek priklopa, ki predstavlja časovno in ergonomsko obremenitev delavca, ter vključuje tveganje za poškodbe vodnikov in nestabilne električne stike.

Na podlagi analize proizvodnega procesa, toleranc položajev MC4 vodnikov in prostorskih omejitev na testni postaji je bila oblikovana idejna zasnova naprave, ki temelji na pnevmatskem linearnem pomiku in mehanskem prijemu. Za konstrukcijo nosilcev, stabilizatorjev in prilagojenih vpenjalnih elementov je bilo uporabljeno 3D tiskanje, ki je omogočilo hitro prototipiranje in več razvojnih iteracij z nizkimi stroški.

V prototipni fazi je bilo izvedeno mehansko in funkcionalno testiranje. Rezultati so pokazali, da je avtomatski priklop MC4 vodnikov tehnično izvedljiv, vendar prototip še ni dosegal polne ponovljivosti. Ključna pomanjkljivost je bila nezadostna stabilizacija kabla in vodnika, ki je povzročala zvijanje pri priklopu. Z ojačitvijo 3D tiskanega stabilizatorja in optimizacijo geometrije se je delovanje izboljšalo, naprava pa je dosegla raven, primerno za nadaljnji razvoj. V zaključku je predstavljena primerjava med prototipno izvedbo in kasneje v podjetju dokončno razvito napravo, ki je danes vključena v proizvodni proces. Primerjava potrjuje ustreznost začetne konstrukcijske zasnove ter uporabnost 3D tiskanja kot tehnologije za prehod od prototipa do industrijske rešitve.

## KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Dd
DK	681.5:621.311.243(043.2)
KG	pnevmatski prijemalni sistemi / avtomatizacija / sončni moduli / MC4 vodniki / 3D tiskanje
AV	SENEGAČNIK, Jakob
SA	ARBITER, Beno (mentor)
KZ	SI-2000 Maribor, Zolajeva 12
ZA	Tehniški šolski center Maribor, Višja strokovna šola
LI	2026
IN	NAPRAVA ZA AVTOMATSKI PRIKLOP VODNIKOV V FAZI PREIZKUŠANJA SONČNIH PANELOV V BISOL Group d.o.o.
TD	Diplomsko delo (višješolski strokovni študij)
OP	XIII, 30 str., 4 tab., 19 sl., 5 pril., 16 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	<i>Diplomsko delo obravnava razvoj naprave za avtomatski priklop merilnih vodnikov na priključke MC4 v fazi električnega preskušanja sončnih modulov v podjetju BISOL Group d.o.o. Izhodišče je obstoječi ročni postopek, ki je časovno potraten, ergonomsko neugoden ter prinaša tveganje poškodb vodnika in nestabilnega električnega stika. Na osnovi analize proizvodnega procesa, toleranc položaja vodnika in prostorskih omejitev preiskusne postaje je bila razvita konceptna zasnova, ki uporablja pnevmatski linearni pogon z mehanskim prijemalom. Nosilni in stabilizacijski elementi so bili izdelani s 3D-tiskanjem, kar je omogočilo hitro prototipiranje in več iteracij zasnove z nizkimi stroški. Mehanski in funkcionalni preizkusi, izvedeni v prototipni fazi, so potrdili tehnično izvedljivost avtomatskega priklopa vodnikov MC4, a zaradi nezadostne stabilizacije kabla in vodnika, popolna ponovljivost še ni bila dosežena. Po ojačitvi 3D-natisnjene stabilizatorja se je delovanje izboljšalo in naprava je dosegla raven, primerno za nadaljnji razvoj v smeri industrijske uporabe.</i>

## KEY WORDS DOCUMENTATION

- DN Dd
- DC 681.5:621.311.243(043.2)
- CX pneumatic grippers, automation, solar modules, MC4 connectors, 3D printing
- AU SENEGAČNIK, Jakob
- AA ARBITER, Beno (mentor)
- PP SI-2000 Maribor, Zolajeva 12
- PB Technical School Centre Maribor, Higher Vocational College
- PY 2026
- TI AUTOMATIC CONDUCTOR CONNECTION MECHANISM IN SOLAR PANEL PRODUCTION TESTING PHASE AT BISOL Group d.o.o.
- DT Graduation Thesis (Higher vocational studies)
- NO XIII, 30 p., 4 tab., 19 fig., 5 ann., 16 ref.
- LA sl
- AL sl/en
- AB *The thesis discusses the development of a device for automatic connection of test leads to MC4 connectors during the electrical testing phase of solar modules in BISOL Group d.o.o. The starting point is the existing manual procedure, which is time consuming, ergonomically unfavourable and carries the risk of connector damage and unstable electrical contact. Based on an analysis of the production process, connector position tolerances and spatial limitations of the test station, a conceptual design was developed using a pneumatic linear actuator with a mechanical gripper. Supporting and stabilising elements were manufactured by 3D printing, which enabled rapid prototyping and several design iterations at low cost. Mechanical and functional tests carried out in the prototype phase confirmed that automatic MC4 connection is technically feasible, but full repeatability was not yet achieved due to insufficient stabilisation of the cable and connector. After reinforcing the 3D-printed stabiliser, the performance improved and the device reached a level suitable for further development towards industrial use.*

## KAZALO VSEBINE

ZAHVALA.....	II
IZJAVA O AVTORSTVU.....	III
MENTORSTVO.....	IV
POVZETEK.....	V
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA.....	VI
KEY WORDS DOCUMENTATION.....	VII
KAZALO VSEBINE.....	VIII
KAZALO SLIK.....	X
KAZALO TABEL.....	XI
KAZALO PRILOG.....	XII
1 UVOD.....	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA.....	1
1.2 NAMEN IN CILJI DIPLOMSKEGA DELA.....	1
2 PREGLED STANJA.....	2
2.1 PREDSTAVITEV STANDARDNEGA PROIZVODNEGA PROGRAMA SONČNIH PANELOV V BISOL GROUP D.O.O.....	2
2.2 OBSTOJEČI TEHNOLOŠKI POSTOPEK V FAZI ELEKTRIČNEGA PREIZKUŠANJA SONČNIH PANELOV.....	3
2.2.1 Opis obstoječega tehnološkega postopka.....	3
2.2.2 Analiza obstoječega tehnološkega postopka.....	5
2.3 PREGLED PRIMERNIH REŠITEV AVTOMATSKIH PRIKLOPOV VODNIKOV NA PROIZVODNIH LINIJAH.....	5
3 ANALIZA ZAHTEV ZA NAPRAVO ZA AVTOMATSKI PRIKLOP VODNIKOV NA PROIZVODNIH LINIJAH.....	7
3.1 ANALIZA ZAHTEV NAPRAVE ZA AVTOMATSKI PRIKLOP VODNIKOV NA PROIZVODNIH LINIJAH.....	7
3.1.1 Tehnične zahteve.....	7
3.1.2 Prostorske omejitve.....	8
3.1.1 Povzetek tehničnih zahtev.....	8
3.2 ZASNOVA NAPRAVE ZA AVTOMATSKI PRIKLOP VODNIKOV.....	8
3.2.1 Izbor principa delovanja.....	9
3.2.2 Konceptna postavitve.....	9
3.2.3 Povezava z obstoječo linijo.....	9
3.2.4 Utemeljitev izbrane rešitve.....	9
3.2.5 Idejni potek delovanja.....	10
3.3 KONSTRUKCIJSKA DOKUMENTACIJA ZA NAPRAVO.....	10
3.3.1 Pnevmatško prijemalo.....	12
3.3.2 Pnevmatški cilinder.....	13

3.3.3	Nosilec cilindra .....	14
3.3.4	Nastavek in nosilec za držanje in stabilizacijo vhodnega kabla .....	15
3.3.5	Nastavki za prijemalo .....	16
3.3.6	Nosilni elementi konstrukcije .....	16
3.3.7	Celoten CAD sestav .....	17
3.4	<b>TEHNOLOŠKI POSTOPEK ZA IZDELAVO PROTOTIPA.....</b>	<b>17</b>
3.4.4	Priprava 3D modelov za tisk .....	17
3.4.5	Tiskanje in obdelava delov .....	18
3.4.6	Sestavljanje osnovne konstrukcije .....	18
3.4.7	Namestitev pnevmatskega cilindra .....	18
3.4.8	Montaža prijemala .....	19
3.4.9	Priključitev pnevmatskega sistema.....	19
3.5	<b>NOV TEHNOLOŠKI POSTOPEK V FAZI ELEKTRIČNEGA PREIZKUŠANJA SONČNIH PANELOV.....</b>	<b>19</b>
3.5.1	Prvi mehanski test .....	20
3.5.2	Prvi test z modulom – problem pri stabilizaciji vodnika .....	20
3.5.3	Izvedene izboljšave po prvem neuspešnem testu.....	21
3.5.4	Drugi test po izboljšavi.....	21
3.5.5	Test ponovljivosti v prototipni fazi .....	21
3.5.6	Povzetek testiranja .....	21
3.6	<b>PRIMERJAVA OBSTOJEČEGA IN NOVEGA TEHNOLOŠKEGA POSTOPKA V FAZI ELEKTRIČNEGA PREIZKUŠANJA SONČNIH PANELOV.....</b>	<b>22</b>
3.6.1	Obstoječi postopek (pred razvojem prototipa).....	22
3.6.2	Novi postopek z uporabo prototipa.....	22
3.6.3	Primerjava postopkov .....	22
3.6.4	Sklep primerjave .....	23
4	<b>ZAKLJUČEK.....</b>	<b>24</b>
4.1	<b>PRIMERJAVA PROTOTIPNE NAPRAVE Z DOKONČANO INDUSTRIJSKO IZVEDBO</b>	<b>24</b>
4.2	<b>OHRANJEN OSNOVNI KONCEPT .....</b>	<b>24</b>
4.3	<b>KLJUČNE RAZLIKE MED PROTOTIPOM IN DOKONČANO NAPRAVO .....</b>	<b>25</b>
4.4	<b>SKLEP PRIMERJAVE .....</b>	<b>28</b>
4.5	<b>SPLOŠNI ZAKLJUČEK.....</b>	<b>29</b>
5	<b>VIRI.....</b>	<b>30</b>
	<b>PRILOGE</b>	

## KAZALO SLIK

Slika 1: Proizvodnja podjetja.....	3
Slika 2: Poziciji vodnikov .....	4
Slika 3: Neformalni načrt za pomoč pri sestavljanju konstrukcije za preizkuševanje .....	11
Slika 4: Prijemalo PPAFT-32.....	12
Slika 5: Cilinder PCA2R 20-32 .....	13
Slika 6: 3D model nosilca cilindra .....	14
Slika 7: 3D model nosilca kabla .....	15
Slika 8: 3D model nastavka za stabilizacijo .....	15
Slika 9: 3D model nastavka za prijemalo .....	16
Slika 10: 3D model celotne konstrukcije.....	17
Slika 11: 3D model prototipa naprave .....	18
Slika 12: Montirani nosilci in prijemalo.....	19
Slika 13: Vstavljen vodnik .....	20
Slika 14: Začetna pozicija.....	20
Slika 15: CAD model sedanje različice .....	25
Slika 16: CAD model sedanje različice .....	25
Slika 17: Zadnja različica nosilca prijemala.....	26
Slika 18: Prototipna različica nosilca prijemala (2024).....	26
Slika 19: Mali cilinder z vertikalno usmerjenim nastavkom za stabilizacijo vodnika .....	27

## **KAZALO TABEL**

Tabela 1: Tabela korakov, časa in stroška obstoječega postopka .....	4
Tabela 2: Primerjava tipičnih industrijskih rešitev za avtomatski priklop vodnikov in njihove uporabnosti pri sončnih modulih .....	6
Tabela 3: Tabela povzetka tehničnih zahtev .....	8
Tabela 4: Primerjalna tabela predhodnega in novega tehnološkega postopka .....	23

## **KAZALO PRILOG**

PRILOGA A: Shematska risba nosilca cilindra

PRILOGA B: Dvokomponentni nosilec prijemala

PRILOGA C: Prijemalni nastavek

PRILOGA D: Batnični nastavek kot vodilo in stabilizator kabla

PRILOGA E: Koničasti del batničnega nastavka kot vodila in stabilizatorja

# 1 UVOD

## 1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Med opravljanjem praktičnega izobraževanja v podjetju BISOL Group d.o.o. sem ugotovil, da se v fazi električnega preizkušanja sončnih modulov pojavljajo težave, povezane z ročnim delom in ponovljivostjo meritev. Vsak modul, ki pride do testne postaje, mora biti priklopljen na merilno opremo, kar se trenutno izvaja ročno – to pomeni, da operater fizično poveže pozitivni in negativni vodnik modula (MC4) na merilne vodnike naprave.

Zaradi različnih položajev vodnikov, ki se med moduli malenkostno razlikujejo, je postopek pogosto zamuden in ergonomično neugoden. Poleg tega se pri ročnem priklopu lahko pojavijo napake ali mehanske poškodbe vodnikov, kar vpliva na natančnost meritve in lahko upočasni delovni cikel.

Po opazovanju sem ugotovil, da prav ta korak predstavlja ozko grlo v sicer zelo avtomatiziranem proizvodnem procesu. Zato sem se odločil razviti napravo za avtomatski priklop vodnikov, ki bi ta del postopka izvedla samodejno, tj. brez neposrednega poseganja delavca. Naprava mora delovati zanesljivo, varno in se vključevati v obstoječo linijo brez večjih sprememb.

## 1.2 NAMEN IN CILJI DIPLOMSKEGA DELA

Pri razvoju naprave sem si zadal več ciljev. Najprej sem moral analizirati obstoječi postopek električnega preizkušanja modulov v podjetju in razumeti, kateri korak postopka je najbolj zamuden. Na podlagi te analize sem določil tehnične in prostorske zahteve za izvedbo avtomatskega priklopa. Sledil je razvoj idejne in konstrukcijske zasnove naprave, ki jo je bilo mogoče vgraditi v obstoječo linijo. Na podlagi zasnove sem izdelal prototip z uporabo 3D tiskanih komponent, nato pa sem delovanje naprave preizkusil in ovrednotil njeno učinkovitost v primerjavi z ročnim postopkom.

Delo je potekalo v štirih glavnih fazah. V prvi fazi sem v proizvodnji opravil analizo in opazovanje obstoječega postopka. V drugi fazi je sledilo koncipiranje, v sklopu katerega sem pripravil več možnih rešitev in na podlagi podatkov določil tisto, ki je bila glede na zahteve najbolj primerna. Tretja faza je vključevala konstrukcijo in izdelavo prototipa, v četrti fazi pa sem prototip testiral in ovrednotil dosežene rezultate.

## 2 PREGLED STANJA

V tem poglavju obravnavam obstoječe stanje v podjetju BISOL Group d.o.o., kjer sem opravljal praktično izobraževanje. Namen poglavja je razumeti okolje, v katerem sem razvijal napravo za avtomatski priklop vodnikov, ter tudi analizirati trenutno tehnologijo testiranja sončnih modulov.

Pregled stanja vključuje opis podjetja, potek testnega postopka, ugotovljene pomanjkljivosti ter pregled primerljivih industrijskih rešitev, ki so služile kot osnova pri razvoju naprave te naloge.

### 2.1 PREDSTAVITEV STANDARDNEGA PROIZVODNEGA PROGRAMA SONČNIH PANELOV V BISOL GROUP D.O.O.

Podjetje BISOL Group d.o.o. sem spoznal med praktičnim izobraževanjem, kjer sem sodeloval z razvojnim oddelkom na področju izboljšav v proizvodnem procesu. Podjetje je bilo ustanovljeno leta 2004 in ima sedež v Preboldu. Podjetje BISOL Group d.o.o. je slovenski proizvajalec fotonapetostnih modulov, ki svoje proizvode in rešitve izvaža na številne evropske in svetovne trge (BISOL Group d.o.o., 2025).

Standardni proizvodni program obsega več serij monokristalnih modulov, ki pokrivajo razpon moči od pribl. 400 W do več kot 520 W na modul, odvisno od izvedbe. Osnovno ponudbo predstavljajo klasični mrežni moduli serij Supreme in Premium, ki uporabljajo visokoučinkovite monokristalne celice in polovične (half-cut) celice z večvodniško (multi-busbar) tehnologijo. Tipičen predstavnik je serija BISOL Duplex, kjer so moduli moči 440–460 W v izvedbi z 96 celicami ter 500–520 W v izvedbi s 108 celicami; standardne mere takih modulov so približno 1,7–1,8 m v dolžino in 1,1 m v širino, kar ustreza industrijskemu formatu za strešne in talne elektrarne (BISOL Group d.o.o., 2024).

Poleg klasičnih modulov BISOL ponuja tudi strešne integrirane BIPV module (Building Integrated Photovoltaics), pri katerih modul hkrati opravlja funkcijo kritine. Vzglad so moduli serije BSO moči 440–460 W, namenjeni vgradnji v strešne sisteme Solrif®. Dimenzije teh modulov so približno 1.805 × 1.160 mm, uporabljajo pa monokristalne polovične celice in so zasnovani za estetsko vgradnjo v ravnini strešnega ovoja (BISOL Group d.o.o., 2024).

Vsa proizvodnja poteka v Sloveniji, kar podjetju omogoča popoln nadzor nad kakovostjo izdelkov in sledljivostjo proizvodnje. Veljajo za enega največjih proizvajalcev sončnih modulov v Evropi, njihovi izdelki pa se izvažajo v več kot 100 držav.

Podjetje je organizirano po načelih Industrije 4.0, kar pomeni, da je večina procesov avtomatiziranih in digitalno nadzorovanih. Kljub visoki stopnji avtomatizacije pa nekatere faze, zlasti v končnem električnem testiranju, še vedno zahtevajo prisotnost operaterja. Ravno ta del proizvodnje sem proučeval podrobneje, saj ta predstavlja stik med popolnoma avtomatiziranimi in ročnimi operacijami. Na spodnji sliki je prikazana avtomatizirana proizvodnja podjetja.

Slika 1: Proizvodnja podjetja



Vir: (BISOL Group d.o.o., 2025)

## 2.2 OBSTOJEČI TEHNOLOŠKI POSTOPEK V FAZI ELEKTRIČNEGA PREIZKUŠANJA SONČNIH PANELOV

### 2.2.1 Opis obstoječega tehnološkega postopka

V podjetju BISOL Group d.o.o. vsak proizvedeni sončni modul po laminaciji in vizualnem pregledu potuje po tekočem traku do testne postaje, kjer se izvede električno preizkušanje. Namen te faze je preveriti električne lastnosti modula in potrditi, da izpolnjuje zahtevane tehnične standarde, kot so IEC 61215 (IEC 61215, 2021) in IEC 61730 (IEC 61730, 2016). Za namen električnega povezovanja s testirno postajo se uporabljajo MC4 vodniki. MC4 je danes ena najpogosteje uporabljenih izvedb vodnikov za fotonapetostne sisteme, tj. z nazivnimi napetostmi do 1000–1500 V DC ter visoko mehansko in klimatsko odpornostjo (Stäubli Electrical Connectors, 2019).

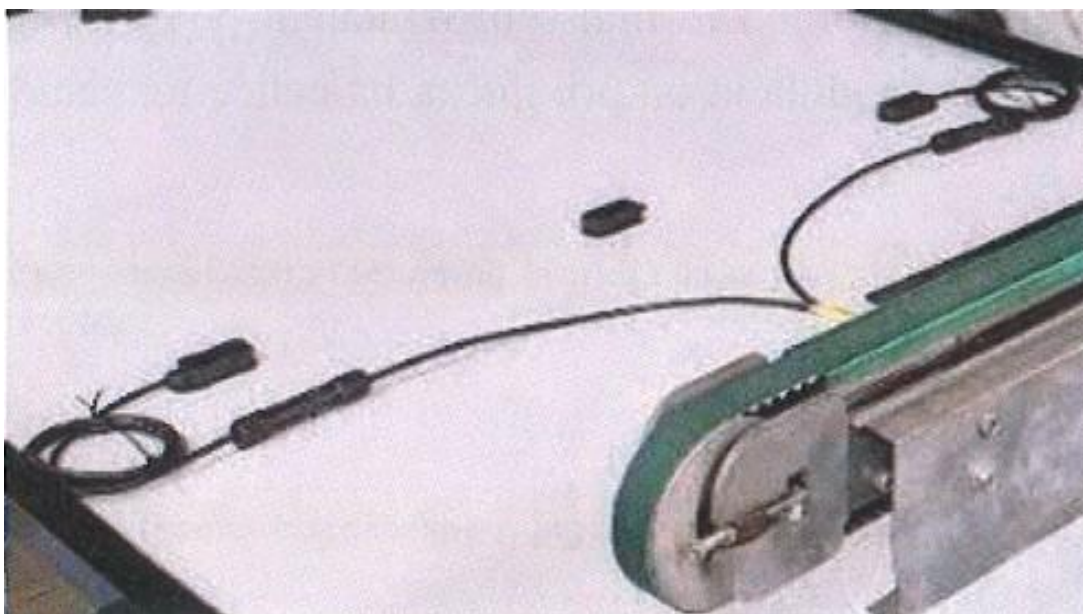
Modul se na postaji samodejno ustavi v natančno določeni poziciji. Tam ga vakuumska prijemala dvignejo in natančno poravnajo, da je pripravljen za meritev. V tem trenutku je operater v prejšnjem preizkuševalnem postopku ročno priključil pozitivni in negativni MC4 vodnik modula na merilne vodnike naprave. Ko je bil priklop izveden, je delavec na vmesniku potrdil, da je modul pripravljen za test. Transportni sistem nato modul premakne naprej v preizkuševalno postajo z bliskavico, kjer se z bliskom svetlobe simulira sončno sevanje. Merilni sistem izmeri napetost, tok in moč modula. Na sliki 2 sta prikazani poziciji priklopljenih vodnikov pred vhom v testirno napravo.

Tabela 1: Tabela korakov, časa in stroška obstoječega postopka

Korak	Opis koraka	Ocenjen čas [s]	Ocenjen strošek dela [€]
1	Samodejna zaustaviteljev modula na postaji	6	0,00
2	Operater pripravi merilne vodnike in se postavi k modulu	5	0,025
3	Ročni priklop pozitivnega in negativnega MC4 vodnika na merilne	10	0,05
4	Vizualni pregled priklopa in ročna potrditev pripravljenosti na vmesniku	4	0,02
5	Premik modula v preizkuševalno postajo in izvedba testa z bliskavico	20	0,00
6	Ročni odklop MC4 vodnikov z merilnih	8	0,04

\*V izračunu je predpostavljena okvirna cena delovne ure operaterja 18 evr/h bruto.

Slika 2: Poziciji vodnikov



## 2.2.2 Analiza obstoječega tehnološkega postopka

Med opravljanjem prakse sem ugotovil več pomanjkljivosti obstoječega postopka. Ročni priklop zahteva stalno prisotnost delavca, kar zmanjšuje stopnjo avtomatizacije in obremenjuje operaterja. Neenakomerne pozicije vodnikov med posameznimi moduli povzročajo manjšo ponovljivost meritev. Prisotna je tudi možnost mehanskih poškodb vodnikov ali kablov, predvsem pri nepravilnem kotu priklopa. Poleg tega je delavec zaradi stalnega ponavljanja enakih gibov ergonomsko precej obremenjen. Da bi te ugotovitve potrdil, sem izvedel meritve položajev MC4 vodnikov na več modulih. Merjenja so pokazala odstopanja položaja do pribl.  $\pm 10$  mm, zato mora avtomatiziran sistem omogočati kompenzacijo teh razlik in optimizacijo najbolj zamudnega dela postopka, sedanjega ročnega priklopa vodnikov, ter zagotovitev ustreznosti najbolj kritičnega dela postopka, tj. premika v postajo in testiranja.

## 2.3 PREGLED PRIMERNIH REŠITEV AVTOMATSKIH PRIKLOPOV VODNIKOV NA PROIZVODNIH LINIJAH

V industriji obstajajo različne rešitve za avtomatski priklop vodnikov, ki se uporabljajo predvsem v avtomobilski in elektronski industriji. Tipičen primer so hitri testni priključki in avtomatski spojni sistemi, ki omogočajo ponovljivo in hitro povezovanje električnih ali tlačnih priključkov brez ročnega vijachenja. Takšni sistemi so na voljo pri več specializiranih proizvajalcih, npr. pri podjetjih WEH in FasTest, kjer ali pnevmatsko ali mehansko krmiljeni priključki ob vklopu objamejo standardiziran priključek, vzpostavijo tesen stik in omogočajo hitro menjavo preizkušenih kosov v serijski proizvodnji (WEH GmbH, 2025) (FASTEST, 2025).

V elektronski industriji se za avtomatski priklop pogosto uporabljajo t. i. »bed-of-nails« testne priprave in prilagojena testna vpenjala. Pri takšnih rešitvah plošča s številnimi vzmetnimi kontaktnimi iglami hkrati vzpostavi stik na velikem številu testnih točk tiskanine. Takšne testne priprave izdelujejo npr. podjetja IPTE in Reinhardt. Namenjene so popolnoma avtomatskemu testiranju tiskanih vezij v večjih serijah, kjer so položaji kontaktnih točk natančno določeni, zahtevana pa je visoka ponovljivost in kratki časi cikla (IPTE Factory Automation n.v., 2026) (Reinhardt System- und Messelectronic GmbH, 2024).

V primeru sončnih modulov je situacija drugačna. Vodniki z MC4 vodniki so izvedeni kot fleksibilni kabli, ki visijo ob robu modula, njihov položaj pa je odvisen od tipa modula, dolžine in raztezanja kabla ter načina rokovanja v prejšnjih fazah proizvodnje. Univerzalne industrijske rešitve, zasnovane za toge, geometrijsko natančno določene priključke ali ravne tiskanine, se zato tu ne morejo uporabiti neposredno. Hitri testni priključki zahtevajo togo, standardizirano priključno mesto, »bed-of-nails« sistemi pa so prilagojeni ravnim tiskanim vezjem in ne omogočajo prijema vodnikov na kabliah.

Na podlagi pregleda teh rešitev sem ugotovil, da je za fazo električnega preizkušanja sončnih modulov potrebna namensko razvita naprava, ki se prilagaja konstrukciji modula, tolerancam položaja MC4 vodnikov in obstoječi testni postaji. V preglednici so v strnjeni obliki prikazane značilnosti tipičnih industrijskih rešitev za avtomatski priklop ter razlogi, zakaj le te niso neposredno uporabne pri preizkušanju sončnih modulov; slednje je bila podlaga za odločitev, da razvijem lastno rešitev.

Tabela 2: Primerjava tipičnih industrijskih rešitev za avtomatski priklop vodnikov in njihove uporabnosti pri sončnih modulih

<b>Tip rešitve/primer ponudnika</b>	<b>Področja uporabe</b>	<b>Način priklopa/pre-dnosti</b>	<b>Omejitve pri sončnih modulih z MC4 vodniki</b>
Hitri testni priključki (WEH, FasTest)	Tlačni, puščanjski in funkcijski testi v avtomobilski in splošni industriji	Pnevmatsko ali mehansko vpenjanje standardiziranega priključka; hitra menjava kosov, visoka ponovljivost, možnost avtomatizacije	Zahtevajo togo, geometrijsko definirano priključno mesto; niso prilagojeni za viseče MC4 vodnike na fleksibilnem kablu
“Bed-of-nails” testne priprave in prilagojeni adapterji (IPTE, Reinhardt)	Avtomatsko testiranje tiskanih vezij in elektronskih sklopov	Več sto ali tisoč vzmetnih kontaktov, hkratni priklop vseh testnih točk, velika ponovljivost in pokritost	Zahtevajo ravno tiskano vezje z definiranimi testnimi točkami; ne omogočajo priklopa vodnikov na kablilih
Avtomatski stroji za sestavo vodnikov in kabljskih snopov (npr. avtomatski stroji za stiskanje kontaktov in vstavljanje vodnikov)	Serijska proizvodnja kablov in kabljskih snopov v avtomobilski in elektronski industriji	Popolnoma avtomatizirano stiskanje kontaktov, vstavljanje kontaktov in ohišij; zelo visoka produktivnost	Namenjeni so izdelavi kablov, in ne linijskemu testiranju končnih izdelkov; niso prilagodljivi za priklop na posamezne module na testni postaji

### **3 ANALIZA ZAHTEV ZA NAPRAVO ZA AVTOMATSKI PRIKLOP VODNIKOV NA PROIZVODNIH LINIJAH**

Cilj tega poglavja je predstaviti koncipiranje in razvoj prototipa naprave, namenjene avtomatizaciji faze električnega testiranja sončnih modulov v podjetju BISOL Group d.o.o. Naprava je bila razvita kot funkcionalni prototip, katerega namen je avtomatski priklop merilnih kablov na MC4 vodnike sončnih modulov.

#### **3.1 ANALIZA ZAHTEV NAPRAVE ZA AVTOMATSKI PRIKLOP VODNIKOV NA PROIZVODNIH LINIJAH**

Analiza zahtev je temeljila na mojih opazovanjih v proizvodnji BISOL Group d.o.o., meritvah položajev MC4 vodnikov ter prostorskih omejitvah testne postaje. Cilj je bil razviti napravo, ki avtomatsko priklopi merilne kable na MC4 vodnika sončnega modula, in to brez ročnega posega operaterja.

##### **3.1.1 Tehnične zahteve**

- Toleranca položaja MC4 vodnikov

Med meritvami na proizvodni liniji sem ugotovil, da položaji MC4 vodnikov na modulih variirajo za približno  $\pm 16,2$  mm v vodoravni smeri in  $\pm 20,2$  mm v navpični smeri.

- Delovanje v realnem prostoru linije

Napravo je bilo treba vgraditi na aluminijaste profile ob testni postaji, in sicer tako, da ni bilo posega v obstoječa vakuumska prijemala, in tudi še, da je ostala v omejenem prostoru ob strani flash testerja.

- Vrsta pogona

Za testiranje sem uporabljal pnevmatski sistem, saj je vsa testna oprema v BISOL-u na pnevmatiki že zasnovana. Delovni tlak v podjetju meri 7 bar, dejanska sila priklopa pa je bila regulirana z znižanjem tlaka. Pri načrtovanju pnevmatskega sistema naprave je bilo treba upoštevati osnovne zahteve glede izbire komponent, omejitve tlaka in varnega odzračevanja sistema po izpadu napajanja, kot jih navaja standard ISO 4414.

- Kontaktna sila

Ciljna sila, s katero se prijemalo dotakne MC4 vodnika, je bila približno 30–35 N. To silo sem dosegel z regulacijo tlaka in mehkim dušenjem gibanja, ne pa tudi z maksimalno silo cilindra.

- Hod gibanja

Hod cilindra, ki sem ga določil na 32 mm, sem razbral glede na dejansko razdaljo od parkirne lege prijemala do vodnika. Razpon čeljusti prijemala je bil 443 mm, kar predstavlja najširše zastavljeno berno možnosti in omogoča delo z različnimi moduli.

- Čas delovanja

Za stabilen in varen priklop sem določil ciljni čas pomika približno od 3 do 4 s.

### 3.1.2 Prostorske omejitve

Z vidika funkcionalnosti mora naprava omogočati sinhrono delovanje dveh prijemal in dveh cilindrov, ki služita in pozitivnemu in negativnemu polu modula. Gibanje mora biti mehko zaustavljeno ob koncu hoda, kar je zagotovljeno z uporabo dušilk, hkrati pa mora biti omogočeno ročno upravljanje pri servisnih posegih in nastavitvah. Ker se naprava nahaja ob testni postaji, kjer deluje tudi operater, je ta morala biti opremljena z osnovnimi varnostnimi elementi. Ti vključujejo končna stikala za zaznavanje končne lege, mehanske omejevalnike hoda, ki preprečujejo prekomeren pomik ter ventil za hitro odzračevanje, ki omogoča varno zaustavitev v sili. Vsi ti elementi so skladni s standardom ISO 4414:2022 – Pneumatic fluid power – General rules and safety requirements for systems and components (ISO 4414, 2010). Sistem konstrukcijsko omogoča še nadgradnjo z dodatnimi varnostnimi funkcijami, kot sta senzor tlaka v cilindru ali detekcija prisotnosti modula, kar bi bilo smiselno v primeru popolne avtomatizacije linije. V spodnji tabeli je prikazan povzetek tehničnih zahtev.

#### 3.1.1 Povzetek tehničnih zahtev

Tabela 3: Tabela povzetka tehničnih zahtev

Parameter	Vrednost	Enota	Vir podatkov
Delovni tlak	7	bar	BISOL Group – obstoječi sistem
Premer cilindra	20	mm	(Tio Pneumatics, 2025)
Hod cilindra	32	mm	(Tio Pneumatics, 2025)
Premer cilindra prijemale	32	mm	(Tio Pneumatics, 2025)
Hod cilindra prijemale	150	mm	(Tio Pneumatics, 2025)
Toleranca položaja	$\pm 10$ (H), $\pm 5$ (V)	mm	Lastne meritve
Pretok zraka	0,6	l/min	Izračun po ISO 6358
Prostorski okvir	250 × 120	mm	Lastne meritve
Standard varnosti	(ISO 4414, 2010)	—	Festo, SMC priporočila

## 3.2 ZASNOVA NAPRAVE ZA AVTOMATSKI PRIKLOP VODNIKOV

Idejna faza razvoja naprave je predstavljala eno najpomembnejših delov celotnega procesa. V tej fazi sem izhajal iz ugotovljenih zahtev in omejitev, ki sem jih pridobil z opazovanjem obstoječega postopka v podjetju BISOL Group d.o.o. Cilj koncipiranja je bil razviti mehansko rešitev, ki bi omogočila avtomatski priklop vodnikov na MC4 vodnike sončnega modula, ne da bi bila potrebna večja sprememba konstrukcije obstoječe linije.

### 3.2.1 Izbor principa delovanja

Pri analiziranju možnih principov delovanja sem ugotovil, da mora izbrani sistem zagotavljati linearno gibanje proti vodniku, nežno in kontrolirano dotikanje vodnika, dovolj natančnosti, da kljub odstopanjem zadene pravo mesto, ter majhno maso in kompaktnost zaradi omejenega prostora. Na podlagi teh zahtev sem se odločil za pnevmatski linearni pomik in pnevmatsko prijemalo. Podjetje pnevmatiko že uporablja – zato je integracija takšnega sistema hitrejša, saj pnevmatski cilinder omogoča preprost in ponovljiv linearni pomik, prijemalo pa omogoča natančno vodenje in priklop vodnika. Napravo sem zasnoval tako, da je izdelana iz 3D tiskanih delov v kombinaciji s standardnimi komponentami, kar mi je omogočilo hitro izdelavo prototipa in izvedbo več razvojnih iteracij.

### 3.2.2 Konceptna postavitve

Pri zasnovi sem napravo razdelil na tri glavne funkcijske sklope. Gibalni sklop sestavlja pnevmatski cilinder, ki se pomika vodoravno proti vodniku. Priklopni sklop oz. prijemalo je mehanizem, ki drži merilni kabel in ga natančno priklopi na MC4 vodnik. Nosilni sklop pa predstavlja konstrukcija iz 3D tiskanih delov, ki cilinder in prijemalo drži v ustrezni osi in višini, ter ju pritrdjuje na obstoječo linijo. Vse tri sklope sem modeliral tako, da jih je mogoče pritrditi na že obstoječe aluminijaste profile konstrukcije testne postaje.

### 3.2.3 Povezava z obstoječo linijo

Eden izmed ključnih ciljev je bil, da napravo lahko namestim na obstoječo prijemalno konstrukcijo preizkuševalne postaje, ter jo pritrdim brez vrtanja, rezanja ali drugih posegov v obstoječe dele. Hkrati sem jo moral uskladiti z vakuumskimi prijemali, ki držijo modul. 3D tisk je imel pri tem veliko prednost, saj sem lahko nosilce natančno prilagodil razpoložljivemu prostoru in obstoječi geometriji postaje.

### 3.2.4 Utemeljitev izbrane rešitve

Idejna zasnova temelji na več dejanskih lastnostih prototipa. Linearni pomik, izveden s pnevmatiko, je preprost in zanesljiv, hkrati pa omogoča dovolj natančno gibanje. Zaradi toleranc položaja vodnikov sem moral v konstrukciji omogočiti določeno fleksibilnost, da se sistem lahko prilagodi odstopanjem. Vsi nosilni in povezovalni elementi so izdelani s 3D tiskanjem, zato je naprava enostavna za sestavljanje in odstranjevanje, ter tudi primerno prilagojena obstoječemu procesu testiranja.

### 3.2.5 Idejni potek delovanja

Idejni potek delovanja naprave je naslednji:

1. Modul prispe od poravnalne postaje do testne postaje.
2. Vakuumska prijemala ga primejo in dvignejo v pravilnem položaju.
3. Ko delavec potrdi pripravljenost modula, se sproži naprava.
4. Pnevmatško prijemalo prime MC4 vodnik.
5. Pnevmatški cilindri avtomatsko priklopi vodnika na oba MC4 vodnika.
6. Izvede se električni preizkus modula.
7. Naprava se umakne in modul nadaljuje pot na naslednjo postajo.

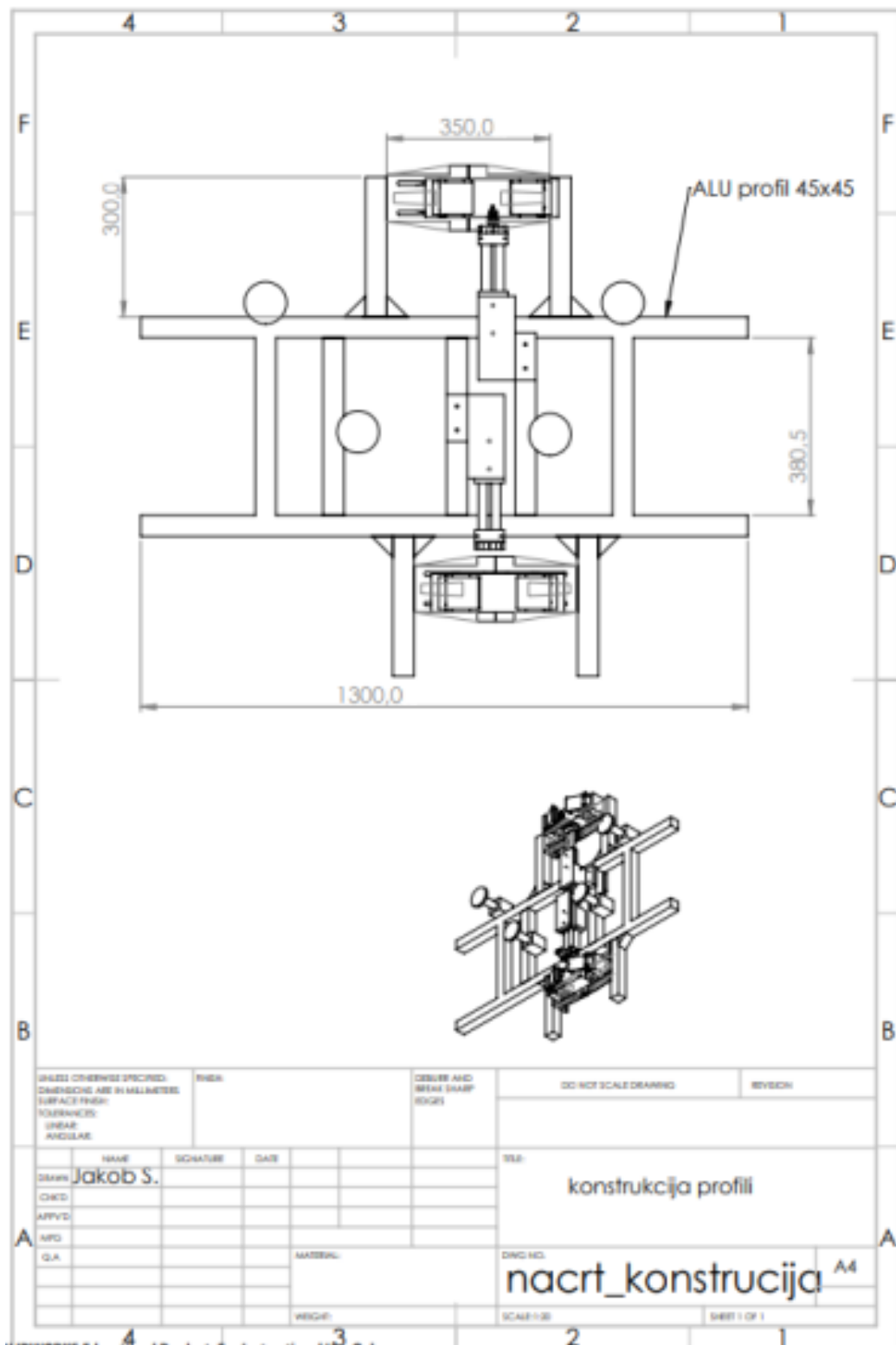
### 3.3 KONSTRUKCIJSKA DOKUMENTACIJA ZA NAPRAVO

Da bi preveril izvedljivost, natančnost delovanja in prostorske zahteve naprave, sem celotno konstrukcijo najprej zasnoval v programu SolidWorks. V modelu sem združil standardne pnevmatske komponente in vse lastne mehanske dele, izdelane s 3D tiskanjem.

#### 3D model mi je omogočil:

- preverjanje hodov cilindra,
- prilagajanje položaja prijemala,
- preverjanje ustreznosti pritrditve na obstoječo aluminijasto konstrukcijo,
- iterativno izboljševanje geometrije 3D tiskanih delov,
- izogibanje kolizijam sosednjih elementov testne postaje.

Slika 3: Neformalni načrt za pomoč pri sestavljanju konstrukcije za preizkuševanje





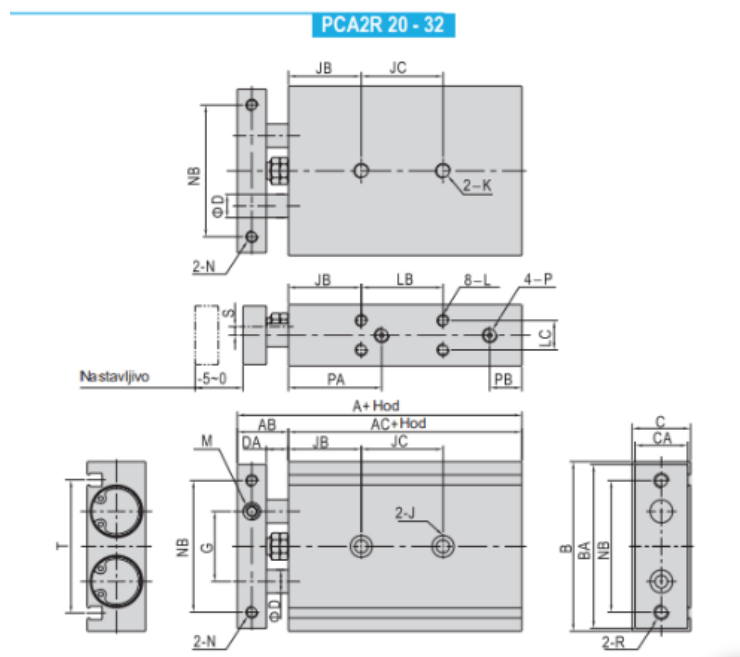
### 3.3.2 Pnevmatski cilinder

Za linearni pomik sem določil dvosmerni pnevmatski cilinder PCA2R 20–32 proizvajalca Tio Pneumatics, ki omogoča nastavljiv hod in zadostno silo pri tlaku 6–7 bar (Tio Pneumatics, 2025). Slednji omogoča:

- linearen pomik,
- dovolj natančno gibanje,
- enostavno regulacijo hitrosti z dušilkami,
- možnost reguliranja sile preko tlaka.

Njegova vpetja, nastavki in nosilni deli okrog njega pa so vsi izdelani s 3D tiskom in sem jih posebej prilagodil dejanski geometriji postaje. Na sliki 5 je delavniška risba omenjenega cilindra iz kataloga.

Slika 5: Cilinder PCA2R 20-32

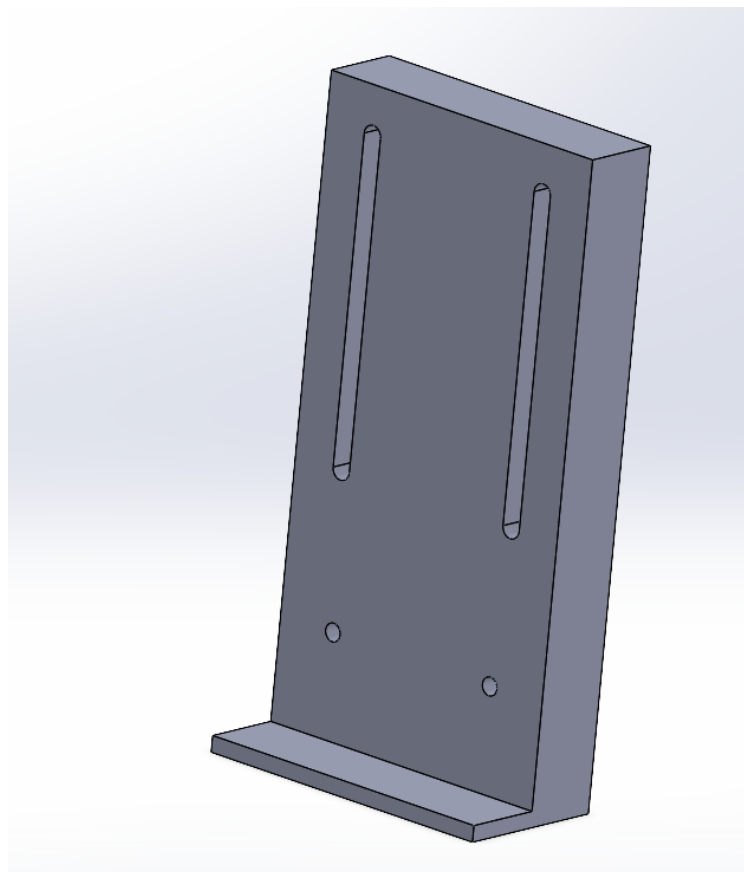


Vir: (Tio Pneumatics, 2025)

### 3.3.3 Nosilec cilindra

Nosilec cilindra je bil v celoti razvit in izdelan s 3D tiskom. V programu SolidWorks sem ga oblikoval tako, da je prilagojen dejanski višini in odmiku cilindra od aluminijastega profila ter vsebuje utore za pritrditev na obstoječe profile. V konstrukcijo sem vključil ojačitve oz. rebra za večjo togost; geometrijo pa zasnoval tako, da omogoča natančno poravnavo cilindra, pri čemer so površine prilagojene obliki ohišja cilindra. Nosilec sem tiskal iz materiala PLA s 40-odstotnim polnilom in višino sloja 0,2 mm v standardnem FDM načinu tiskanja. Med razvojem je nosilec preстал več iteracij. Po prvih testih sem moral popraviti debeline sten in geometrijo ojačitev, da sem dosegel zadostno togost. Na spodnji sliki je zaslonski posnetek nosilca, izvožen iz programskega okolja SolidWorks.

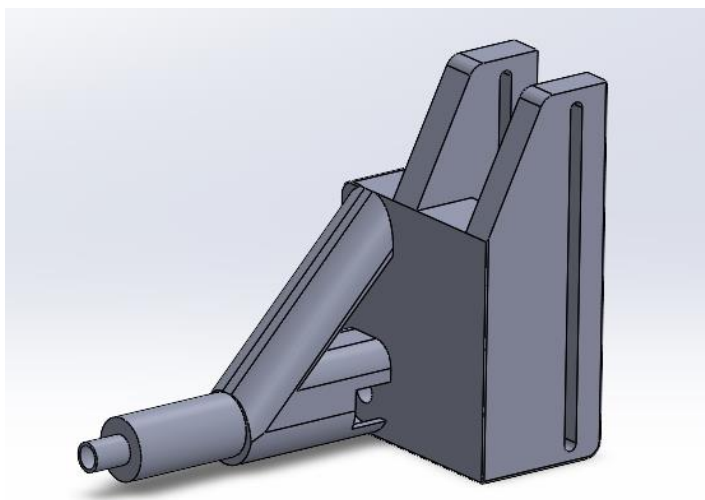
Slika 6: 3D model nosilca cilindra



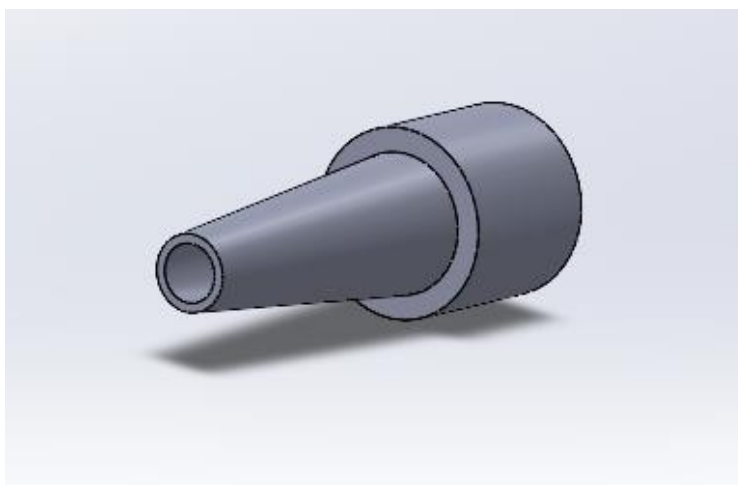
### 3.3.4 Nastavek in nosilec za držanje in stabilizacijo vhodnega kabla

Nastavek za držanje in stabilizacijo vhodnega kabla je lociran na koncu batnice vodnika, njegova konusna zasnova pa omogoča, da hkrati stabilizira kabel in deluje kot nosilni element. S tem zagotavlja, da kabel pri priklopu ohranja pravilno lego in ne zdrsne iz položaja. Utori omogočajo vertikalno prilagajanje lege in pritrjevanje s standardnimi vijaki M6. Na spodnjih slikah (slika 7, slika 8) sta zaslonska posnetka nastavka in nosilca za držanje in stabilizacijo vhodnega kabla, izvožena iz programskega okolja SolidWorks.

Slika 7: 3D model nosilca kabla



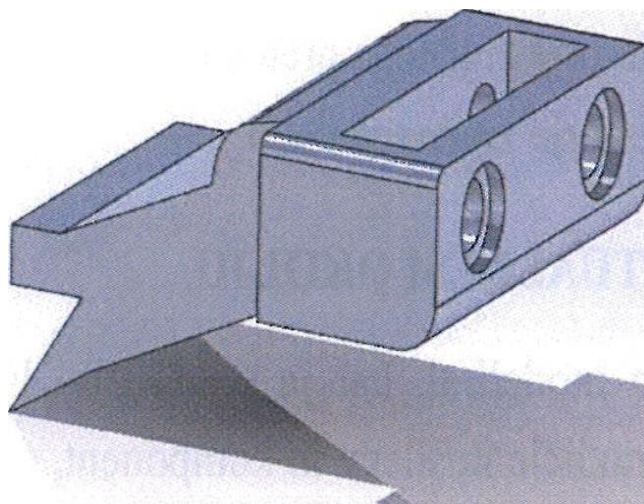
Slika 8: 3D model nastavka za stabilizacijo



### 3.3.5 Nastavki za prijemalo

Nastavki, nameščeni na rokah prijemala, so zasnovani tako, da lahko poberejo vodnik ne glede na njegovo pozicijo in orientacijo. Ob stiku z nastavki in ob stisku čeljusti se vodnik samodejno pozicionira v sredino premice linearne pomika vhodnega kabla na batnici, kar omogoča ponovljiv in natančen priklop. Na spodnji sliki je zaslonski posnetek nastavka za prijemalo, izvožen iz programskega okolja SolidWorks.

Slika 9: 3D model nastavka za prijemalo



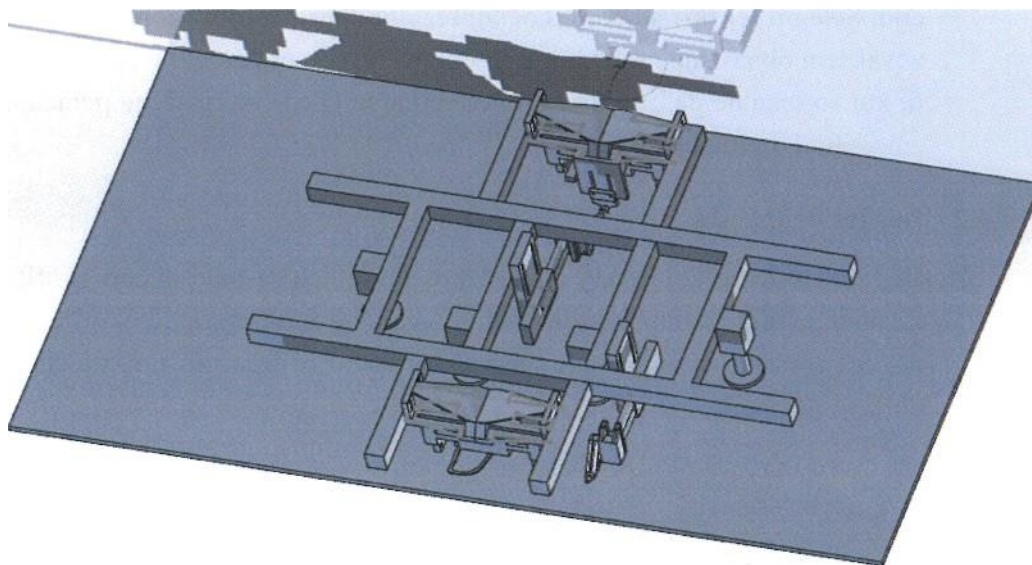
### 3.3.6 Nosilni elementi konstrukcije

Celotno konstrukcijo, z izjemo aluminijastih profilov, sem izdelal s 3D tiskanjem. Med nosilne elemente sodijo nosilci za cilinder, nosilci za prijemalo, vmesni distančniki, prilagojen držalni okvir ter pritrdilni elementi za montažo na aluminijasti profil testne postaje. Izdelava teh delov s 3D tiskom mi je omogočila hitro prilagajanje geometrije, iterativno optimizacijo oblike ter bistveno nižje stroške prototipiranja. Poleg tega je bila montaža enostavna in ni zahtevala dodatnih kovinskih obdelav.

### 3.3.7 Celoten CAD sestav

Končni model naprave prikazuje pravilno lego 3D tiskanih nosilcev, hod cilindra 32 mm in položaj prijemala glede na vodnike. V modelu je razvidna tudi kompatibilnost konstrukcije z obstoječo testno postajo ter odsotnost kolizij z vakuumskimi prijemali. Celoten CAD sestav je predstavljal osnovno podlago za izdelavo prototipa in načrtovanje začetnih testov. Na spodnji sliki je zajet zaslonski posnetek celotnega CAD sestava, tj. za pomoč pri načrtovanju in nadaljnjem sestavljanju naprave, izvožen iz programskega okolja SolidWorks.

Slika 10: 3D model celotne konstrukcije



## 3.4 TEHNOLOŠKI POSTOPEK ZA IZDELAVO PROTOTIPA

Prototip naprave sem izdelal na osnovi razvite 3D konstrukcije v SolidWorksu. Cilj je bil izdelati napravo, ki jo lahko hitro namestim ob obstoječo testno postajo, preverim njeno delovanje in po potrebi izvedem iteracije konstrukcije. Ker sem želel nizke stroške izdelave in možnost hitrega spreminjanja geometrije, sem vse mehanske dele izdelal s pomočjo 3D tiskanja. Tiskanje je potekalo v več fazah, vsaka faza pa je ustrezala eni iteraciji prototipa.

### 3.4.4 Priprava 3D modelov za tisk

V programu SolidWorks sem vse konstrukcijske dele izvozil v format STL in jih pripravil za tisk na FDM tiskalniku. Za tisk sem uporabil material PLA s 40-odstotno polnitvijo in debelino sloja 0,2 mm ter po potrebi standardno mrežo podpor. Pred tiskanjem sem vsak kos orientiral tako, da sem zmanjšal potrebo po podporah, izboljšal mehansko trdnost v smeri glavnih obremenitev in zagotovil boljšo površinsko kakovost na naležnih površinah.

### 3.4.5 Tiskanje in obdelava delov

Po pripravi modelov sem vse dele natisnil na FDM 3D tiskalniku. Po tiskanju sem izvedel osnovno naknadno obdelavo, ki je vključevala odstranjevanje podpor, čiščenje robov in preverjanje prileganja dimenzij. Na mestih za vijake in utore sem po potrebi izvedel ročno prilagajanje, da sem zagotovil pravilno vpetje. Nekateri deli so zahtevali dodatne iteracije, ker so bile stene na kritičnih mestih prešibke, ali pa ni bilo dovolj prostora za vijake.

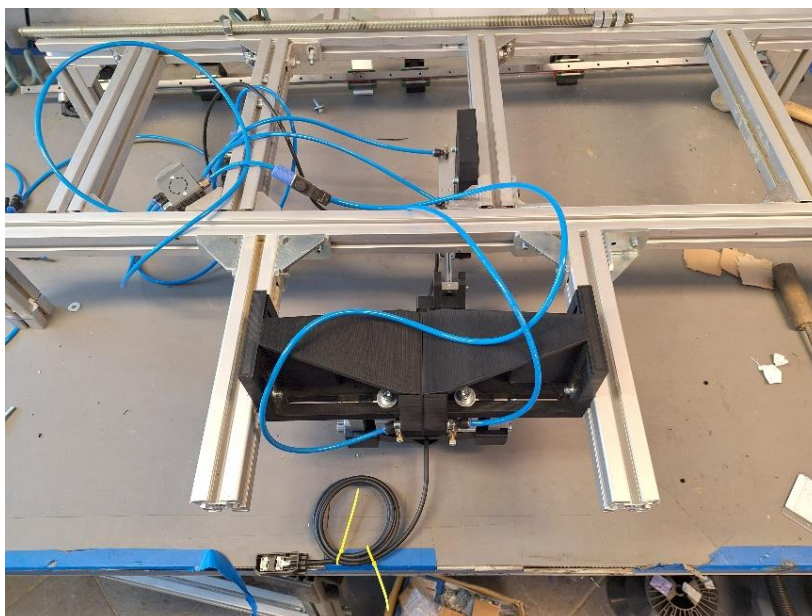
### 3.4.6 Sestavljanje osnovne konstrukcije

Ko so bili vsi deli natisnjeni, sem iz teh sestavil osnovno konstrukcijo naprave, ki so:

- 3D tiskani nosilci,
- distančniki,
- pritrdilni elementi za povezavo z aluminijastim profilom testne postaje,
- držalo cilindra,
- nosilni okvir prijemala.

Zaradi natančno izdelanih modelov je bila montaža enostavna, in to brez naknadnih obdelav kovine ali dodatnega orodja. Na sliki 11 je prikazan prvi sestavljen prototip.

Slika 11: 3D model prototipa naprave



### 3.4.7 Namestitev pnevmatskega cilindra

Na 3D tiskani nosilec sem pritrdil pnevmatski cilinder PCA2R 20–32. Nosilec je bil oblikovan tako, da se cilinder usede na svoje mesto in ga je mogoče fiksirati s standardnim vijakom.

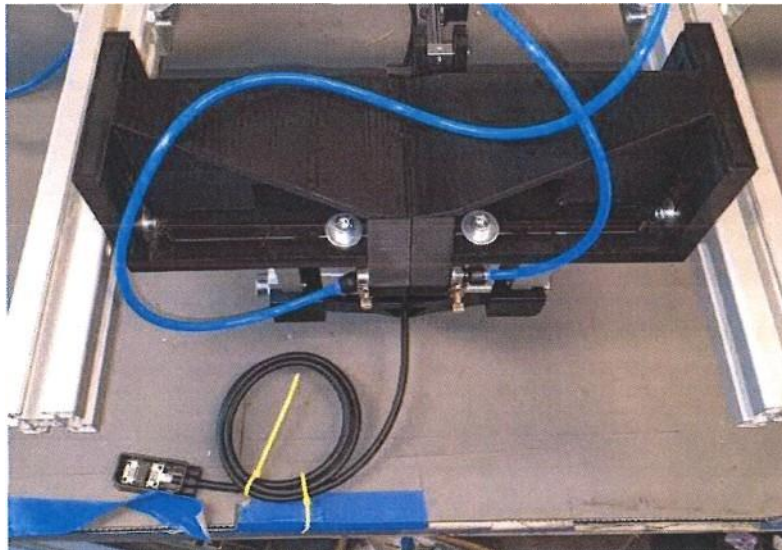
Ključne točke, ki sem jih preveril po montaži, so naslednje:

- ali je cilinder popolnoma vzporeden s smerjo gibanja proti MC4 vodniku,
- ali pride do trenja med nosilcem in batnico (ne sme priti),
- ali je hod 32 mm zadosten za izvedbo priklopa.

### 3.4.8 Montaža prijemala

Na izhodno batnico cilindra sem pritrdil pnevmatsko prijemalo, pri čemer sem uporabil 3D tiskano vmesno geometrijo, ki sem jo zasnoval posebej za ta prototip. Prijemalo sem poravnal tako, da se čeljusti ob dotiku popolnoma ujemajo s smerjo vodnika. Slednje je bil ključen del montaže, saj že majhna odstopanja lahko povzročijo slabo vzpostavitev stika. Slika 12 prikazuje montirane nosilce in prijemalo.

Slika 12: Montirani nosilci in prijemalo



### 3.4.9 Priključitev pnevmatskega sistema

Na izhodno batnico cilindra sem pritrdil pnevmatsko prijemalo, pri čemer sem uporabil 3D tiskano vmesno geometrijo, zasnovano posebej za ta prototip. Prijemalo sem natančno poravnal tako, da se čeljusti ob dotiku popolnoma ujemajo s smerjo vodnika, saj bi že majhna odstopanja lahko povzročila slab stik ali mehanske obremenitve vodnika.

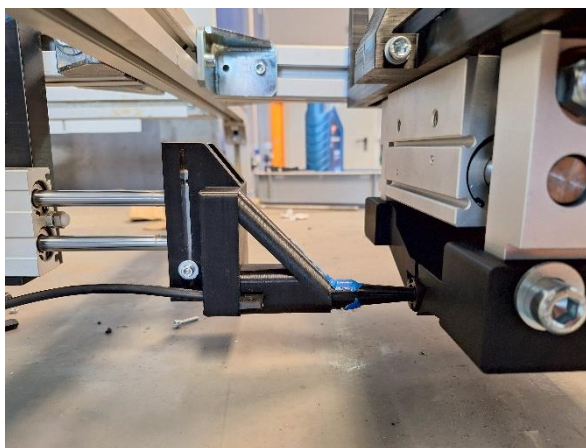
## 3.5 NOV TEHNOLOŠKI POSTOPEK V FAZI ELEKTRIČNEGA PREIZKUŠANJA SONČNIH PANELOV

Nov tehnološki postopek vključuje avtomatiziran priklop merilnih vodnikov na MC4 vodnike s pomočjo razvite naprave. Preden sem napravo preizkusil na dejanskem modulu, sem izvedel t. i. "suhi" test, s katerim sem preveril celoten hod cilindra, hitrost pomika, morebitne vibracije ali zatikanje in poravnavo prijemala. Suhi test je potrdil, da se prijemalo giblje natančno po predvideni osi, in da je celotna konstrukcija mehansko stabilna.

### 3.5.1 Prvi mehanski test

V prvi fazi sem izvedel mehanski test brez modula. Pri tem sem preveril hod cilindra, ki znaša 32 mm, poravnavo prijemala, pravilnost delovanja dušilk, odzivnost cilindra pri različnih tlakih ter stabilnost 3D tiskanih nosilcev. Ker naprava še ni bila obremenjena z dejanskim modulom, so se vsi mehanski deli obnašali po pričakovanjih, gibanje pa je bilo gladko in brez kolizij.

Slika 13: Vstavljen vodnik



Slika 14: Začetna pozicija



### 3.5.2 Prvi test z modulom – problem pri stabilizaciji vodnika

Pri prvem preizkusu na dejanskem modulu test ni bil uspešen. Glavni problem je bil, da se je kabel pri priklopu v vodnik zvijal in premikal. Razlogov za neuspeh je bilo več: sila vklapljanja je bila prevelika, 3D tiskani stabilizator je bil premalo tog, kabel se je pri vstopu v vodnik zaletel vanj in ga je v nekaterih primerih celo potisnil nazaj, zato električni stik ni bil zanesljivo vzpostavljen. Ti rezultati so pokazali, da mora biti kabel mehansko bolj stabiliziran, vodnik pa zadržan v točnem položaju, saj sama pravilna pot prijemala ni zadostovala.

### 3.5.3 Izvedene izboljšave po prvem neuspešnem testu

Po prvem neuspehu sem stabilizator konstruktivno izboljšal. 3D tiskani element sem ojačal tako, da sem povečal debeline sten in na kritičnih mestih dodal ojačitvena rebra. Hkrati sem izboljšal vpetje kabla in vodnika, da bi preprečil premikanje med priklopom. Na podlagi teh sprememb sem izdelal novo različico stabilizatorja in izvedel ponovni preizkus.

### 3.5.4 Drugi test po izboljšavi

Pri drugem testu je naprava pravilno dosegla MC4 vodnik. Pri tlaku pribl. 1,3–1,5 bar je vzpostavila električni stik in izvedla priklop brez zvijanja vodnika. Kljub temu ponovljivost še ni bila popolna, kar je značilno za prototipne mehanske rešitve in konstrukcije, izdelane s 3D tiskom.

### 3.5.5 Test ponovljivosti v prototipni fazi

Za oceno ponovljivosti sem izvedel več zaporednih preizkusov. Ker ni šlo za avtomatski proizvodni test, so bili poskusi izvedeni ročno in večinoma z istim modulom. Ugotovil sem, da naprava večkrat uspešno izvede priklop, v nekaterih primerih pa je bilo potrebno rahlo prilagoditi položaj modula ali vodnika. Ponovljivost ni bila popolna, kar pripisujem tolerancam položajev MC4 vodnikov, omejeni togosti 3D tiskanih delov in ročnemu pozicioniranju modula. Prototip je tako sicer resda dokazal delovanje koncepta, vendar v času prakse te raziskave za vključitev v neprekinjeno proizvodno linijo še ni bil pripravljen.

### 3.5.6 Povzetek testiranja

Testi so pokazali naslednje rezultate:

- naprava deluje kot prototipna rešitev,
- koncept avtomatskega priklopa je potrjen,
- ključna pomanjkljivost je bila nezadostna stabilizacija vodnika,
- po ojačitvi stabilizatorja se delovanje izboljša,
- ponovljivost ni bila popolna, kar je pri 3D tiskani konstrukciji pričakovano,
- naprava je dosegla raven, primerno za nadaljnji razvoj in optimizacijo.

Nadaljnje faze razvoja, ki so potekale po zaključku prakse, so definirane v zaključnem poglavju.

### **3.6 PRIMERJAVA OBSTOJEČEGA IN NOVEGA TEHNOLOŠKEGA POSTOPKA V FAZI ELEKTRIČNEGA PREIZKUŠANJA SONČNIH PANELOV**

Za primerjavo obstoječega in novega postopka sem upošteval stanje v času prakse te raziskave, ko je bil prototip še v razvoju, ter tudi obstoječi ročni postopek, ki se je uporabljal pred uvedbo prototipa.

#### **3.6.1 Obstoječi postopek (pred razvojem prototipa)**

Obstoječi tehnološki postopek električnega preizkušanja sončnih modulov je temeljil na ročnem delu operaterja. Vodnika MC4 sta bila ročno priključena na merilne vodnike, zato je bila uspešnost postopka v veliki meri odvisna od operaterjeve natančnosti in izkušenj. Električni stik ni bil vedno ponovljiv, postopek je bil časovno neenakomeren, vedno pa je obstajala možnost mehanskih poškodb vodnikov. Poleg tega ergonomija dela ni bila optimalna, saj je operater neprestano ponavljal enake gibe.

#### **3.6.2 Novi postopek z uporabo prototipa**

Novi postopek, ki sem ga razvil s prototipom, vključuje avtomatski pomik prijemala proti vodniku, regulirano silo priklopa, natančno vodeno pot in delno avtomatski »klik« vodnika. Po ojačitvi stabilizatorja je izboljšana tudi stabilizacija kabla, ročni poseg operaterja pa je bistveno zmanjšan. Takšen postopek je bil v prototipni fazi preizkušen izven redne proizvodnje.

#### **3.6.3 Primerjava postopkov**

Ročni postopek je bil sicer stabilen in zanesljiv, a počasnejši in izrazito odvisen od človeka. Novi prototipni postopek je hitrejši ter veliko bolj ponovljiv, čeprav v prototipni fazi še ni popolnoma stabilen. Zmanjšuje neposredno ročno delo, zmanjšuje tveganje za napake in jasno nakazuje smer nadaljnjega razvoja sistema.

### 3.6.4 Sklep primerjave

Sklepna primerjava kaže, da novi tehnološki postopek izboljšuje ergonomijo, zmanjšuje ročno delo operaterja in povečuje hitrost priklopa. V prototipni fazi sicer še ni dosegal stabilnosti, ki bi bila potrebna za vključitev v neprekinjen proces, glavna vrednost novega postopka pa je v tem, da iz ročnega postopka vzpostavi temelje za avtomatizacijo, s čimer predstavlja pomemben korak k večji učinkovitosti testiranja. V spodnji tabeli je prikazana primerjava predhodnega in novega postopka.

Tabela 4: Primerjalna tabela predhodnega in novega tehnološkega postopka

<b>Ko-rak</b>	<b>Predhodni postopek – ročni priklop</b>	<b>Novi postopek – prototipni avtomatski priklop</b>
1	Modul po laminaciji in vizualnem pregledu potuje po tekočem traku do testne postaje.	Enako kot v predhodnem postopku – transport modula po traku do testne postaje.
2	Modul se na postaji ustavi samodejno. Vakuumska prijemala ga dvignejo in poravnajo v pravilno lego.	Enako – obstoječi sistem poravnave z vakuumskimi prijemali ostane nespremenjen.
3	Operater poišče položaj pozitivnega in negativnega MC4 vodnika modula.	Prototip naprave je v parkirni legi na testni postaji in pripravljen na pomik proti vodnikoma.
4	Operater ročno priklopi oba MC4 vodnika na merilne vodnike testne naprave.	Pnevmatski cilinder izvede linearni pomik prijemala proti vodnikoma in izvede avtomatski priklop vodnikov.
5	Stabilizacija kabla in vodnikov je popolnoma odvisna od spretnosti operaterja in trenutnega položaja modula.	Kabel in vodnik sta stabilizirana s 3D tiskanim stabilizatorjem in prijemalom (po kasnejši ojačitvi stabilizatorja).
6	Operater na vmesniku ročno potrdi, da je modul pripravljen za test.	Potrditev pripravljenosti modula na HMI ostane ročna (prototipna faza).
7	Transportni sistem modul pomakne v testno postajo z bliskavico (flash test); meritev poteka avtomatsko.	Enako – način električnega testiranja ostane nespremenjen.
8	Po končanem testu operater ročno odklopi MC4 vodnika z vodnikov.	Po testu se prijemalo s cilindra avtomatsko umakne v začetni položaj in s tem sprosti vodnika.
9	Čas priklopa in odklopa je odvisen od operaterja, okvirno 8–12 s na modul.	Čas priklopa in odklopa je krajši in bolj konstanten, okvirno 3–4 s na modul (prototipna ocena).
10	Ponovljivost je nižja: vpliv človeškega faktorja, možnost napačnega kota priklopa in mehanskih poškodb vodnika.	Ponovljivost je ustrežnejša, vendar v prototipni fazi še ni popolna – omejitve 3D tiskanih delov in ročnega pozicioniranja modula.

## 4 ZAKLJUČEK

To zaključno poglavje se osredotoča na primerjavo koncipiranja ter prototipiranja naprave v začetnih fazah ter na delovanje oziroma dokončno razvit, funkcionalen del avtomatizirane proizvodnje, ki se uporablja v trenutnem času, tj. slabi dve leti kasneje.

### 4.1 PRIMERJAVA PROTOTIPNE NAPRAVE Z DOKONČANO INDUSTRIJSKO IZVEDBO

Razvoj naprave za avtomatski priklop MC4 vodnikov je potekal v več fazah. Prvo fazo predstavlja moj prototip, ki sem ga razvil v času praktičnega izobraževanja in te raziskave. Drugo fazo predstavlja dokončna industrijska različica naprave, ki se uporablja v proizvodnji v podjetju BISOL Group d.o.o. danes.

Čeprav je bila naprava v času mojega odhoda iz podjetja še v prototipni fazi in takrat še ni bila vključena v proizvodni proces, so kasnejše nadgradnje podjetja temeljile neposredno na tem prvotnem konceptu. Osnovni mehanizem delovanja, princip pomika in ideja stabilizacije vodnika so v industrijski različici ohranjeni, izboljšave pa so predvsem mehanske in namenjene povečanju zanesljivosti.

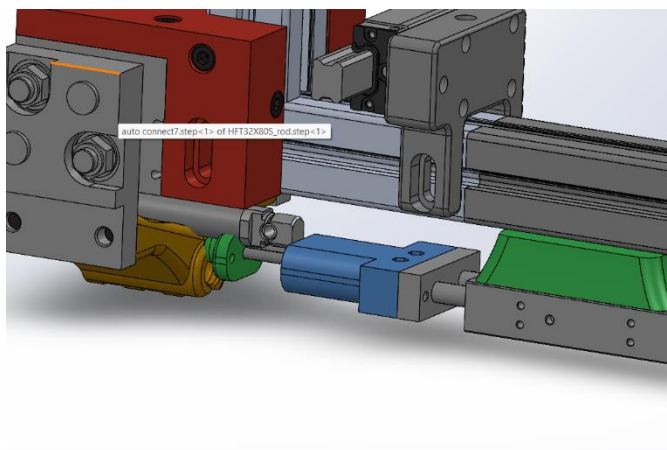
### 4.2 OHRANJEN OSNOVNI KONCEPT

Kljub dvema letoma nadaljnjega razvoja je jedro naprave ostalo enako mojemu predlogu prototipa, kot sledi:

- avtomatski linearni pomik pnevmatskega cilindra proti vodniku,
- dvo-prstno prijemalo,
- mehanski priklop MC4 vodnikov,
- stabilizacija kabla in vodnika pred priklopom,
- montaža na testni postaji.

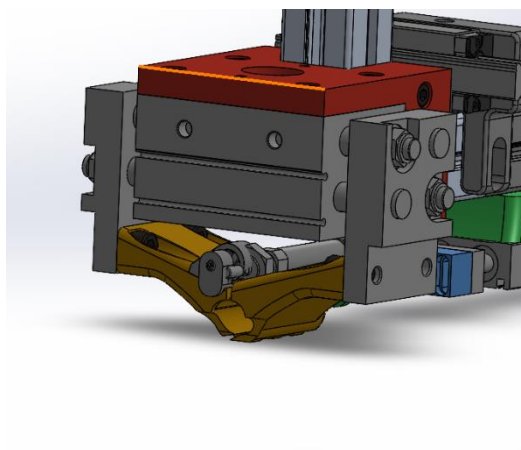
Slednje potrjuje, da je bila začetna idejna in konstrukcijska zasnova pravilna ter primerna za industrijsko uporabo po optimizaciji. Na spodnjih slikah je razviden posnetek zaslona sedanjega CAD modela – datoteke so s strani podjetja predložili za potrebe te raziskave sami ob ponovnem obisku in ogledu proizvodnje.

Slika 15: CAD model sedanje različice



Vir: (Štefulj, in drugi, 2025)

Slika 16: CAD model sedanje različice



Vir: (Štefulj, in drugi, 2025)

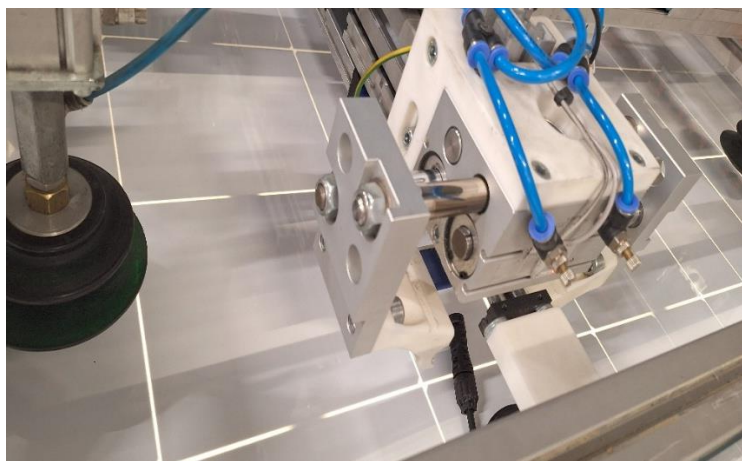
### 4.3 KLJUČNE RAZLIKE MED PROTOTIPOM IN DOKONČANO NAPRAVO

Čeprav je osnovna zasnova ostala enaka, so bile v končni industrijski izvedbi uvedene pomembne izboljšave, ki odpravljajo ključne pomanjkljivosti prototipa.

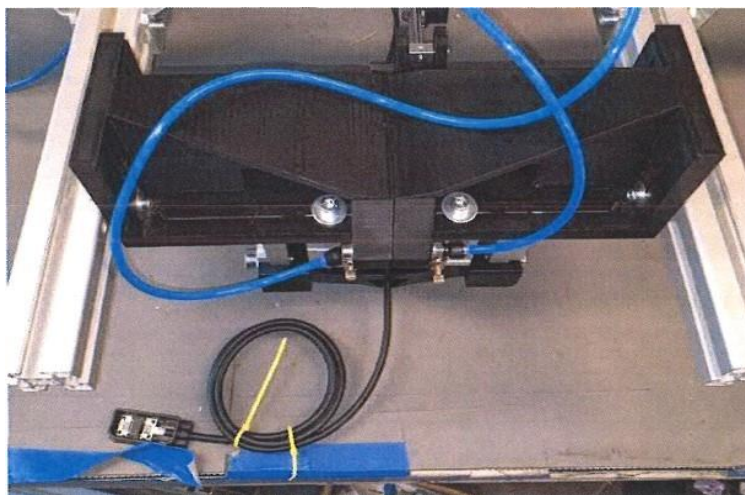
### a) Ojačan in preoblikovan nosilec prijemala

V mojem prototipu je bil nosilec prijemala manj tog in manj prilagojen dodatnim komponentam. V dokončni napravi je nosilec mehansko ojačan; geometrija je spremenjena in prilagojena novim elementom, hkrati pa konstrukcija omogoča integracijo dodatnega stabilizacijskega cilindra. Ta sprememba je povečala stabilnost priklopa in zmanjšala neželene premike kabla. Na sliki 16 je prikazana zadnja različica nosilca prijemala v uporabi. Na sliki 17 je prototipna različica nosilca prijemala.

Slika 17: Zadnja različica nosilca prijemala



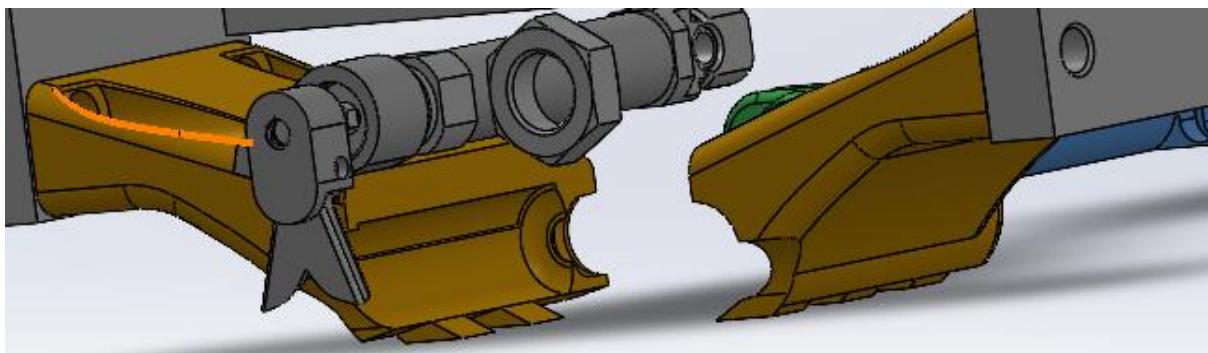
Slika 18: Prototipna različica nosilca prijemala (2024)



### b) Dodan mali cilindar z vertikalno usmerjenim nastavkom za stabilizacijo vodnika

Ena največjih težav prototipa je bilo zvijanje vodnika pri priklopu. Industrijska različica to rešuje z dodatnim majhnim navpičnim cilindrom, ki ima potisno palico. Ta palica porine MC4 vodnik naprej, ga med priklopom drži stabilnega, preprečuje njegovo vračanje nazaj in zagotavlja, da ga vhodna elektroda ne potisne iz pravilne lege. Na ta način je bistveno izboljšana ponovljivost in natančnost priklopa. Slika 18 prikazuje posnetek zaslona CAD modela dodanega malega cilindra za vertikalno usmerjenim nastavkom za stabilizacijo vodnika.

Slika 19: Mali cilindar z vertikalno usmerjenim nastavkom za stabilizacijo vodnika



Vir: (Štefulj, in drugi, 2025)

### c) Gumijasti vložki na prijemalnih čeljustih

V prototipu so bile čeljusti prijemala gladke, kar je omogočalo določeno drsenje vodnika. V končni napravi imajo čeljusti na notranjih površinah gumirane vložke, ki povečajo trenje in onemogočajo zdrs vodnika. S tem je izboljšana stabilnost med vodenjem vodnika v priklop in zmanjšana možnost napačnega položaja.

### d) Nova, podaljšana vhodna elektroda na kablju

Za boljši električni stik in mehansko stabilizacijo je bila v industrijski različici izdelana nova vhodna elektroda. Elektroda je ročno izvedena po meri, ima daljšo prevodniško površino ter je mehansko ojačana in odporna na zvijanje ob vstopu v vodnik. S tem je odpravljen problem, na katerega sem naletel v izgradnji prototipa, kjer se je elektroda pri pritisku zvijala in ni zagotavljala ponovljivega stika vedno.

#### **e) Nova orientacija glavnega cilindra**

V prototipni različici je bil cilinder montiran tako, da ni bil optimalno stabilen. V končni napravi je cilinder položen vodoravno, obe batnici sta v isti osi in smeri, celoten sklop pa je tog in zasnovan z nosilcem, ki je popolnoma prilagojen tej orientaciji. Posledično gre za bolj stabilno delovanje naprave pri industrijskih obremenitvah.

#### **4.4 SKLEP PRIMERJAVE**

Razlika med prototipom in dokončno napravo ni v osnovni zasnovi, temveč v uporabljenih materialih, rešitvah stabilizacije, orientaciji cilindra, izvedbi nosilcev ter v stabilnosti in točnosti gibanja. Jedro naprave, torej koncept avtomatskega pnevmatskega priklopa MC4 vodnikov, je ostalo enako, kot sem ga zasnoval v prototipni fazi. Podjetje je lahko prototip te raziskave uporabilo kot osnovo, na katero je dodalo profesionalne konstrukcijske izboljšave in napravo pripeljalo do tekoče industrijske uporabe.

## **4.5 SPLOŠNI ZAKLJUČEK**

V diplomskem delu sem obravnaval razvoj naprave za avtomatski priklop MC4 vodnikov med električnim testiranjem solarnih modulov v podjetju BISOL Group d.o.o. Osrednji cilj je bil nadomestiti ročni priklop, ki predstavlja časovno in ergonomsko obremenitev ter vključuje tveganje za nepravilne stike.

Na podlagi analiz toleranc položajev vodnikov, prostorskih omejitev in tehničnih zahtev sem razvil idejno zasnovo naprave, ki temelji na pnevmatskem linearnem gibanju in mehanskem prijemu. Za izdelavo prototipa sem uporabil 3D tiskanje, kar je omogočilo hitro prilagajanje konstrukcije in izvedbo več iteracij z nizkimi stroški.

Rezultati prototipnega testiranja so pokazali, da je koncept avtomatskega priklopa izvedljiv, vendar prototip v tej fazi ni dosegal polne ponovljivosti. Največja težava je bila nezadostna stabilizacija MC4 vodnika, zaradi česar je prišlo do zvijanja in premikov kabla. Po izvedenih ojačitvah stabilizatorja se je delovanje izboljšalo, vendar naprava v času mojega razvijanja še ni bila primerna za vključitev v neprekinjen proizvodni proces.

Dve leti kasneje je podjetje napravo nadalje razvilo in vključilo v redno uporabo. Ključnega pomena je, da je tudi industrijska različica naprave izdelana s 3D tiskom, kar pomeni, da je bila izbrana tehnologija primerna ne le za prototipiranje, ampak tudi za dejansko proizvodno uporabo. Nadgradnje, ki jih je podjetje izvedlo, so bile predvsem konstrukcijske: dodan vertikalni cilindar za natančno potiskanje vodnika, gumirani vložki na prijemalnih čeljustih, nova, stabilizirana in podaljšana vhodna elektroda, spremenjena orientacija glavnega cilindra, izboljšana geometrija nosilca prijemala.

Vse nadgradnje so izvedene na osnovi iste zasnove in znotraj iste tehnologije (3D tisk), kar potrjuje ustreznost mojega prvotnega koncepta. Industrijska različica ohranja identično funkcijo in delovanje, medtem ko so spremembe usmerjene zgolj v izboljšanje stabilnosti, mehanske togosti in ponovljivosti.

Zaključim lahko, da naprava v svoji končni izvedbi potrjuje tehnično pravilnost začetne zasnove. Projekt predstavlja uspešen prehod od prototipa, izdelanega s 3D tiskom, do industrijske rešitve, ki se danes uporablja v proizvodnji. Rešitev združuje enostavnost, prilagodljivost in funkcionalnost, pri čemer 3D tisk ostaja ključna tehnologija tako v prototipnih kot tudi v končnih konstrukcijskih elementih.

## 5 VIRI

**Additive manufacturing.** Gibson, Ian, Rosen, David, and Stucker, Brent. 2015. s.l. : New York: Springer, 2015.

**BISOL Group d.o.o. 2025.** <https://www.bisol.com./pv-modules>. [Elektronski] 2025.

**Clark, C.R. in Mayer, E. 2011.** *E-learning and the Science of Instruction*. s.l. : Pfeiffer, 2011.

**FASTEST. 2025.** <https://www.fastestinc.com./products/fig>. [Elektronski] 2025. [Navedeno: 8. 12 2025.]

**[https://dl.bisol.com./files/Duplex%20Brochure/BISOL\\_Duplex\\_brochure\\_EN.pdf](https://dl.bisol.com./files/Duplex%20Brochure/BISOL_Duplex_brochure_EN.pdf). 2024.** [Elektronski] 2024. [Navedeno: 28. 12 2025.]

**IEC 61215. 2021.** Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval – Part 1. [Elektronski] 2021.

**IEC 61730. 2016.** Photovoltaic (PV) module safety qualification – Part 1. [Elektronski] 2016.

**IPTE Factory Automation n.v. 2026.** <https://www.ipte.com./test/fixtures>. [Elektronski] 2026. [Navedeno: 15. 12 2026.]

**ISO 4414. 2010.** Pneumatic fluid power – General rules and safety requirements for systems and their components. [Elektronski] 2010.

**Reinhardt System- und Messelectronic GmbH. 2024.** [https://www.reinhardt-testsystem.de/english./test\\_fixtures/fixture\\_production\\_system.php](https://www.reinhardt-testsystem.de/english./test_fixtures/fixture_production_system.php). [Elektronski] 2024. [Navedeno: 15. 12 2026.]

Slovenski inštitut za standardizacijo. [Elektronski] [Navedeno: 16. 04 2017.] <http://www.sist.si/>.

**Stäubli Electrical Connectors. 2019.** <https://northernep.com./downloads/technical-sheet/MC4.pdf>. [Elektronski] 2019.

**Štefulj, Janez in Polič, Luka. 2025.** 2025.

**Tio Pneumatics. 2025.** <https://tio-pneumatika.si./wp-content/uploads/katalog/1.7.1-cilindri-z-dvema-batnicama-serija-pca2r.pdf>. [Elektronski] 2025.

—. **2025.** <https://tio-pneumatika.si./wp-content/uploads/katalog/1.10.1-dvoprstna-siroka-prijemala-serija-ppaft.pdf>. [Elektronski] 2025.

**WEH GmbH. 2025.** <https://www.weh.com./quick-connectors/for-testing>. [Elektronski] 2025. [Navedeno: 8. 12 2025.]

## **PRILOGE**

PRILOGA A: Shematska risba nosilca cilindra

PRILOGA B: Dvokomponentni nosilec prijemala

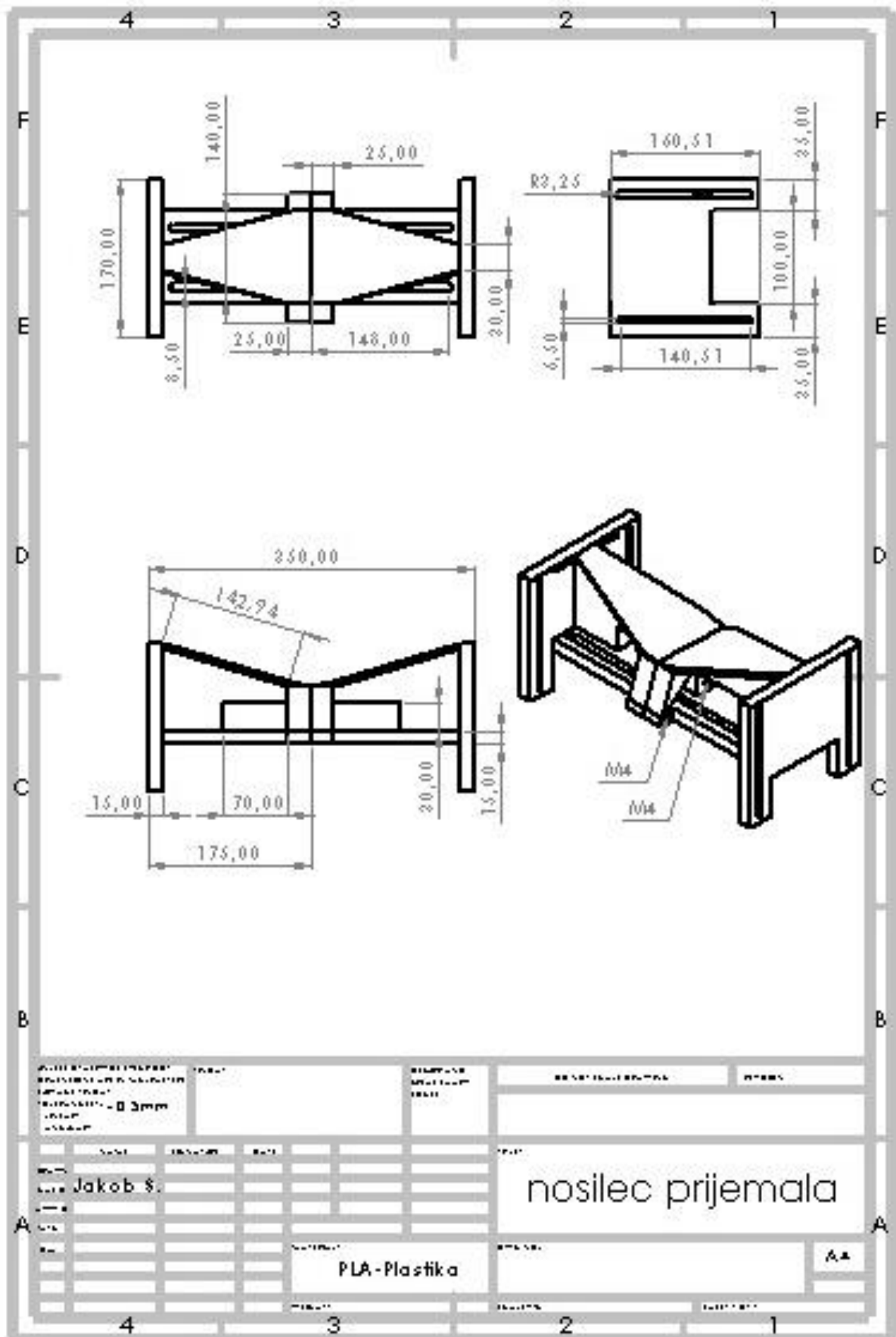
PRILOGA C: Prijemalni nastavek

PRILOGA D: Batnični nastavek kot vodilo in stabilizator kabla

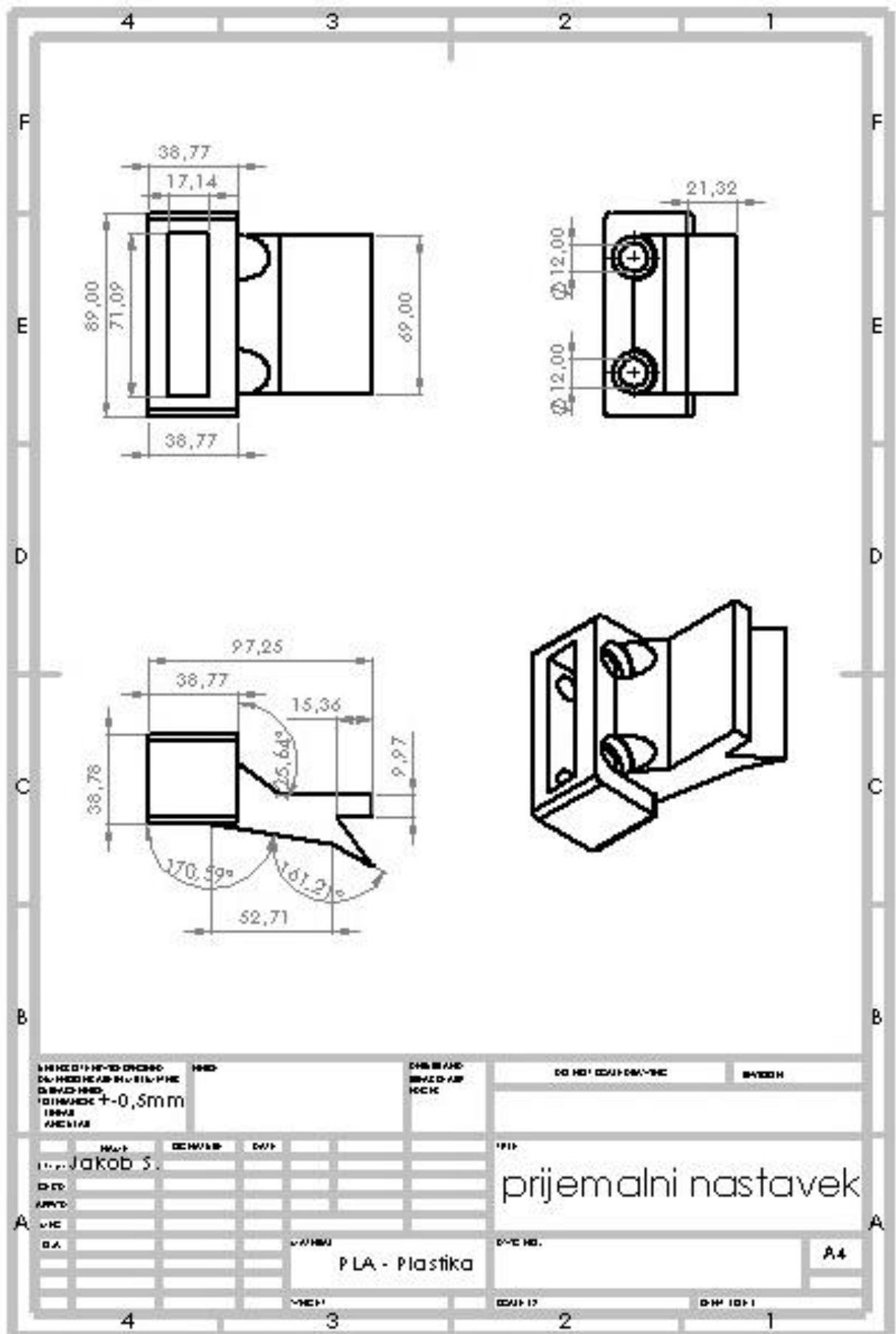
PRILOGA E: Koničasti del batničnega nastavka kot vodila in stabilizatorja



# PRILOGA B: DVOKOMPONENTNI NOSILEC PRIJEMALA



# PRILOGA C: PRIJEMALNI NASTAVEK



# PRILOGA D: BATNIČNI NASTAVEK KOT VODILO IN STABILIZATOR KABLA

