

# RAZVOJ HIDRAVLICNEGA SISTEMA STEWARTOVE PLOŠČADI

Jan Pustavrh, Aljoša Peperko, Franc Majdič

## Izvleček:

Stewartova ploščad omogoča simulacijo v šestih prostostnih stopnjah. Sestavljata jo dva nepravilna šestkotnika, ki sta med seboj povezana s šestimi aktuatorji – hidravličnimi valji. S kontroliranim simultanim uvlačenjem ali izvlačenjem batnic iz cevi hidravličnih valjev se spreminja dolžina posamezne noge in tako dosežemo gibanje zgornje pomične ploščadi, ki je opisano s pomočjo matematičnega ozadja. Dimenzioniranje hidravličnega sistema je bilo osnova za zasnovo večje hidravlične ploščadi nosilnosti 2500 kg. Na obstoječi manjši prototipni hidravlični Stewartovi ploščadi smo izvedli matematični popis šolskega kroga, izdelali program za simulacijo ter izvedli meritve hidravličnih parametrov.

## Ključne besede:

prostostne stopnje, Stewartova ploščad, zasnova, hidravlika, krmiljenje, meritve

## 1 Uvod

Prvi simulator letenja Link Trainer je v zgodnjih dvajsetih letih prejšnjega stoletja zgradil Edwin A. Link [1]. Simulator je imel pnevmatično gibljivo ploščad, ki jo je poganjal meh. Omogočala je naklon okoli vzdolžne osi (ang. roll), prečne osi (ang. pitch) ter navpične osi (ang. yaw) letala.

Stewartova ploščad je eden od najbolj reprezentativnih primerov vzporednih manipulatorjev (ang. parallel manipulators). Sestavljata jo dve šesterokotni osnovni nosilni plošči, nepomična in pomična, ki sta povezani s šestimi aktuatorji (hidravličnimi valji). Z ustreznim spreminjanjem dolžin aktuatorjev (hidravličnih valjev) mehanizem zagotavlja šest prostostnih stopenj (6-DOF) zgornje pomične ploščadi. Ta konfiguracija se v veliki meri uporablja za simulatorje gibanja, njen izvor pa je neposredno povezan z razvojem simulatorjev letenja, ki omogočajo simulacijo v šestih prostostnih stopnjah (6-DOF) [2]. Pogosta različica takšnih sistemov je hidravlična Stewartova ploščad, saj imajo hidravlično gnane ploščadi relativno majhno razmerje med velikostjo in močjo, hkrati pa tudi možnost uporabe večjih sil in navorov v primerjavi s podobnimi električnimi aktuatorji [3]. Kljub omenjenim prednostim so hidravlični sistemi nelinearni, zato morajo krmilne sheme običajno upoštevati hidravlično di-

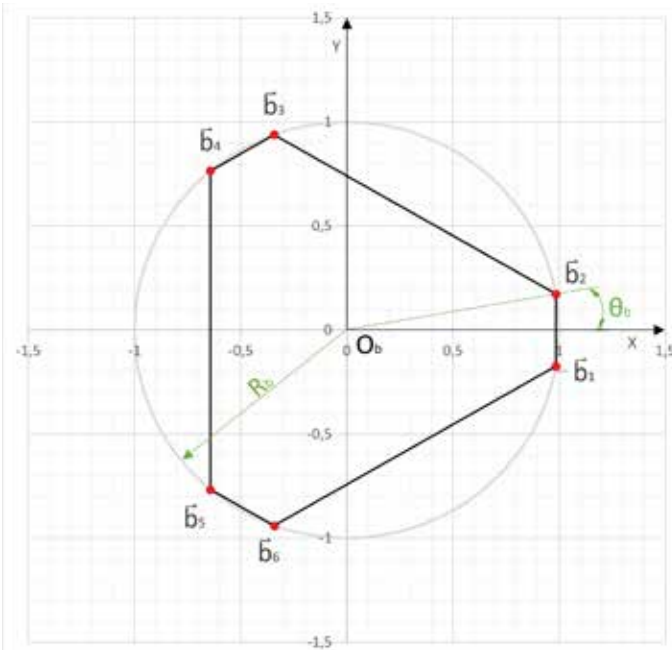
namiko, da dosežejo dobro zmogljivost sledenja položaju [4].

Sistemi, ki omogočajo simulacijo šestih prostostnih stopenj, se uporabljajo v različnih industrijah, kot npr. simulatorji vožnje avtomobila, za izvajanje posebnih učinkov, v filmski industriji, v kinodvoranah za ustvarjanje različnih efektov, na montažnih linijah, kjer je potrebno hitro pobiranje in nameščanje, delta 3D-tiskalniki, v zabaviščnih parkih, zlasti pa za šolanje in izobraževanje pilotov. S pomočjo Stewartove ploščadi lahko umešno ustvarimo pogoje, ki se v realnosti praktično ne morejo zgoditi ali pa se zgodijo izredno redko, in na ta način pripravimo pilote, da se v primeru kakršnih koli težav v zraku odzovejo bolj premišljeno in hitreje, saj so s pomočjo simulatorja že podoživeli podobno situacijo.

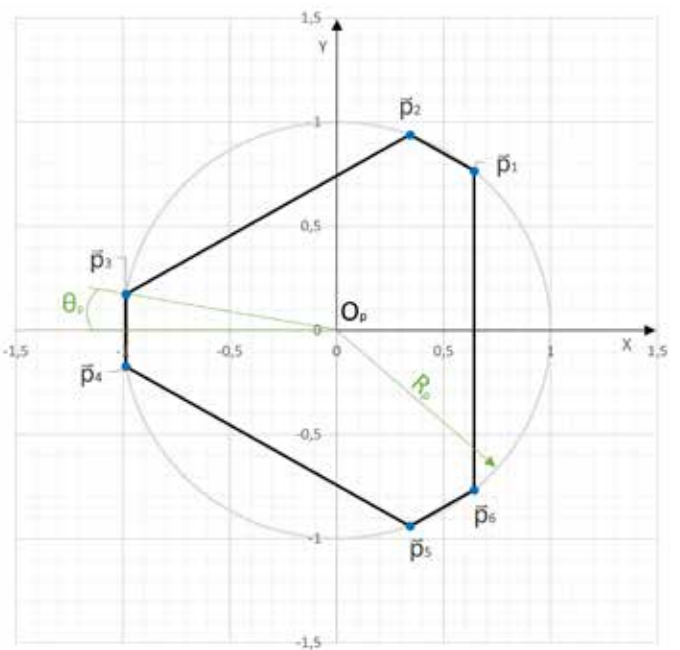
## 2 Matematično ozadje problema

Na spodnji nepomični (slika 1) ( $\vec{b}_i$  ( $i = 1, \dots, 6$ )) in zgornji pomični (slika 2) ( $\vec{p}_i$  ( $i = 1, \dots, 6$ )) ploščadi imamo šest vpetij, ki jih vektorsko opišemo glede na koordinatni sistem na nepomični ( $O_b$ ) oz. pomični ploščadi ( $O_p$ ).  $i$ -ta noga je določena z vektorjem  $\vec{l}_i$  ( $i = 1, \dots, 6$ ), kar prikazuje enačba (1). S tem vektorjem izračunamo dolžino  $i$ -te noge ( $|l_i|$ ), kar je prikazano z enačbo (2). Za izračun vektorja  $i$ -te noge je potrebno upoštevati rotacijsko matriko  $R_p^B$  (3), ki vsebuje kote  $\alpha$  (naklon ali ang. roll),  $\beta$  (nagib ali ang. pitch) ter  $\gamma$  (zasuk ali ang. yaw) in krajevni vektor  $\vec{T}$ , ki določa razdaljo med koordinatnim sistemom na nepomični in pomični ploščadi. Slika 3 prikazuje vse komponente, ki jih potrebujemo za izračun dolžine  $i$ -te noge.

Jan Pustavrh, mag. inž. str., doc. dr. Aljoša Peperko, prof. mat., doc. dr. Franc Majdič, univ. dipl. inž.; vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo



**Slika 1 :** Nepomična ploščad s krajevnimi vektorji šestih vpetij ( $\vec{b}_i$  ( $i = 1, \dots, 6$ )), polmerom  $R_b$  in kotom med vpetjema  $\hat{\theta}_b$



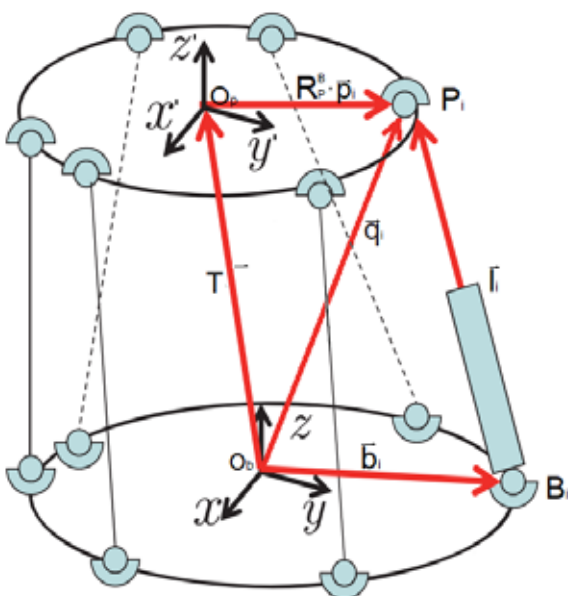
**Slika 2 :** Pomična ploščad s krajevnimi vektorji šestih vpetij ( $\vec{p}_i$  ( $i = 1, \dots, 6$ )), polmerom  $R_p$  in kotom med vpetjema  $\hat{\theta}_p$

$$\vec{l}_i = \vec{T} + R_p^B \cdot \vec{p}_i - \vec{b}_i, \quad i = 1, \dots, 6 \quad (1)$$

$$|l_i| = \sqrt{X_{l_i}^2 + Y_{l_i}^2 + Z_{l_i}^2}, \quad i = 1, \dots, 6 \quad (2)$$

$$R_p^B = \begin{bmatrix} C\gamma C\beta & -S\gamma C\alpha + C\gamma S\beta S\alpha & S\gamma S\alpha + C\gamma S\beta C\alpha \\ S\gamma C\beta & C\gamma C\alpha + S\gamma S\beta S\alpha & -C\gamma S\alpha + S\gamma S\beta C\alpha \\ -S\beta & C\beta S\alpha & C\beta C\alpha \end{bmatrix} \quad (3)$$

kjer C predstavlja kosinus in S sinus.



**Slika 3 :** Komponente s pomočjo katerih izračunamo dolžine  $i$ -te noge in vektor  $\vec{l}_i$ , s katerim opišemo vpetja na pomični ploščadi [4].

### 3 Pregled trga

V nadaljevanju bomo prikazali nekaj simulacijskih ploščadi, ki jih je na trgu mogoče dobiti, in izpisali tehnične specifikacije o simulacijskih ploščadih.

Najprej bomo predstavili simulacijsko ploščad PS-6TL-LP2000 (slika 4) s tehničnimi specifikacijami,



**Slika 4 :** Električna simulacijska ploščad PS-6TL-LP2000 (3406 mm x 3928 mm x 1352 mm) [5]

**Preglednica 1 :** Tehnične specifikacije simulacijske ploščadi PS-6TL-LP2000 [5]

Model	PS-6TL-LP2000
Največja obremenitev na ploščadi [kg]	2000
Dolžina [mm]	3406
Širina [mm]	3928
Višina (ko je ploščad v začetni legi) [mm]	1352

zapisanimi v *preglednici 1* in v *preglednici 2* [5]. Ploščad za izvajanje simulacije uporablja električne aktuatorje. Uporabljamo jo lahko za simulacijo okolijskih učinkov (npr. potresi), simulacijo vožnje vozil, v filmski industriji, kot simulatorje v zabavni industriji, za pozicioniranje satelitov, teleskopov ter anten in kot simulatorje letenja.

**Preglednica 2 :** Pomiki, nagibi, nakloni in zasuki simulacijske ploščadi PS-6TL-LP2000 [5]

(X) V smeri leta letala (ang. surge)	Pomik [mm] Hitrost [m/s] Pospešek [m/s <sup>2</sup> ]	+200/-260 0,65 2,5
(Y) Prečno na let letala (ang. sway)	Gib [mm] Hitrost [m/s] Pospešek [m/s <sup>2</sup> ]	±200 0,63 2,5
(Z) Vertikalna smer (ang. vertical)	Gib [mm] Hitrost [m/s] Pospešek [m/s <sup>2</sup> ]	±110 0,3 2,9
Nagib (ang. roll)	Nagib [°] Hitrost [°/s] Pospešek [°/s <sup>2</sup> ]	±5,9 20 70
Naklon (ang. pitch)	Naklon [°] Hitrost [°/s] Pospešek [°/s <sup>2</sup> ]	±5,6 20 80
Zasuk (ang. yaw)	Zasuk [°] Hitrost [°/s] Pospešek [°/s <sup>2</sup> ]	±10,2 30 125

Naslednja ploščad, ki jo bomo predstavili, je električno gnana simulacijska ploščad eMotion-2700 (*slika 5*) s tehničnimi specifikacijami, zapisanimi v *preglednici 3* in v *preglednici 4* [6]. Ploščad je primerna za simulacijo vožnje avtomobila, vlaka, tramvaja, tovornjaka, terenskih vozil, zabavne aplikacije in simulatorje letenja.

**Preglednica 4 :** Pomiki, nagibi, nakloni in zasuki simulacijske ploščadi PS-6TL-LP2000 [5]

(X) V smeri leta letala (ang. surge)	Pomik [mm] Hitrost [m/s] Pospešek [m/s <sup>2</sup> ]	+620/-500 0,79 0,6
(Y) Prečno na let letala (ang. sway)	Gib [mm] Hitrost [m/s] Pospešek [m/s <sup>2</sup> ]	±500 0,81 0,6
(Z) Vertikalna smer (ang. vertical)	Gib [mm] Hitrost [m/s] Pospešek [m/s <sup>2</sup> ]	+370/-380 0,55 0,9
Nagib (ang. roll)	Nagib [°] Hitrost [°/s] Pospešek [°/s <sup>2</sup> ]	±24 34,3 200
Naklon (ang. pitch)	Naklon [°] Hitrost [°/s] Pospešek [°/s <sup>2</sup> ]	+28/-25 37,4 200
Zasuk (ang. yaw)	Zasuk [°] Hitrost [°/s] Pospešek [°/s <sup>2</sup> ]	±27 41,3 400



**Slika 5 :** Električna simulacijska ploščad eMotion-2700 (2600 mm x 2300 mm x 1280 mm) [6]

**Preglednica 3 :** Tehnične specifikacije simulacijske ploščadi eMotion-2700 [6]

Model	eMotion-2700
Največja obremenitev na ploščadi [kg]	2700
Dolžina [mm]	2600
Širina [mm]	2300
Višina (ko je ploščad v začetni legi) [mm]	1280

Na trgu je mogoče najti tudi zelo majhne simulacijske ploščadi.

Med najmanjšimi na trgu je električna simulacijska ploščad M-811 (*slika 6*), katere masa je le 2,2 kg. Ločljivost pozicioniranja je 40 nm, ostale tehnične specifikacije pa so prikazane v *preglednici 5* in v *preglednici 6*. Uporablja se v biotehnologiji, polprevodniški tehnologiji, za mikroobdelavo, mikromanipulacijo, meritve, upravljanje orodja itd.



**Slika 6 :** Manjša električna simulacijska ploščad M-811 (136 mm x 136 mm x 114,3 mm) [7]

**Preglednica 5 :** Tehnične specifikacije simulacijske ploščadi M-811 [7]

Model	M-811
Največja obremenitev na ploščadi [kg]	5
Dolžina [mm]	136
Širina [mm]	136
Višina (ko je ploščad v začetni legi) [mm]	114,3

**Preglednica 6 :** Pomiki, nagibi, nakloni in zasuki simulacijske ploščadi M-811 [7]

(X) V smeri leta letala (ang. surge)	Pomik [mm]	±17
	Hitrost [m/s]	0,01
	Pospešek [m/s <sup>2</sup> ]	/
(Y) Prečno na let letala (ang. sway)	Gib [mm]	±16
	Hitrost [m/s]	0,01
	Pospešek [m/s <sup>2</sup> ]	/
(Z) Vertikalna smer (ang. vertical)	Gib [mm]	±6,5
	Hitrost [m/s]	0,01
	Pospešek [m/s <sup>2</sup> ]	/
Nagib (ang. roll)	Nagib [°]	±10
	Hitrost [°/s]	14,32
	Pospešek [°/s <sup>2</sup> ]	/
Naklon (ang. pitch)	Naklon [°]	±10
	Hitrost [°/s]	14,32
	Pospešek [°/s <sup>2</sup> ]	/
Zasuk (ang. yaw)	Zasuk [°]	±21
	Hitrost [°/s]	14,32
	Pospešek [°/s <sup>2</sup> ]	/

**Preglednica 7 :** Tehnične specifikacije hidravlične simulacijske ploščadi 353.50 [8]

Model	353.50
Največja obremenitev na ploščadi [kg]	3000
Dolžina [mm]	2500
Širina [mm]	2500
Višina (ko je ploščad v začetni legi) [mm]	/

**Preglednica 8 :** Pomiki, nagibi, nakloni in zasuki simulacijske ploščadi 353.50 [8]

(X) V smeri leta letala (ang. surge)	Pomik [mm]	±200
	Hitrost [m/s]	1,74
	Pospešek [m/s <sup>2</sup> ]	7,5/maks 6,0
(Y) Prečno na let letala (ang. sway)	Gib [mm]	±170
	Hitrost [m/s]	1,8
	Pospešek [m/s <sup>2</sup> ]	8,5/maks 5,5
(Z) Vertikalna smer (ang. vertical)	Gib [mm]	±164
	Hitrost [m/s]	2,18
	Pospešek [m/s <sup>2</sup> ]	16,0/maks 9,5
Nagib (ang. roll)	Nagib [°]	±10
	Hitrost [°/s]	110
	Pospešek [°/s <sup>2</sup> ]	/
Naklon (ang. pitch)	Naklon [°]	±10
	Hitrost [°/s]	110
	Pospešek [°/s <sup>2</sup> ]	/
Zasuk (ang. yaw)	Zasuk [°]	±8,4
	Hitrost [°/s]	90
	Pospešek [°/s <sup>2</sup> ]	/

Naslednji simulacijski ploščadi sta hidravlični. Gre za ploščad 353.50 (slika 7), ki ima največjo obremenitev na ploščadi 3000 kg in katere specifikacije so prikazane v preglednici 7 in preglednici 8, ter za ploščad 354.20 (slika 8), ki ima največjo obremenitev 2000 kg, specifikacije pa so prikazane v preglednici 9 in preglednici 10.



**Slika 7 :** Hidravlična simulacijska ploščad 353.50 (tloris 2500 mm x 2500 mm) [8]

Natančno in ponovljivo testiranje vibracij zagotavlja podatke, ki jih potrebujejo avtomobilski, vesoljski in drugi inženirji za ustvarjanje varnejših, zanesljivejših in udobnejših vozil in struktur. Večosno simuliranje vibracij privede do realnih oz. tudi do nerealnih pogojev. Simulacijska ploščad se lahko uporablja za testiranje ogrodja avtomobila, armaturnih plošč, rezervoarjev za gorivo, nosilcev motorjev, izpušnih sistemov, sedežev itd.



**Slika 8 :** Hidravlična simulacijska ploščad 354.20 (tloris 2200 mm x 2200 mm) [8]

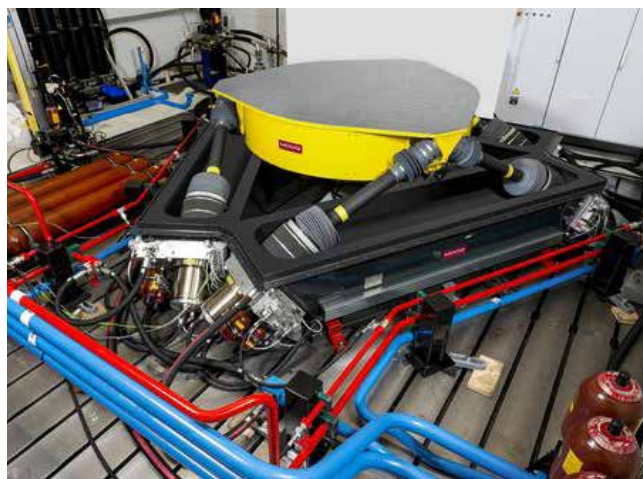
**Preglednica 9 :** Tehnične specifikacije hidravlične simulacijske ploščadi 354.20 [8]

Model	354.20
Največja obremenitev na ploščadi [kg]	2000
Dolžina [mm]	2200
Širina [mm]	2200
Višina (ko je ploščad v začetni legi) [mm]	/

**Preglednica 10 :** Pomiki, nagibi, nakloni in zasuki simulacijske ploščadi 354.20 [8]

(X) V smeri leta letala (ang. surge)	Pomik [mm] Hitrost [m/s] Pospešek [m/s <sup>2</sup> ]	±125 1,35 12,8/maks 4,8
(Y) Prečno na let letala (ang. sway)	Gib [mm] Hitrost [m/s] Pospešek [m/s <sup>2</sup> ]	±110 1,3 11,6/maks 4,2
(Z) Vertikalna smer (ang. vertical)	Gib [mm] Hitrost [m/s] Pospešek [m/s <sup>2</sup> ]	±140 1,7 15,9/maks 6,0
Nagib (ang. roll)	Nagib [°] Hitrost [°/s] Pospešek [°/s <sup>2</sup> ]	±9 70 /
Naklon (ang. pitch)	Naklon [°] Hitrost [°/s] Pospešek [°/s <sup>2</sup> ]	±8 70 /
Zasuk (ang. yaw)	Zasuk [°] Hitrost [°/s] Pospešek [°/s <sup>2</sup> ]	±6 50 /

V nadaljevanju bomo predstavili še visokofrekvenčno hidravlično simulacijsko ploščad (ang. High Frequency Simulation Table) (slika 9), za katero so tehnične specifikacije podane v preglednici 11 in preglednici 12.



**Slika 9 :** Hidravlična simulacijska ploščad High Frequency Simulation Table (4167 mm x 3762 mm x 1586,9 mm) [9]

**Preglednica 11 :** Tehnične specifikacije hidravlične simulacijske ploščadi High Frequency Simulation Table [9]

Model	High Frequency Simulation Table
Največja obremenitev na ploščadi [kg]	600, (masa mize = 742 kg, skupaj = 1342 kg)
Dolžina [mm]	4167
Širina [mm]	3762
Višina (ko je ploščad v začetni legi) [mm]	1586,9

**Preglednica 12 :** Pomiki, nagibi, nakloni in zasuki hidravlične simulacijske ploščadi High Frequency Simulation Table [9]

(X) V smeri leta letala (ang. surge)	Pomik [mm] Hitrost [m/s] Pospešek [m/s <sup>2</sup> ]	±118 1,405 0,08
(Y) Prečno na let letala (ang. sway)	Gib [mm] Hitrost [m/s] Pospešek [m/s <sup>2</sup> ]	±103 1,218 0,064
(Z) Vertikalna smer (ang. vertical)	Gib [mm] Hitrost [m/s] Pospešek [m/s <sup>2</sup> ]	+163/-140 1,753 +0,109, -0,089
Nagib (ang. roll)	Nagib [°] Hitrost [°/s] Pospešek [°/s <sup>2</sup> ]	±7,6 95,6 4000
Naklon (ang. pitch)	Naklon [°] Hitrost [°/s] Pospešek [°/s <sup>2</sup> ]	+7,2/-8,4 88,9 +4000, -5000
Zasuk (ang. yaw)	Zasuk [°] Hitrost [°/s] Pospešek [°/s <sup>2</sup> ]	±5,3 62,5 8900

## 4 Povzetek pregleda trga

Po pregledu trga smo ugotovili, da je mogoče dobiti različne simulacijske ploščadi, od najmanjših, ki imajo pomike nekaj milimetrov in nosilnosti nekaj kilogramov, pa vse do ploščadi, ki imajo pomike nekaj sto milimetrov in nosilnosti več tisoč kilogramov. Kot smo zapisali, se ploščadi uporabljajo za različne namene - od simulacij okoljskih učinkov, vožnje vozil, plovil, vlakov, za pozicioniranje satelitov, teleskopov in anten, v vesoljski industriji, v obdelovalni industriji, meritvah, skeniranju, letalstvu itd. Čedalje več pa se podobne simulacijske ploščadi uporabljajo v zabavni, filmski, igralniški in podobni industriji. Tu lahko zasledimo ploščadi, ki omogočajo simulacijo v dveh prostostnih stopnjah, cene pa se gibljejo že od nekaj tisoč evrov navzgor, vse do simulacijskih ploščadi, ki omogočajo simulacijo v šestih prostostnih stopnjah, cene pa se gibljejo od nekaj deset tisoč evrov navzgor.

Ugotavljamo, da trenutna ponudba na trgu ne pokriva zelenih visokodinamičnih simulacij, pomiki obstoječih pomičnih ploščadi so premajhni za realno simulacijo letenja. Naš namen je torej zasnovati večjo hidravlično ploščad, ki bi omogočala visokodinamično simulacijo in pomike batnic hidravličnih valjev vsaj 500 mm.

## 5 Konstrukcijska zasnova ploščadi

Pri snovanju Stewartove ploščadi smo izhajali iz znanja, ki smo ga pridobili pri izdelavi prototipa hidravlične Stewartove ploščadi [10, 11], zelenih vhodnih parametrov, tj. nosilnost ploščadi 2500 kg, ter pomikov aktuatorjev vsaj 500 mm in tlorisnih gabaritnih mer (2700 x 2700 mm). Zasnovali smo ploščad (slika 10), ki je kombinacija tipa 6-6 in 3-3, ker je bolj podobna tipu ploščadi 3-3, vendar ima tako na nepomični kot tudi na pomični ploščadi šest vpetij.



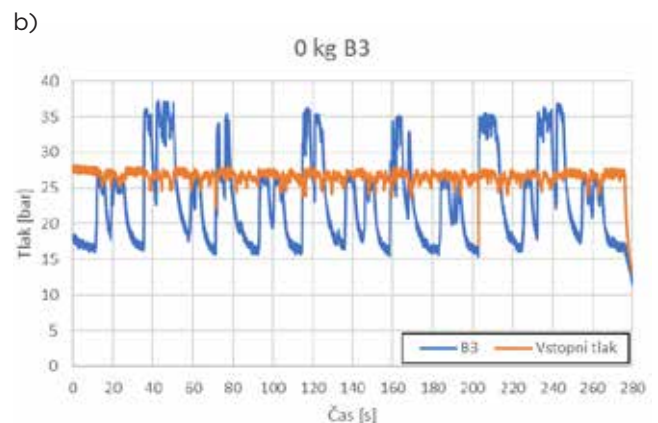
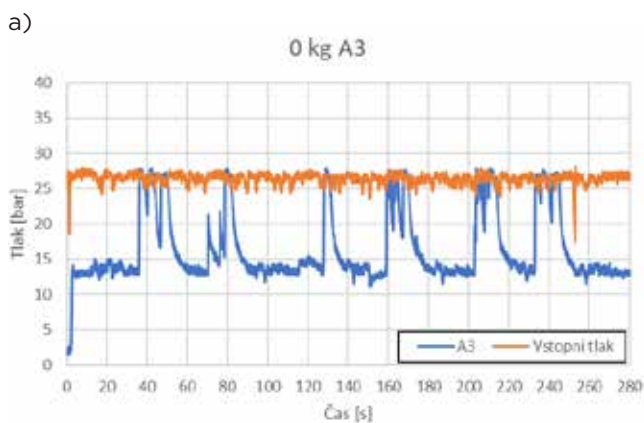
**Slika 10** : Stewartova ploščad s prikazano letalsko kabino (4220 mm x 2815 mm x 3735 mm)

## 6 Eksperimentalni del

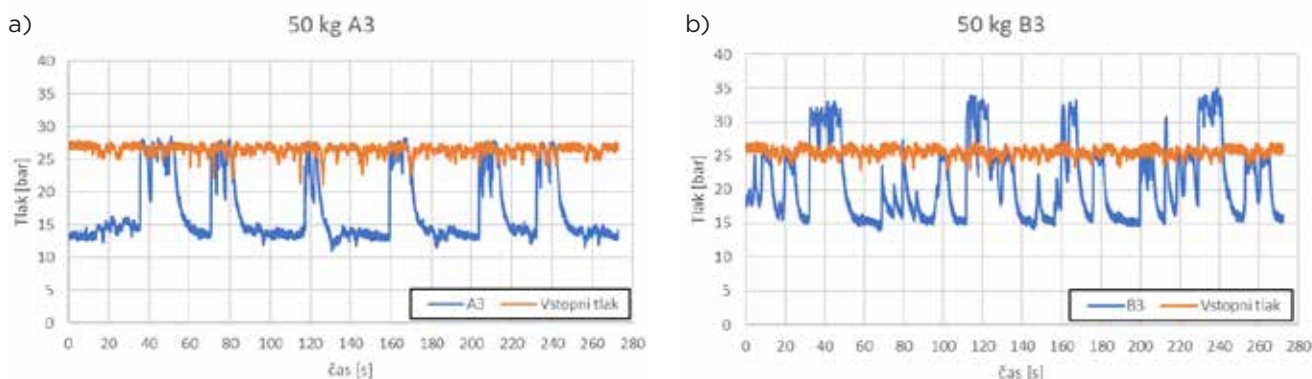
Meritve med simulacijo poenostavljenega šolskega kroga smo izvedli na manjši prototipni Stewartovi ploščadi [10, 11], ki je prikazana na sliki 11. Opravili smo meritve pri neobremenjeni ploščadi in povečevali obremenitev po 10 kg do maksimalne obremenitve 50 kg. Na sliki 12 so prikazani rezultati meritev vstopnega tlaka ter tlaka na vodu A (a) in B (b) v odvisnosti od časa pri neobremenjeni ploščadi, slika 13 pa prikazuje rezultate vstopnega tlaka ter tlaka na vodu A (a) in B (b) v odvisnosti od časa pri obremenitvi 50 kg.



**Slika 11** : Obstoječa manjša prototipna hidravlična Stewartova ploščad (685 mm x 844 mm x 1505 mm) [10, 11]



**Slika 12** : Rezultati meritve vstopnega tlaka in tlaka na vodu A (a) in B (b) ventila 3 pri simulaciji šolskega kroga pri neobremenjeni ploščadi



**Slika 13** : Rezultati meritve vstopnega tlaka ter tlaka na vodu A (a) in B (b) ventila 3 pri simulaciji šolskega kroga pri obremenitvi 50 kg

## 7 Zaključki

V okviru predstavljenega projekta je prikazana zasnova večje hidravlične Stewartove ploščadi, na katero bi lahko postavili kabino ter izvajali različne simulacije – od vožnje avtomobila, valovanja, letenja itd. Namen zasnove večje ploščadi je, da bi jo v prihodnosti izdelali in nanjo postavili letalsko kabino. Izvajali bomo različne simulacije in meritve ter jo izboljševali, da bo konkurenčna obstoječim ploščadim na trgu. V delu smo:

- ▶ podrobno pregledali stanje tehnike večprostorskih simulacijskih ploščadi;
- ▶ zapisali matematično ozadje problema za izračun i-te noge – aktuatorja;
- ▶ izvedli preračun hidravličnih parametrov, potrebnih za snovanje večje ploščadi in izbiro hidravličnih sestavin;
- ▶ zasnovali večjo hidravlično ploščad na podlagi izvedenih preračunov, zasnovali hidravlično shemo večje simulacijske ploščadi in izbrali nekaj primerov servoventilov ter črpalk, ki bi jih lahko uporabili pri dejanski izdelavi;
- ▶ postavili enostaven simulacijski model in naredili nekaj numeričnih izračunov;
- ▶ izdelali program za poenostavljen levi in desni šolski krog ter med simulacijo izvedli meritve hidravličnih parametrov pri neobremenjeni ploščadi ter obremenitev povečevali do 50 kg s korakom po 10 kg.

Glavni prispevek tega dela je zasnova večje hidravlične Stewartove ploščadi, ki bo v prihodnosti omogočala njeno izdelavo. Postavljen je bil simulacijski model, ki bo osnova za nadaljnje delo in razvoj krmiljenja.

Iščemo investitorja za projekt izdelave večje simulacijske hidravlične ploščadi nosilnosti 2,5 t.

## Literatura

- [1] R. Aharrah, "Flight simulation, past, present, and future," in 2nd Annual Meeting, 1965, pp. 371–386. doi: 10.2514/6.1965-480.
- [2] D. Stewart, "A Platform with Six Degrees of Freedom," Proc. Inst. Mech. Eng., vol. 180, no. 1, pp. 371–386, Jun. 1965, doi: 10.1243/PIME\_PROC\_1965\_180\_029\_02.
- [3] B. Dasgupta and T. S. Mruthyunjaya, "The Stewart platform manipulator: a review," Mech. Mach. Theory, vol. 35, no. 1, 2000, doi: 10.1016/S0094-114X(99)00006-3.
- [4] Bu F. and Yao B., "Observer based coordinated adaptive robust control of robot manipulators driven by single-rod hydraulic actuators," in Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065), vol. 3, pp. 3034–3039. doi: 10.1109/ROBOT.2000.846488.
- [5] SystemsMotion, "Motion Platforms." 2022. [Online]. Available: <https://motionsystems.eu/>
- [6] Bosch Group BV, "Electric 6DOF Motion system eMotion-2700." 2020.
- [7] Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, "M-811 Vacuum-Compatible Miniature Hexapod 6-Axis Positioner." 2011.
- [8] MTS Systems, "MASTTM (Multi-axial Simulation Table) Systems." 2021.
- [9] I. Moog, "Hydraulic Simulation Tables." 2018.
- [10] J. Pustavrh, "Snovanje hidravličnega sistema prototipa Stewartove ploščadi," Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, 2020.
- [11] J. Pustavrh, A. Peperko and F. Majdič, "Razvoj in raziskave prototipa Stewartove ploščadi," Ventil, vol. letnik 26, pp. 264–271.

## Development of the hydraulic system of the Stewart platform

### Abstract:

The Stewart platform allows simulation in six degrees of freedom. It consists of two irregular hexagons connected by six actuators - hydraulic cylinders. The controlled simultaneous retraction or extraction of the piston rods from the tubes of the hydraulic cylinders changes the length of each leg, achieving the movement of the upper moving platform, which is described using a mathematical background. The dimensioning of the hydraulic system was the basis for the design of a larger hydraulic platform with a load capacity of 2500 kg. On the existing smaller prototype of a hydraulic Stewart platform, we performed a mathematical calculation of the pilot-school circuit, created a simulation program and made measurements of the hydraulic parameters.

### Keywords:

degrees of freedom, Stewart platform, design, hydraulics, control, measurements

### LABORATORIJ ZA FLUIDNO TEHNIKO

Smo laboratorij z dolgoletno tradicijo na področju fluidne tehnike. Ukvarjamo se z oljno in tudi ekološko prijazno vodno pogonsko-krmilno hidravliko, pri tem pa uporabljamo sofisticirano in sodobno merilno in programsko opremo.

Obrnite se na nas, če potrebujete:

- razvoj in optimiranje hidravličnih komponent in naprav,
- izdelavo hidravličnih naprav,
- izboljšave in popravila hidravličnih strojev in naprav,
- izdelavo sodobnega krmilja za hidravlične stroje,
- industrijsko izobraževanje na področju fluidne tehnike,
- ekološke hidravlične naprave na pitno vodo,
- nudimo visokotlačne trajnostne teste,
- nudimo testiranje hidravličnih filtrov ter izdelavo sodobne filtrirne naprave, ...



Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za strojništvo  
**Laboratorij za fluidno tehniko**  
Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana  
T: 01/4771115, 01/4771411  
E: [lft@fs.uni-lj.si](mailto:lft@fs.uni-lj.si)  
<http://lab.fs.uni-lj.si/lft/>



# S3C



Hvala da ste postali in ostali  
naš partner. Sodelovanje z vami  
nam je v veselje in izziv, zato  
upamo, da tudi v prihodnje  
skupaj zmagujemo.

Srečno in uspehov polno  
novo leto 2023.

[www.stric.si](http://www.stric.si)

RS35220