

RAZVOJ IN RAZISKAVE PROTOTIPA STEWARTOVE PLOŠČADI

Jan Pustavrh, Aljoša Peperko, Franc Majdič

Izvleček:

V Laboratoriju za fluidno tehniko (LFT) smo najprej izdelali miniaturni model Stewartove ploščadi. Na podlagi te miniaturne električno gnane in krmiljene Stewartove ploščadi smo se odločili izdelati hidravlični prototip ploščadi tipa 6-6, ki omogoča simulacijo v šestih prostostnih stopnjah. Sestavljena je iz dveh nepravilnih šesterokotnikov in šestih aktuatorjev. V našem primeru smo uporabili hidravlične valje in hidravlični agregat ter elektrohidravlični krmilni sistem. Ploščad smo postavili na stojalo, na katero smo postavili vse sestavine, ki so potrebne za njeno delovanje. Najzahtevnejši del pri izvedbi projekta je bila izdelava krmilnega dela, saj se ves čas med delovanjem giblje vseh šest hidravličnih valjev.

Ključne besede:

Stewartova ploščad, 6 prostostnih stopenj, hidravlične sestavine, simulatorji

1 Uvod

Ker si brez tehnike ne moremo predstavljati življenja, človek ves čas teži k razvoju, da si olajša vsakdanjik. Najprej je kot prevozna sredstva uporabljal živali, konje, osle, vole itd. Ker je človek v zgodovini ves čas težil k izboljšanju in razvoju, je začel izdelovati različna prevozna sredstva na lastni pogon, med drugimi tudi sredstva za potovanje po zraku, kot npr. jadra, letala ipd.

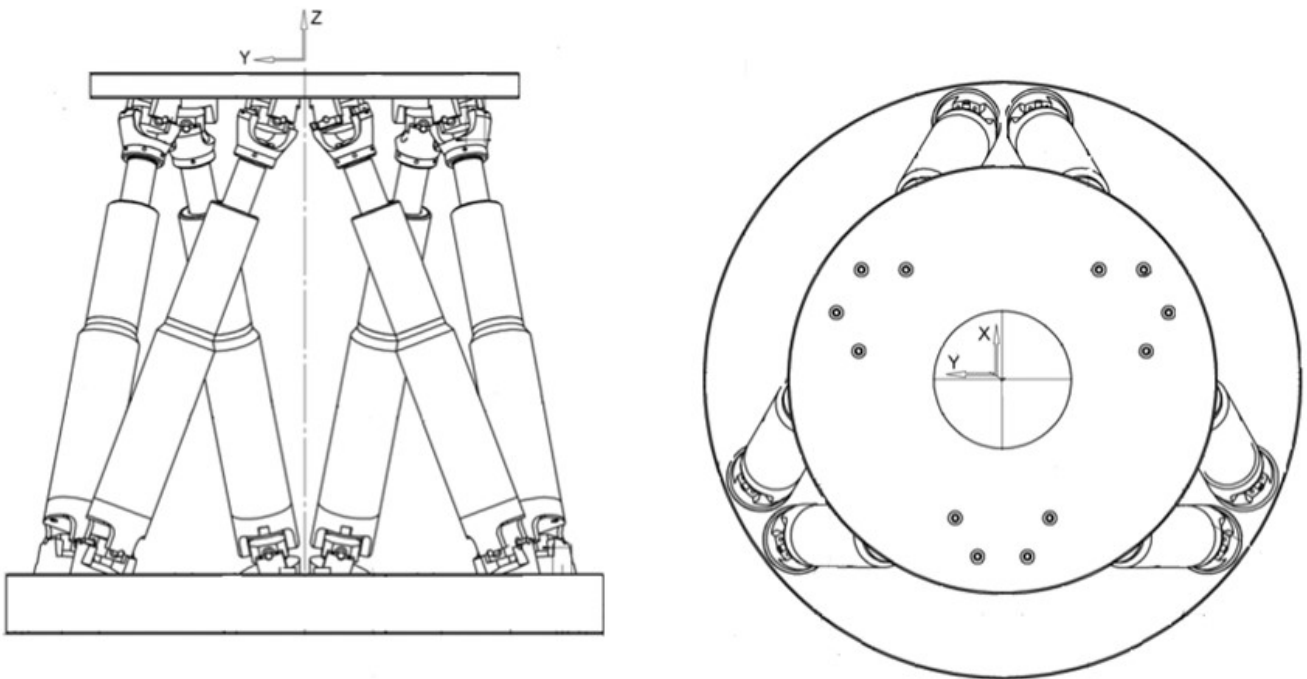
Zametki letalstva segajo že v prazgodovino s preprostimi projektili, razvoj letalstva pa se je zgodil šele v 20. stoletju. Prve leteče naprave so bili baloni na vroč zrak, ki so jih razvili več kot sto let pred letali. Leta 1900 je bil izdelan prvi zrakoplov, ki ga je izdelal Ferdinand von Zeppelin. Zrakoplov se je od balona razlikoval po tem, da je imel motor, ki ga je poganjal. Prvo jadralno letalo je leta 1891 izdelal Otto Lilenthal [1]. Leta 1903 je poletelo prvo letalo, ki ga je poganjal lastni pogon. Do največjega razvoja v letalstvu je prišlo med vojnam. Med 1. svetovno vojno je bilo izdelanih več kot 18.000 letal, prav tako pa se je zgodil velik napredek v letalstvu tudi med 2. svetovno vojno. Kasneje so izdelali tudi potniška letala. Za namene šolanja so tako že okoli leta 1910 zgradili prvi center za šolanje pilotov na tleh. V ta namen se uporablja Stewartova ploščad [2], ki omogoča simulacijo v šestih prostostnih stopnjah. Stewart je v svojem članku leta 1965 [2] opisal mehanizem s

šestimi prostostnimi stopnjami ter predlagal, da se uporablja kot simulator letenja za šolanje pilotov helikopterja. Čeprav tovrstne naprave običajno imenujejo Stewartova ploščad, je Stewartov predlagani mehanizem le drugačna konfiguracija sistema, ki ga je razvil že Gough [3] leta 1947. Gough je bil tudi eden izmed recenzentov Stewartovega članka, v svojem komentarju pa navaja, da je leta 1949 zasnoval podoben stroj za testiranje pnevmatik. Stroj je bil izdelan v letih 1954 in 1955. Stewartova ploščad se uporablja za različne namene, npr. za simulatorje letenja, kot ključna tehnologija nekaterih obdelovalnih strojev, za simulacije v kinodvoranah, pri simulacijah potresov, pri mehanskih bikih, v ortopedski kirurgiji, merilni tehniki ipd. Uporaba simulatorjev je vedno bolj povezana tudi z virtualnim svetom, saj se lahko tako še bolj približamo realnim pogojem.

2 Opis strukture

Stewartova ploščad (SP) (*slika 1*) omogoča simulacijo šestih prostostnih stopenj. V veliki meri se uporablja za šolanje pilotov ter dodatna usposabljanja. Zaradi hitre industrijske rasti in v želji po doživetju nemogočega se omenjene ploščadi danes uporabljajo tudi v zabaviščnih parkih, filmskem svetu, igrih ipd. SP je sestavljena iz pomicne ploščadi, ki je povezana s fiksno (nepomično) osnovno ploščadjo preko šestih nog – aktuatorjev (hidravličnih valjev). S spremembo dolžine nog (aktuatorjev) se omogoči gibanje zgornje premikajoče se ploščadi. Zaradi kompleksnejših položajev ploščadi oz. aktuatorjev je potrebno uporabiti univerzalne zglobe. Vsaka od šestih nog platforme je hidravlični valj (HV). Vsak HV je možno krmiliti ločeno, da se izvedejo zelene pozicije in pomiki.

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

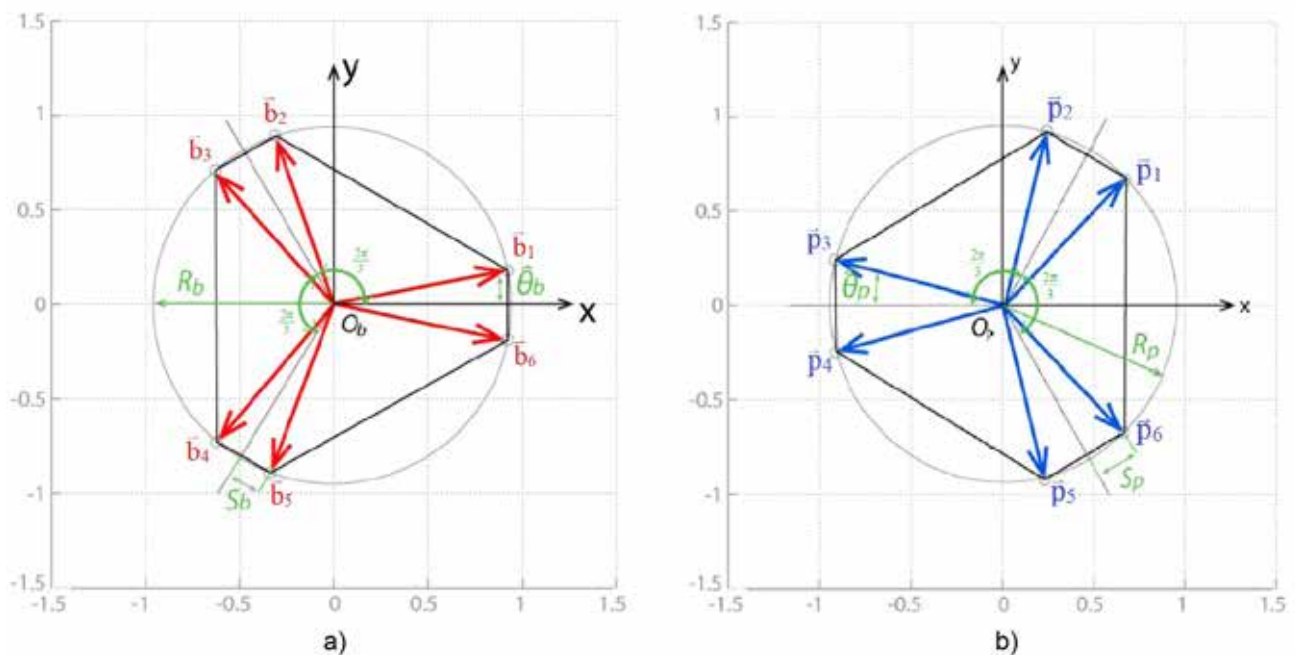


Slika 1 : Splošen model Stewartove ploščadi [4]

3 Matematično ozadje

Matematično ozadje delovanja Stewartove ploščadi je zelo zahtevno in pomembno pri njenem snovanju in krmiljenju. Pri zapisu matematičnega modela smo pregledali dostopno literaturo in si na koncu največ pomagali z znanstvenim člankom o šestprostostnih mehanizmih [5]. Končni rezultat pri matematičnem popisu delovanja Stewartove ploščadi je dolžina i -te noge, v našem primeru hidravličnega valja.

Za izračun dolžine i -te noge je potrebno vnaprej določiti nekaj podatkov, in sicer radij pomične in nepomične ploščadi, višino med koordinatnim sistemom na nepomični in pomični ploščadi ter kot med sosednjima vpetjema (θ) na nepomični in pomični ploščadi. Višino med fiksnim koordinatnim sistemom na nepomični in premikajočim se koordinatnim sistemom na pomični ploščadi zapišemo v vektorski obliki z enačbo (1). Koordinatam X in Y lahko prištevamo ali odštevamo ΔX oz. ΔY , medtem



Slika 2 : a) Nepomična ploščad s koordinatnim sistemom O_b , šestimi vpetji \vec{b}_i ($i = 1, \dots, 6$) ter kotom med sosednjima vpetjema θ_b , b) pomična ploščad s koordinatnim sistemom O_p , šestimi vpetji \vec{p}_i ($i = 1, \dots, 6$) ter kotom med sosednjima vpetjema θ_p [5]

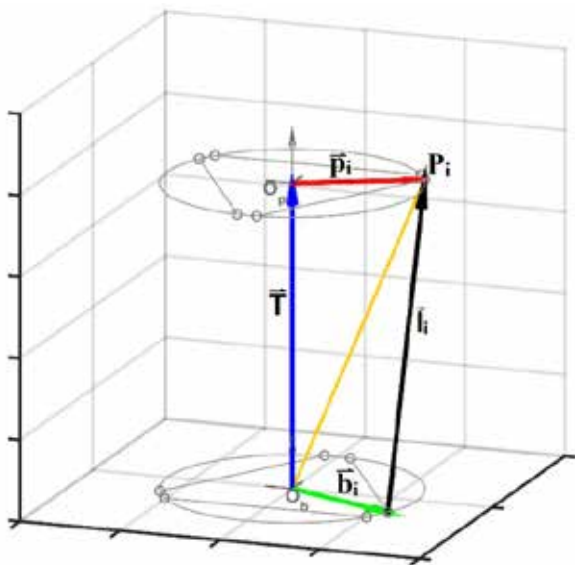
ko koordinati Z le prištevamo ΔZ . Vektorsko zapišemo vpetja (\vec{b}_i ($i = 1, \dots, 6$)) na nepomični ploščadi (slika 2a) glede na koordinatni sistem na nepomični ploščadi ter vpetja (\vec{p}_i ($i = 1, \dots, 6$)) na pomični ploščadi (slika 2b) glede na koordinatni sistem na pomični ploščadi. Rotacijska matrika po enačbi (2) predstavlja zelo pomemben del pri izračunu dolžine nog.

$$\vec{T} = \begin{bmatrix} X \pm \Delta X \\ Y \pm \Delta Y \\ Z + \Delta Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R_p^B = \begin{bmatrix} C\gamma C\beta & -S\gamma C\alpha + C\gamma S\beta S\alpha & S\gamma S\alpha + C\gamma S\beta C\alpha \\ S\gamma C\beta & C\gamma C\alpha + S\gamma S\beta S\alpha & -C\gamma S\alpha + S\gamma S\beta C\alpha \\ -S\beta & C\beta S\alpha & C\beta C\alpha \end{bmatrix} \quad (2)$$

Pri tem S predstavlja kotno funkcijo sinus in C kotno funkcijo kosinus, koti α , β in γ predstavljajo nagib okoli vzdolžne osi (ang. roll), nagib okoli prečne osi (ang. pitch) in zasuk okoli navpične osi letala (ang. yaw). Vektor, ki določa i-to nogo, izračunamo z enačbo (3). Vse potrebne veličine za izračun vektorja, ki določa i-to nogo, so prikazane na sliki 3.

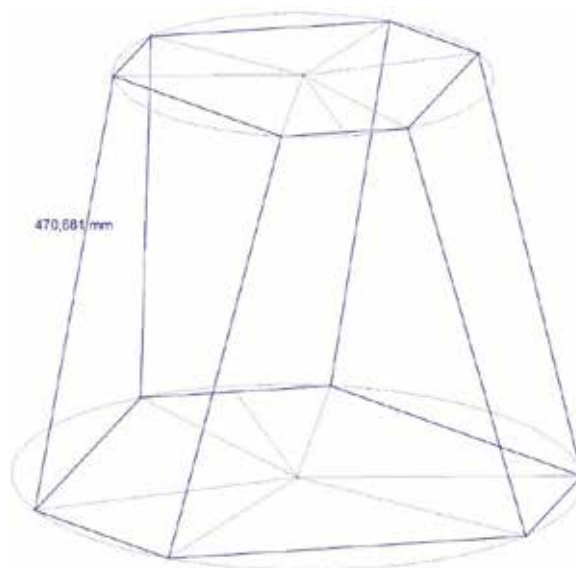
$$l_i = \vec{T} + R_p^B \cdot \vec{p}_i - \vec{b}_i \quad (3)$$



Slika 3 : Potrebne veličine za izračun dolžine i-te noge [5]

Dejanski prikaz preračuna dolžine i-te noge

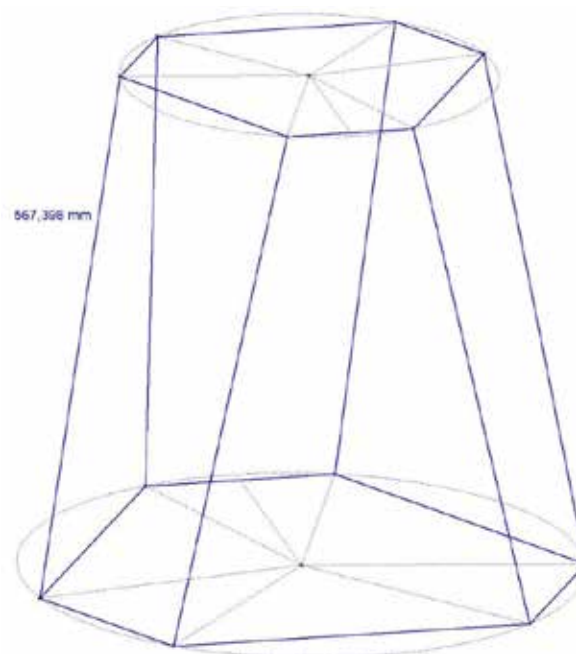
Prikazali bomo preračun dolžine i-te noge pri izvedbi delovnega giba vseh šestih hidravličnih valjev, to pomeni, da bodo dolžine vseh šestih hidravličnih valjev enake. Pri preračunu je potrebno uporabiti enačbo (3), v kateri \vec{T} , predstavlja krajevni vektor z izhodiščem v koordinatnem sistemu na nepomični ploščadi ter koncem v koordinatnem sistemu na pomični ploščadi, R_p^B je rotacijska matrika (2), \vec{p}_i predstavlja krajevni vektor vpetja na pomični



Slika 4 : Prikaz dolžine i-te noge na Stewartovi ploščadi v začetni legi (paličje)

ploščadi glede na koordinatni sistem na nepomični ploščadi in \vec{b}_i predstavlja krajevni vektor vpetja na nepomični ploščadi glede na koordinatni sistem na nepomični ploščadi. V enačbo (3) vstavimo vse predhodno našteje veličine ter dobimo dolžino i-te noge za Stewartovo ploščad, ko so hidravlični valji v začetni legi, kar je prikazano z enačbo (4).

$$l_1 = \begin{bmatrix} 0 \pm \Delta X \\ 0 \pm \Delta Y \\ 0 + \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 281,908 \\ 102,606 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -52,094 \\ 295,442 \\ 0 \end{bmatrix} = 470,681 \text{ mm} \quad (4)$$



Slika 5 : Prikaz dolžine i-te noge na Stewartovi ploščadi v končni legi (paličje)

Na *sliki 4* je prikazana dolžina i -te noge v začetni legi. Kot lahko vidimo s slike, je preračun zelo natančen. Na modelu v modelirniku je odstopanje nekaj manj kot 2 mm.

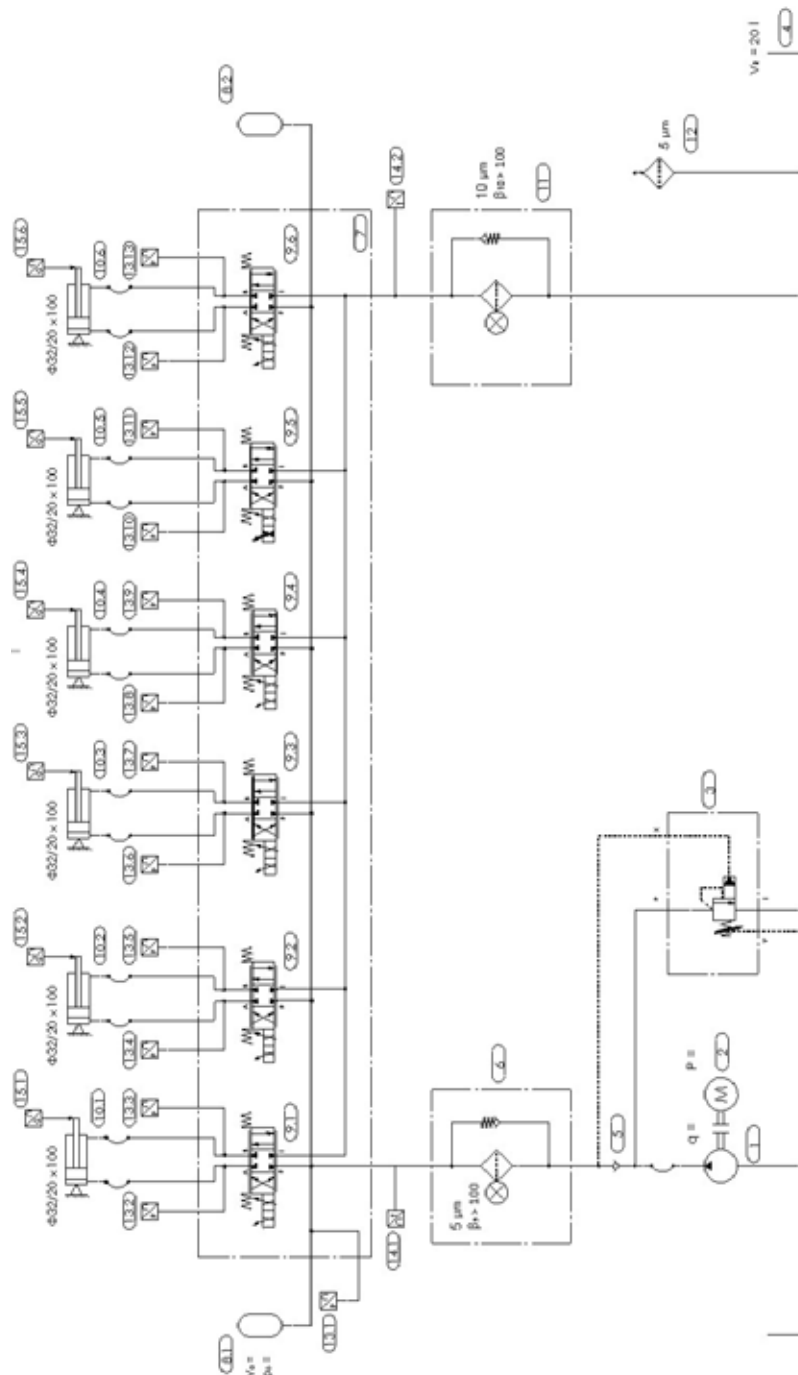
Po opravljenem delovnem gibu je potrebno vektorju \vec{T} prišteti koordinato ΔZ , ki je v našem primeru 100, saj hidravlični valji omogočajo 100 mm delovnega giba. Preračun in rezultat po opravljenem delovnem gibu sta prikazana z enačbo (5).

$$l_1 = \begin{bmatrix} 0 \pm \Delta X \\ 0 \pm \Delta Y \\ 0 + 100 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 281,908 \\ 102,606 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -52,094 \\ 295,442 \\ 0 \end{bmatrix} = 567,398 \text{ mm} \quad (5)$$

Na *sliki 5* je prikazana dolžina i -te noge v končni legi. Kot lahko vidimo s slike, je preračun zelo natančen. Na modelu v modelirniku je odstopanje nekaj več kot 4 mm.

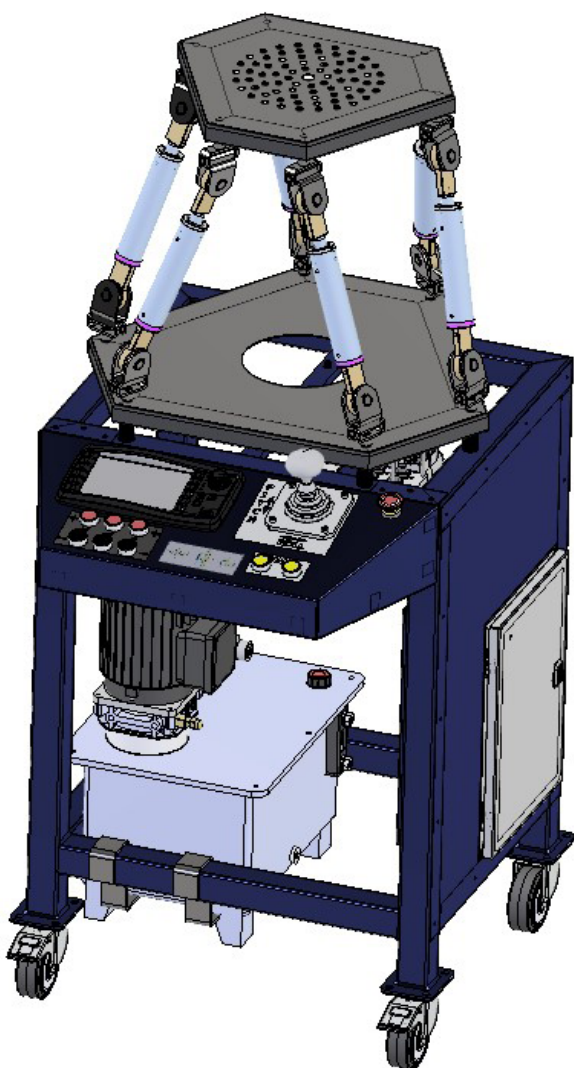
4 Zasnova ploščadi

Snovanja prototipa ploščadi smo se lotili z izhodiščnimi gabaritnimi merami in izbiro sestavin. Na podlagi izbranih sestavin smo izdelali hidravlično shemo (*slika 6*), ki je enostavna glede na kompleksnost sistema.



Slika 6 : Hidravlična shema prototipa Stewartove ploščadi

Hidravlično energijo Stewartove ploščadi (slika 6) ustvarja hidravlični agregat (16), ki ga v osnovi sestavlja hidravlična črpalka (1) s pretokom 11,4 l/min. Poganja jo 4 kW električni motor (2). Črpalka črpa hidravlično olje iz rezervoarja (4) s prostornino 25 l. Če Stewartova ploščad ne deluje oz. je v mirujočem stanju, hidravlični agregat pa vseeno deluje, se olje vrača v rezervoar (4) skozi varnostnorazbremenilni ventil (3). Pred dotokom olja do visokotlačnega filtra (6) imamo še protipovratni ventil (5), ki varuje črpalko pred hidravličnim udarom. Olje, ki teče skozi visokotlačni filter (6), nadaljuje svojo pot do hidravličnega bloka (7), na katerem imamo šest proporcionalnih potnih ventilov (9.1, 9.2, 9.3, 9.4, 9.5 in 9.6) ter dva hidravlična akumulatorja (8.1 in 8.2) kapacitete po 1,5 l, ki se najprej napolnita s hidravličnim oljem. Krmilni bati v proporcionalnih ventilih (9.1, 9.2, 9.3, 9.4, 9.5 in 9.6) se premaknejo iz svoje osnovne lege, ko proporcionalne elektromagnetne tuljave prejmejo električni signal iz PLC-krmilnika. S prejemom ukaza in premikom krmilnih batov proporcionalnih ventilov ti omogočijo gibe batnic hidravličnih valjev (10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5 in 10.6). Med vračanjem batnic hidravličnih valjev v



Slika 7 : Model celotnega sestava Stewartove ploščadi (685 x 617 x 1505 mm)



Slika 8 : Končan prototip hidravlične Stewartove ploščadi (685 x 844 x 1505 mm)

prvotno lego se olje vrača skozi hidravlični blok (7), na katerem so proporcionalni ventilski vložki (9.1, 9.2, 9.3, 9.4, 9.5 in 9.6), ter na koncu skozi nizkotlačni povratni hidravlični filter (11) do rezervoarja (4).

Nalivno odzračevalni filter (12) preprečuje vnos nečistoč oziroma delcev iz okolice preko odzračevanja v hidravlični sistem že na samem začetku in med delovanjem hidravlike. Za delovanje ter nadziranje smo v sistem vgradili tudi nekaj merilnikov. To so merilniki tlaka na dovodu olja iz rezervoarja (13.1) ter na vhodnih (A) oz. izhodnih (B) vodih hidravličnih valjev (13.2, 13.3, 13.4, 13.5, 13.6, 13.7, 13.8, 13.9, 13.10, 13.11, 13.12 in 13.13). Poleg tlaka bomo merili še vhodno in izhodno temperaturo olja (14.1, 14.2).

Model prototipa Stewartove ploščadi je prikazan na sliki 7.

Snovanja smo se lotili z izdelavo nepomične in pomične ploščadi, pri katerih je bilo potrebno upoštevati parametre, ki smo jih uporabili pri matematičnem preračunu. Zaradi možnosti doseganja

kompleksnejših položajev ploščadi smo zasnovali tudi univerzalni zglob.

Za prototip smo uporabili šest proporcionalnih ventilskih vložkov, ki smo jih privijačili v hidravlični blok, ki smo ga zasnovali sami. Izdelali smo tudi varnostno-razbremenilni blok, v katerega smo privijačili varnostno-razbremenilni ter protipovratni ventil. Zaradi lažjega transporta smo ploščad privijačili na stojalo, ki je na kolesčkih. Stojalo je zasnovano tako, da nosi vse sestavine, ki so potrebne za delovanje ploščadi.

Najtežji del pri realizaciji projekta je bila izdelava krmilnega dela. Krmilni del je zelo zahteven, saj se ves čas med delovanjem giblje vseh šest hidravličnih valjev, ki morajo delovati povezano. Ves čas med delovanjem pa je potrebno poznati tudi pozicije hidravličnih valjev, da lahko dosežemo zelene »manevre«. V ta namen smo v sistem vgradili šest vrvičnih enkoderjev. Piko na i smo sistemu dodali s panelom, na katerega smo vgradili krmilno ročico, nekaj tipk, stikalo za izklop v sili ter displej. Na zaslonu, vgrajenem na ploščad, lahko vidimo položaj vsakega hidravličnega valja, zaženemo hidravlični agregat, ga izključimo ter tudi krmilimo ploščad. *Slika 8* prikazuje fotografijo končanega prototipa Stewartove ploščadi.

5 Delovanje ploščadi

Kot smo že omenili, smo imeli veliko težav z izdelavo krmilnega dela. Sistem je zahteven, ker se med delovanjem ves čas giblje vseh šest hidravličnih valjev, ki z izvlačenjem ali z uvlačenjem batnic povzročajo gibanje zgornje premikajoče se ploščadi. Poleg giba-



Slika 9 : Hidravlični prototip Stewartove ploščadi (685 x 844 x 1600 mm)

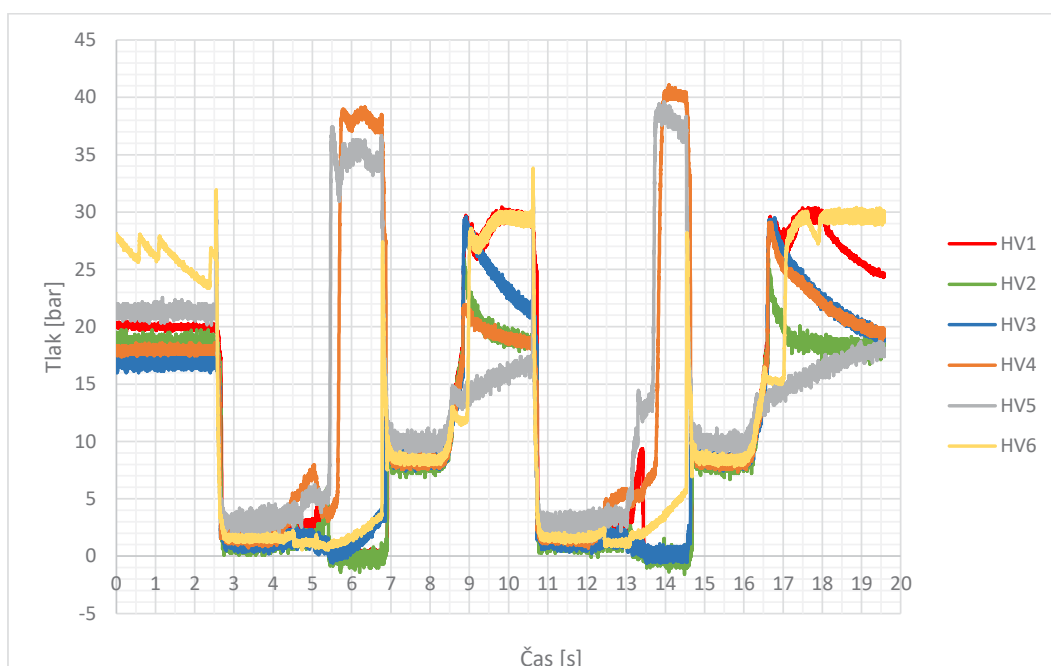
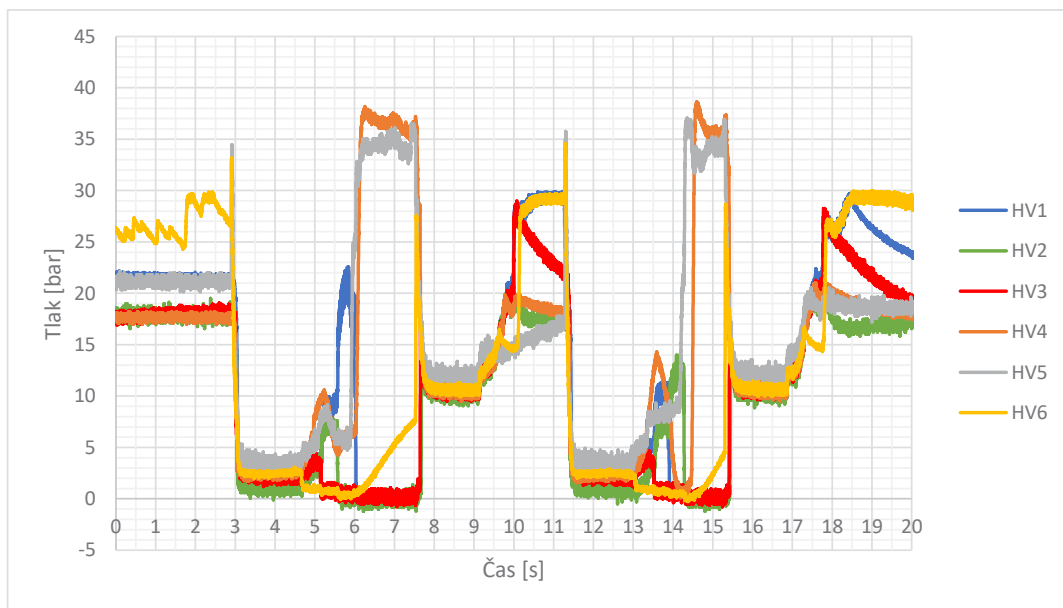
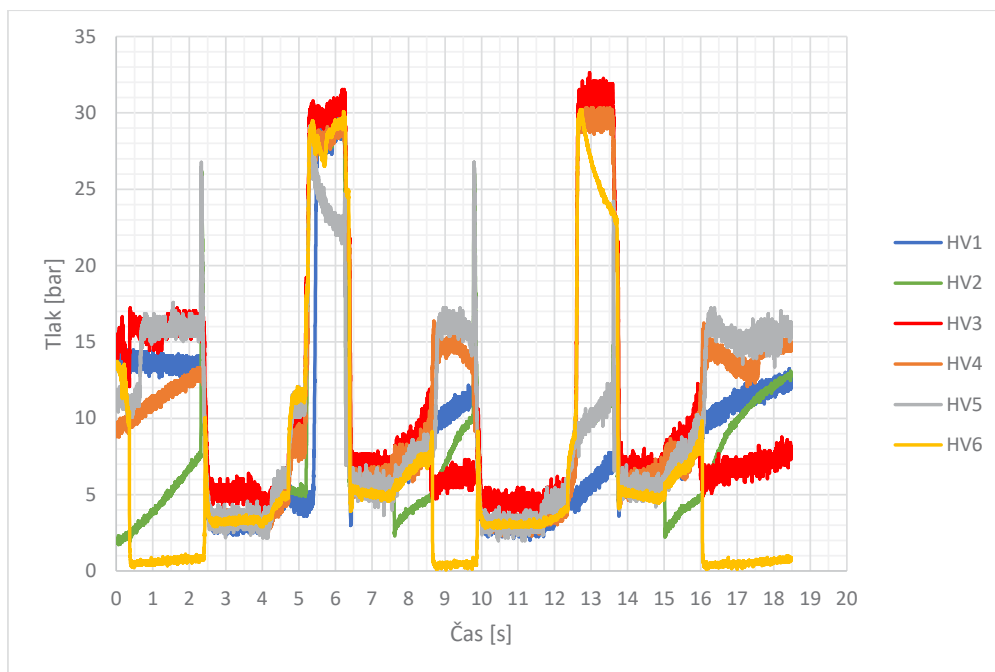


Figure 10 : Izmerjeni tlak v odvisnosti od časa pri delovnem gibu in obremenitvi 0 kg



Slika 11 : Izmerjeni tlak v odvisnosti od časa pri delovnem gibu in obremenitvi 20 kg



Slika 12 : Izmerjeni tlak v odvisnosti od časa pri povratnem gibu in obremenitvi 0 kg

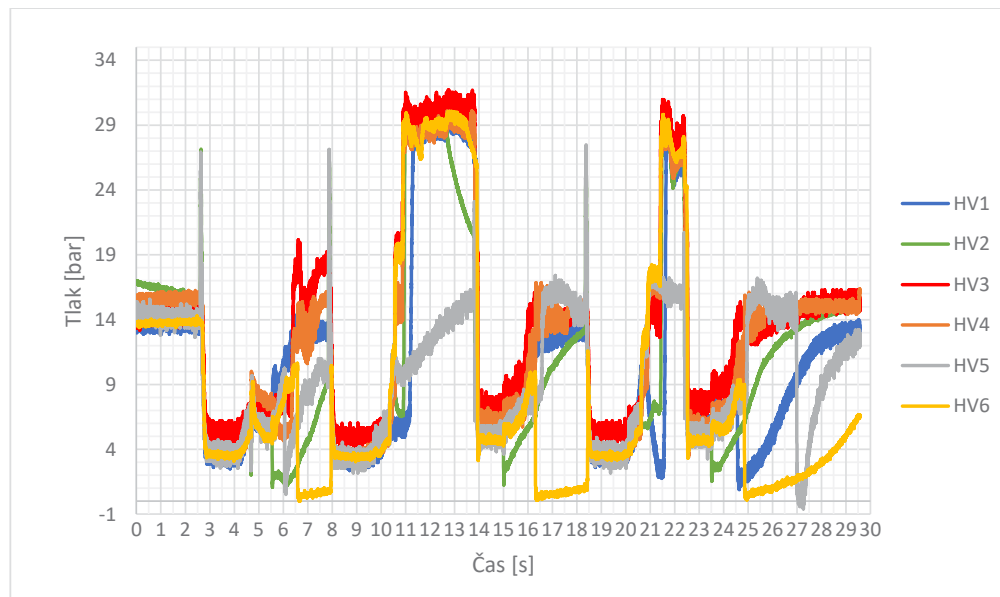
nja vseh valjev se je pojavil tudi problem usklajenosti gibov hidravličnih valjev.

Pri prvem zagonu Stewartove ploščadi (slika 9) smo morali paziti na nevarnost zvitja zgornje premikajoče se ploščadi, zato smo na začetku opravili nekaj premikov brez zgornje ploščadi, valji so bili vpeti le na nepomični ploščadi. Ker je sistem deloval pravilno, smo namestili premikajočo se ploščad ter preizkusili njeno delovanje. Glede na omenjene težave in številne pomisleke smo delo opravili odlično. Ploščad zaenkrat še ne deluje popolnoma usklajeno, vendar lahko z njo

prikažemo vse »manevre«, ki jih lahko opravi letalo.

6 Eksperimentalni del

Med delovanjem ploščadi smo opravili tudi nekaj začetnih meritev (slika 10, 11, 12 in 13), ki smo jih izvedli tako, da smo vseh šest batnic hidravličnih valjev istočasno izvlekli in uvlekli. Naredili smo meritve z neobremenjeno ploščadjo ter z obremenitvijo 10 kg in 20 kg. Z grafov je razvidno, da nismo uspeli doseči popolne usklajenosti delovanja hidravličnih



Slika 13 : Izmerjen tlak v odvisnosti od časa pri povratnem gibu in obremenitvi 20 kg

valjev, vendar smo dosegli cilj, da smo zagnali prototipno ploščad ter opravili gibe ploščadi.

7 Zaključek

Želja po izdelavi »industrijske« ploščadi se je rodila iz želje po simuliranju na področju letalstva in pridobivanju novih izkušenj na področju nam še neznanega. Cilj je bil izdelati delujočo Stewartovo ploščad, na kateri se bo v prihodnosti lahko izobraževalo, raziskovalo in izpopolnjevalo ... Zastavljeni cilj je bil dosežen nad pričakovanji. Stewartova ploščad je izdelana in potrjeno je njeno delovanje. V prihodnosti si želimo izdelati večjo ploščad, na katero bi bilo mogoče postaviti kabino manjšega letala ter izpopolniti znanje na področju večprostostnih simulatorjev. Vabimo vse zainteresirane, ki bi potrebovali tako ploščad.

Viri

- [1] O. Lilenthal. Encyclopedia Britannica. Dostopno na: <https://www.britannica.com/biography/Otto-Lilienthal>, ogled 30. 4. 2020.
- [2] D. Stewart, A platform with six degrees of freedom, v: Proceedings of the IMechE, vol. 180, Pt. 1, No. 15, 1965–1966, str. 371–385.
- [3] V. E. Gough, Discussion in London: automobile stability, control, and tyre performance, v: Proceedings of the IMechE's Automobile Division, 1956, str. 392–394.
- [4] Z. Bingul, O. Karahan: Dynamic modeling and simulation of Stewart platform. Mechatronics Engineering, Kocaeli University, Turkey, 2012.
- [5] R. M. L. Garcia, V. T. Valente, M. R. Sobczyk, E. A. Perondi: Control of an electrohydraulic stewart platform manipulator as vessels motion simulator. Florianópolis, SC, Brazil, 2016.

Development and research of the prototype of the Stewart platform

Abstract:

Simulations of human emotions under real conditions are very popular nowadays. A simulation of six degrees of freedom was made possible by the development of the Gough-Stewart platform in 1947. The electrically driven miniature Stewart platform was first produced in the Laboratory for fluid power and controls in 2019. Based on this experience, a hydraulic prototype of the Stewart platform with six degrees of freedom was produced. It consists of two irregular hexagon frames and six actuators. In this case six hydraulic cylinders, a hydraulic power unit and an electro-hydraulic control system were used. The platform was placed on a stand on which all components necessary for its operation were mounted. The most demanding part of the project was the production of the control part, as all six hydraulic cylinders are constantly moving during operation. After a prototype of the Stewart platform had been manufactured, a test run was carried out and the first measurements are presented in the article. In the future, in-depth research will be conducted on the reaction of differently loaded upper platforms to their dynamic control. It is also planned to build a larger hydraulic platform on which the cockpit of a smaller aircraft will be installed.

Keywords:

Stewart platform, 6 degrees of freedom, hydraulic components, simulators