

# Porazdeljeno vodenje časovno kritičnega sistema zračne levitacije preko industrijskega protokola PROFINET

Ana Kerbler<sup>1</sup>, Uroš Zajšek<sup>1</sup>, Boštjan Mlakar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko,  
Koroška cesta 46, 2000 Maribor, Slovenija

E-pošta: [ana.kerbler@student.um.si](mailto:ana.kerbler@student.um.si), [uros.zajsek@student.um.si](mailto:uros.zajsek@student.um.si), [bostjan.mlakar@student.um.si](mailto:bostjan.mlakar@student.um.si)

## Distributed management of the time critical air levitation system through the industrial protocol PROFINET

**Povzetek.** Članek predstavlja raziskovalni projekt porazdeljenega zaprto-zančnega vodenja sistema zračne levitacije. Sistem zračne levitacije sestavljajo vetrovnik ter dva krmilnika SIMATIC S7-1200, ki sta med seboj povezana z industrijskim protokolom PROFINET. Cilj raziskovalnega projekta je preučiti ali je s pomočjo porazdeljenega vodenja, preko industrijskega protokola, možno stabilizirati in voditi časovno kritični sistem zračne levitacije in projekt fizično implementirati. Porazdeljeno vodenje smo zasnovali na način, da prvi krmilnik vodi zračni tok vetrovnika. Drugi krmilnik, pa izvaja regulacijo v realnem času in je zadolžen za merjenje višine lebdečega objekta, komunikacijo s prvim krmilnikom ter ostalimi zunanjim napravim, ki so ključne za delovanje sistema. Na tak način smo dosegli popolnoma porazdeljeno vodenje, ki je praktično neodvisno od lokacije vodenja sistema ter obdelave ter zajemanja podatkov iz sistema. Model objekta vodenja ter zaprto-zančno strukturo smo verificirali s pomočjo programskega paketa MATLAB. Nastavljene parametre regulatorja ter izbrano strukturo vodenja smo implementirali preko TIA portala, s katerim smo programirali krmilnika SIMATIC S7-1200.

## 1 Uvod

Z razmahom novih računalniških in informacijskih tehnologij, tako na področju komunikacij, kakor tudi sistemov realnega časa, se v zadnjem času veča potreba po porazdeljenih sistemih, ki so med seboj povezani toda dislocirani [1]. Porazdeljeni sistemi ter porazdeljeno vodenje predstavljata nov trend v razvoju industrijskih sistemov ter aplikacij. Porazdeljeno vodenje je digitalni avtomatiziran nadzorni sistem, ki uporablja geografsko porazdeljene krmilne zanke, ki vodijo in nadzirajo proizvodnjo, stroje in management podjetja. Za razliko od centraliziranega sistema vodenja, kjer vsak proces, stroj ali naprava potrebuje svojo krmilno enoto [2], [3]. Centraliziran sistem vodenja se nanaša na zaprto-zančno strukturo vodenja, pri čemer samostojna enota nadzoruje vhodno in izhodne enote ter izvaja procesiranje v realnem času. Porazdeljeno vodenje nudi mnoge prednosti ter je učinkovitejše od

centraliziranega sistema, toda ima določene slabosti, katere so danes predmet mnogih raziskav ter inženirskega razvoja. Glavni problem takšnega sistema je zagotoviti zanesljivost komunikacijskih kanalov, ki morajo zagotavljati pravilne, varne in zanesljive ter pravočasne realno-časovne informacije v točno določenem časovnem intervalu. Problem je torej predvsem zagotoviti komunikacije z nizko zakasnitvijo (latenco), dovolj veliko bitno hitrostjo ter regulatorje (krmilnike), ki so sposobni voditi hitre dinamične, v osnovi nestabilne procese v realnem času.

Namen predstavljenega dela je raziskati porazdeljeno strukturo zaprto-zančnega vodenja časovno kritičnega sistema zračne levitacije. Sistem zračne levitacije je odprto-zančno nestabilni sistem, kar pomeni, da zaprto zančno vodenje mora zagotavljati vzbujanje sistema v natančno določenih časovnih intervalih. Vsaka nepredvidena zakasnitev preko komunikacijskega kanala ali sprememba časovnega intervala, oziroma časa odziva določenega podsistema lahko vodi v nestabilno delovanje celotnega sistema. Za naš sistem porazdeljenega vodenja, smo izbrali dva industrijska krmilnika SIMATIC S7-1200 ter komunikacijski protokol PROFINET. PROFINET je industrijski protokol, ki omogoča komunikacijo in prenos podatkov preko industrijskega Eterneta. Namenjen je za vodenje industrijskih sistemov in je primeren za časovno kritične sisteme s kritičnim časovnim oknom (zakasnitvijo, latenco) do 1 ms ali še manj.

Za zaprto-zančno vodenje sistema zračne levitacije smo najprej izpeljati matematični model objekta vodenja. Izpeljan model je idealiziran in ne vključuje motenj ter odstopanj modela. Ker motnje težko določimo ali izmerimo, jih ne moremo posredno vključit v model. Nastavitev vodenja v tem primeru zahteva določeno mero inženirskih izkušenj.

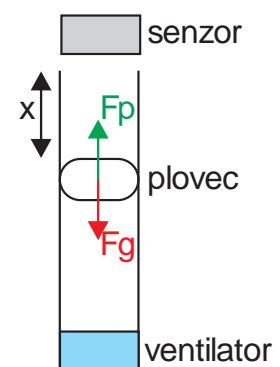
Delo, ki smo ga zvedli vključuje poznavanje modeliranja fizikalnih procesov, znanje daljinskega vodenja in zaprto-zančnega vodenja in industrijskih komunikacij. Sistem zračne levitacije smo izdelali sami po naslednjih korakih:

- raziskava in izpeljava matematičnega modela zračne levitacije,
- raziskava in načrtovanje zaprto-zančne strukture ter nastavitve PID- regulatorja,
- fizična izdelava sistema zračne levitacije z vetrovnikom,
- programiranje industrijskih krmilnikov,
- preizkus delovanja.

V članku bo v drugem poglavju predstavljen matematični model zračne levitacije, nato sledi poglavje tri, ki predstavlja porazdeljeno vodenje. V četrtem poglavju bodo predstavljeni rezultati vodenja, za katerim sledi zaključek.

## 2 Modeliranje sistema

Za izvedbo simulacij, v katerih želimo doseči čim bolj realno obnašanje modela in določiti parametre PID-regulatorja za zračno levitacijo plovca v vetrovniku, Slika 1., je uporabljen idealiziran lineariziran matematični model, ki je zapisan na osnovi 2. Newtonovega zakona [4], [5].



Slika 1: Model zračne levitacije

Nelinearni model zračne levitacije:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= F_p - F_g, \\ &= \frac{1}{2} C_d \cdot \rho \cdot A \cdot (v_{eq} - \dot{x})^2 - m \cdot g. \end{aligned} \quad (1)$$

Lineariziran model, predstavljen s prenosno funkcijo (1) je:

$$G(s) = \frac{x(s)}{v_{eq}(s)} = \frac{1}{s} \cdot \frac{a \cdot K_v}{(s+a) \cdot (s \cdot T_v + 1)} \quad (2)$$

Posamezni parametri prenosne funkcije (1) so podani v naslednjih enačbah:

$$a = \frac{2 \cdot g}{v_{eq}} \quad (3)$$

$$v_{eq} = \sqrt{\frac{g \cdot m}{\alpha}} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{C_d \cdot \rho \cdot A}{2} \quad (5)$$

Kjer je:

- $x$  – višina plovca,

- $\dot{x}$  – hitrost plovca,
- $K_v$  – ojačenje ventilatorja,
- $T_v$  – časovna konstanta ventilatorja,
- $g$  – težnostni pospešek,
- $m$  – masa plovca,
- $C_d$  – viskoznost zraka,
- $v_{eq}$  – hitrost ventilatorja, pri kateri je plovec v ravnovesju,
- $A$  – površina plovca,
- $\rho$  – gostota zraka.

Izdelan sistem vetrovnika ima naslednje določene parametre:

- $m = 7$  g,
- $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup>,
- $d = 41$  mm,
- $C_d = 1,568 \cdot 10^{-5}$ ,
- $\rho = 1,184$  kg/m<sup>3</sup>.

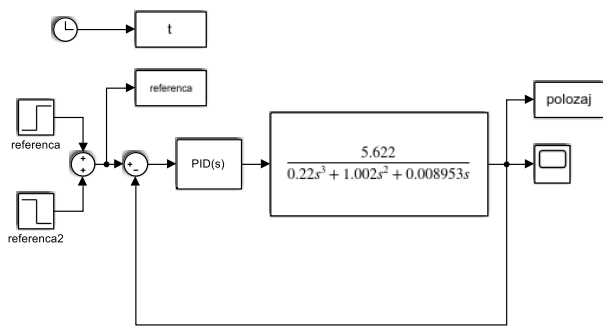
## 3 Vodenje zračne levitacije

Glede na izpeljan matematični model ter določene parametre modela, smo s pomočjo programa MATLAB določili parametre PID-regulatorja. Regulator smo nastavili na osnovi minimizacije performančnega učinka občutljivostne prenosne funkcije zaprto-zančnega sistema. Minimizacija občutljivostne performančne karakteristike nam zagotavlja zanesljivo vodenje v primeru delovanja nemerljivih izhodnih motenj ter odstopanje parametrov modela [6]. Določeni končni parametri regulatorja so:  $K_P = 0,06596$ ,  $K_I = 0,00473$ ,  $K_D = 0,23$ .

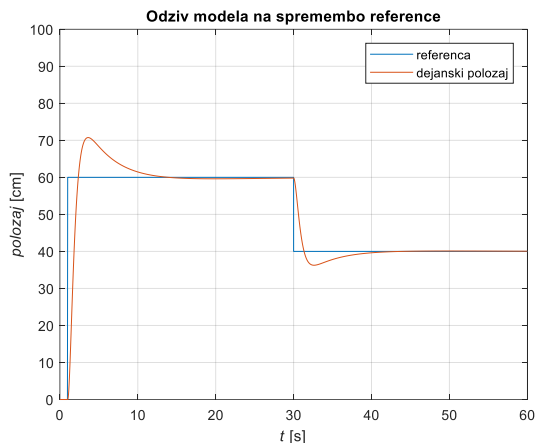
Simulacijska shema vodenja procesa je prikazana na sliki 2. Modeliran proces je sestavljen iz prenosne funkcije objekta vodenja ter PID-regulatorja. Odziv modela zračne levitacije je prikazan na sliki 3. Pri času 1 s stopnično spremenimo referenco višine na 60 cm. Odziv modela ima prenihaj in doseže referenčno vrednost pri času 14 s. Pri času 30 s stopnično zmanjšamo referenco iz 60 cm na 40 cm. V odzivu pride do podnihaja in po času 11 s ponovno doseže referenčno vrednost.

Izračunano prenosno funkcijo regulatorja smo uporabili v programu TIA PORTAL, kjer smo izvedli eksperimentalni del. V izbranem programskem okolju smo uporabili PID-blok s sledečo prenosno funkcijo (6), [7].

$$R(s) = K_P \cdot \left( (b \cdot w - x) + \frac{1}{T_I \cdot s} \cdot (w - x) + \frac{T_D \cdot s}{a \cdot T_D \cdot s + 1} \cdot (c \cdot w - x) \right) \quad (6)$$



Slika 2: Simulacijski model procesa s PID regulatorjem.



Slika 3: Simuliran odziv modela vetrovnika na stopnično spremembo reference višine.

Kjer je:

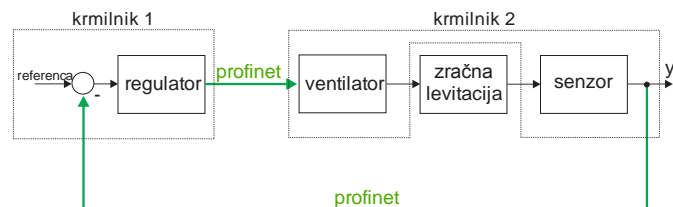
- $K_p$  - ojačenje,
- $T_i$  - časovna konstanta integratorja,
- $T_d$  - časovna konstanta diferenciatorja,
- $a$  – zakasnitev diferencialnega dela,
- $c$  – konstante diferencialnega dela,
- $x$ – dejanska vrednost,
- $w$  – željena vrednost,
- $b$  – konstanta proporcionalnega dela.

## 4 Komunikacijski protokol PROFINET in porazdeljeno vodenja

Komunikacijski protokol PROFINET uporablja TCP/IP standard za časovno nekritične operacije – za diagnostiko in upravljanje. Za časovno kritične operacije pa uporablja posebni RT- standard. To pomeni da se uporablja poseben PROFINET okvir, ciklični prenos podatkov, alarmov in nadzorne komunikacije. Prenosna hitrost Profinet-a znaša 100 Mbit/s. Uporablja full duplex komunikacijo in podpira tudi brezžično povezavo. Naslavljanje poteka preko IP in MAC naslova.

Prenos informacij poteka tako, da gospodar pošlje zahtevo, suženj jo obdela, če je zanj, pošlje podatke nazaj, če ni, pa pošlje podatke do naslednjega suženja. Zato je PROFINET nekoliko počasnejši od EtherCAT-

a. PROFINET uporablja posamezni okvir za naslavljanje posameznega suženja in ima omejeno število vozlišč. Primeren je za komunikacijo med industrijskimi krmilniki, nadzornimi moduli (SCADA) in upravljalnimi moduli (MES). Enostavno ga združujemo z že obstoječimi vodili [8]. V sistemu regulacije zračne levitacije na sliki 5, PROFINET predstavlja kabel pod številko 5.



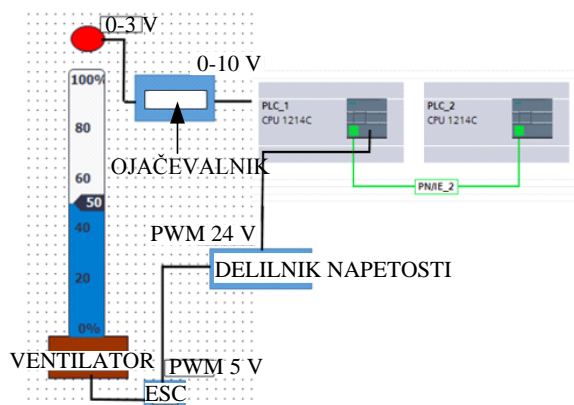
Slika 5: Zaprto-zančna struktura porazdeljenega vodenja.

## 5 Eksperimentalni rezultati

Fizično realiziran sistem je sestavljen iz:

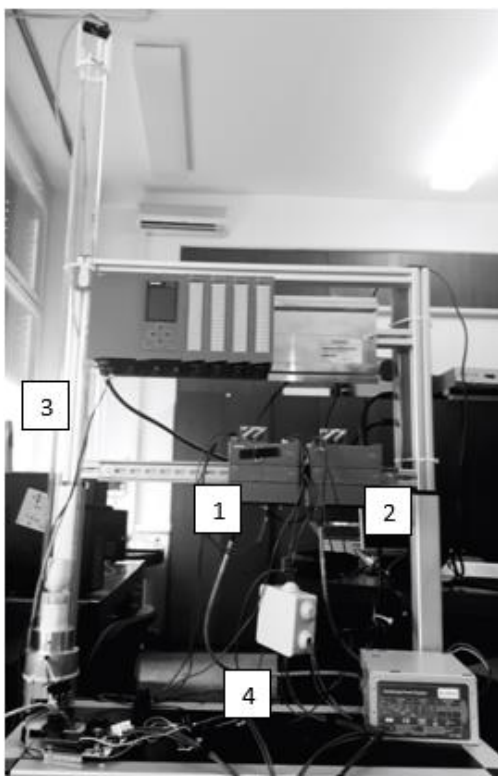
- vetrovnika s cevjo, višine 1 m,
- brez- krtačnega enosmerne motorja, ki je nameščen v aluminijasti podstavek nosilca cevi,
- dveh programirljivih krmilnikov SIMATIC S7-1200,
- plovca, natisnjene s 3D tiskalnikom,
- senzorja višine tipa X-NUCLEO-53L0A1,
- RC- filtra, ki gladi izhodno napetost senzorja, saj le ta generira PWM- signal, na krmilniku, pa je uporabljen analogni vhod,
- operacijskega ojačevalnika s faktorjem ojačenja  $K=3$ , kateri je ojačal izhodni signal senzorja pred analognim vhodom v krmilnik,
- 12 V napajalnika,
- krmilnika motorja, tipa ESC ZTW 20 A BEC,
- napetostnega delilnika za znižanje izhodnega PWM- signala iz krmilnika iz 12 V na 5 V,
- IP- usmerjevalnika, kateri je uporabljen za komunikacijo PROFINET.

Vetrovnik je voden preko industrijskega vodila PROFINET. Na sliki 6 je prikazana shema izdelanega grafičnega vmesnika sistema.



Slika 6: Prikaz procesa zračne levitacije

Za vodenje na daljavo sta uporabljena dva SIEMENS-ova krmilnika SIMATIC S7-1200. Prvi je uporabljen kot aktuator, s pomočjo katerega prejemamo signal iz sensorja. Drugi krmilnik je uporabljen za regulacijo, ki regulirano veličino pošilja na prvi krmilnik, le ta pa vodi motor. Sistem realnega časa deluje s časom tipanja 20 ms. Končni izdelek je prikazan na sliki 7.



Slika 7: Sistem zračne levitacije

Slika 7. prikazuje naslednje elemente: aktuator – prvi krmilnik (št. 1), regulacija – drugi krmilnik (št. 2), vetrovnik (št. 3) in kabel za vzpostavitev komunikacije z industrijski protokolom PROFINET (št. 4)

## 6 Zaključek

V predstavljenem članku smo predstavili raziskavo in implementacijo porazdeljenega sistema zaprto-zančnega vodenja objekta zračne levitacije plovca v vetrovniku. Končni cilj projekta je bil izvesti regulacijo plovca v vetrovniku na realnem fizičnem modelu preko dveh porazdeljenih (medsebojno oddaljenih) programirljivih krmilnikov, povezanih s komunikacijo PROFINET. Matematični model levitacije z dodano regulacijo in odziv reguliranega procesa v programskem okolju MATLAB, ob upoštevanju dimenzij ter mase plovca, nekaterih vplivov iz okolja, kot sta viskoznost in gostota zraka smo tako preizkusili še v realnem okolju z industrijskima krmilnikoma. Na dno cevi vetrovnika, nad ventilator, smo namestili še paralelno zalepljene slamice, da smo v vetrovniku zagotovili laminarni tok zraka.

Iz prikazanih rezultatov je razvidno, da smo nalogo uspešno opravili, saj sistem deluje zanesljivo in učinkovito. Porazdeljeno vodenje preko protokola PROFINET se je izkazala, kot zanesljiva rešitev za časovno kritični sistem zračne levitacije z intervalom tipanja 20 ms.

## Literatura

- [1] Chen, X.; Song, G.; Zhang, Y. Virtual and Remote Laboratory Development: A Review. In Proceedings of the 12th International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments; American Society of Civil Engineers: Reston, VA, USA, 2010; pp. 3843–3852.
- [2] Ma, J.; Nickerson, J.V. Hands-On, Simulated, and Remote Laboratories: A Comparative Literature Review. ACM Comput. Surv. 2006, 38, 7.
- [3] Antsaklis, P.; Basar, T.; DeCarlo, R.; McClamroch, H.; Spong, M.; Yurkovich, S. NSF/CSS Workshop on New Directions in Control Engineering Education; Technical Report; University of Illinois at Urbana-Champaign: Champaign, IL, USA, 1998.
- [4] Jesus Chacon, Jacobo Saenz, Luis de la Torre, Jose Manuel Diaz and Francisco Esquembre, Design of a Low-Cost Air Levitation System for Teaching Control Engineering, Sensors 2017, 17(10), 232.1
- [5] Mejías, A.; Herrera, R.S.; Márquez, M.A.; Calderón, A.J.; González, I.; Andújar, J.M. Easy Handling of Sensors and Actuators over TCP/IP Networks by Open Source Hardware/Software. Sensors 2017, 17 (1), 94.
- [6] Norman S. Nise, Control Systems Engineering, John Wiley & Sons, 2011
- [7] Bernard Friedland, Control System Design, Dover Publications, 2005
- [8] Komunikacijski protokol PROFINET. Dostopno na: <https://us.profinet.com/technology/profinet/#prettyPhoto> [15. 7. 2018]