

Intelligent Robot Control

Lecture 4: Uporaba nelinearnih oscilatorjev v robotiki:
osnove

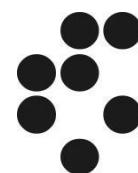
Tadej Petrič

tadej.petric@ijs.si



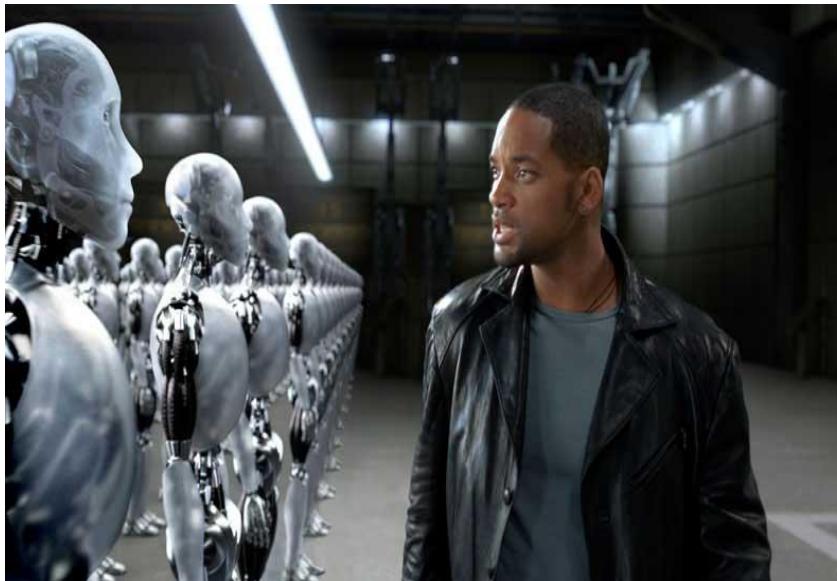
Vsebina

- Uvod
 - Motivacija
 - Pregled znanstvenega področja
- Kanonični dinamični sistem
 - Nov pristop
 - Vodene kolenskega eksoskeleta
- Dvonivojski sistem
 - Sinhronizacija na poljuben zunanji signal
 - Sinhronizacija robota in vodene naprave
 - Uporaba strategij pri izvajanju ritmičnih nalog
- Zaključek



Motivacija

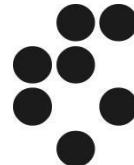
- Koncept umetne inteligence
- Izgradnja biološko navdahnjenega robota (humanoida)
- Razvoj človeku podobnega gibanja in kognitivnega obnašanja



I, Robot (2004)

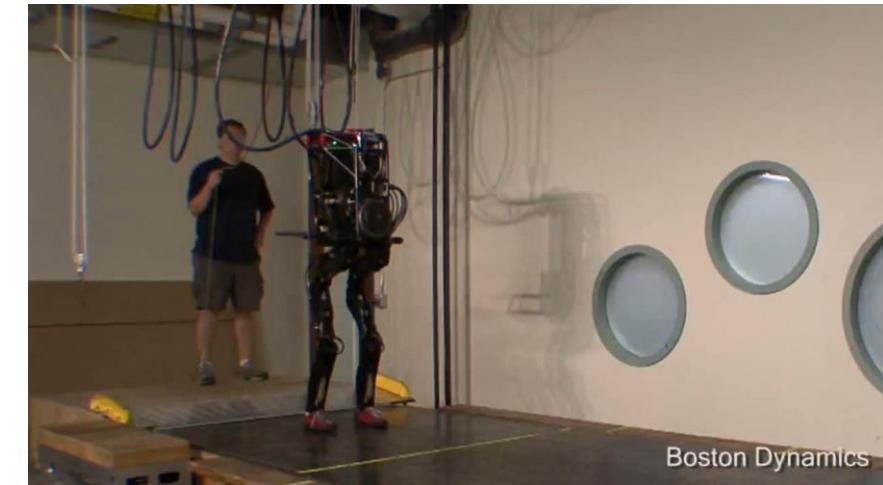


HRP-4C (2009)



Ritmične naloge

- Hoja
- Ritmična gibanja živali
- Igranje z igračami
- Žongliranje
- Smučanje



Boston Dynamics (2009)



IJS – T. Petrič (2012)



Ritmične naloge

- Če interakcija med robotom in rokovano napravo ni pomembna, lahko vsilimo mehanske in dinamične lastnosti robota.
- Kadar je dinamičen odziv rokovane naprave pomemben, uporabimo algoritme vodenja, ki primerno prilagodijo obnašanje robota.



Vodenje ritmičnih nalog

(klasičen pristop)

- Vodenje z uporabo modela:
 - žongliranje [1,2],
 - vodenje štiri- [3] in
 - dvo- nožnih [4] mehanizmov.
- Izpeljani modeli so namenski in niso direktno prenosljivi.

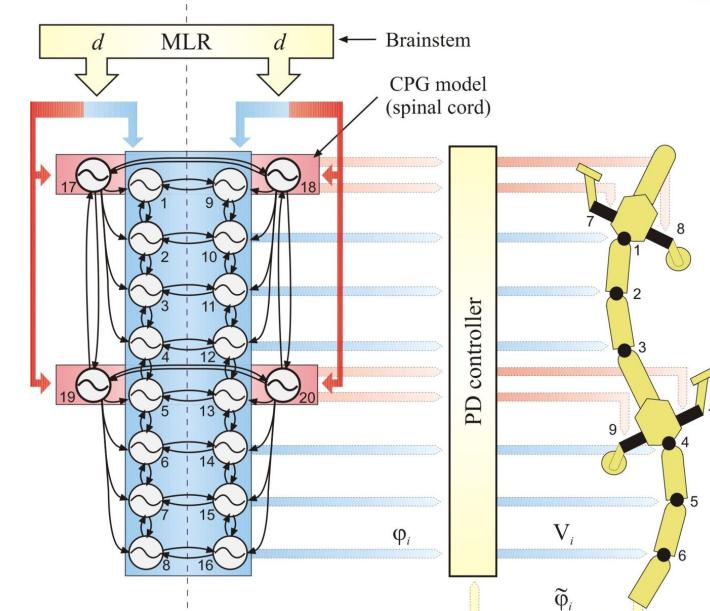
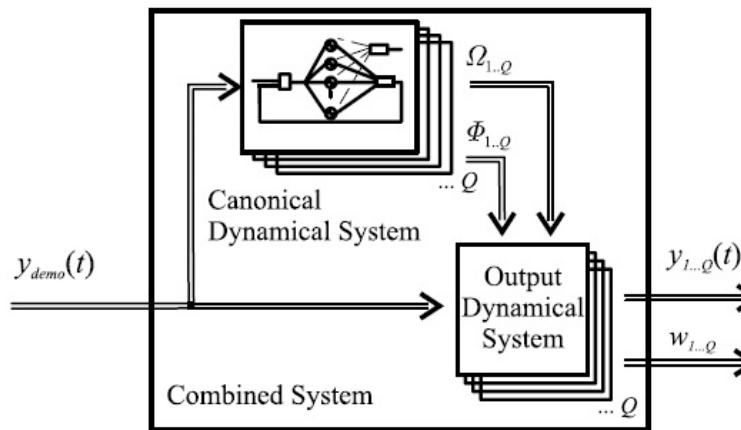
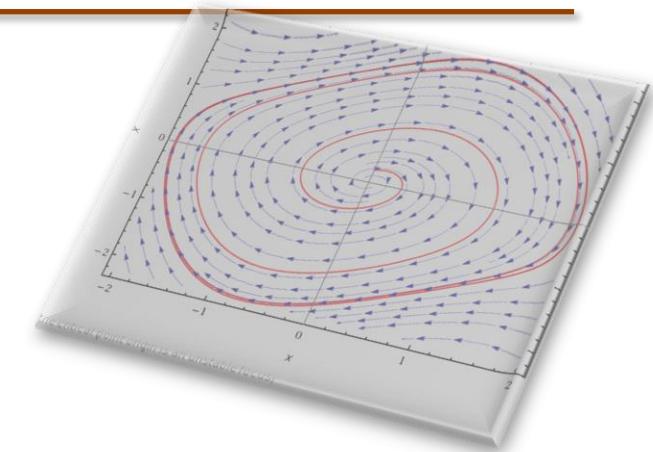
1. S. Schaal and C. Atkeson. Open loop stable control strategies for robot juggling. In Robotics and Automation, 1993. Proceedings., 1993 IEEE International Conference on, pages 913–918, May 1993.
2. L. Žlajpah. Robotic yo-yo: modelling and control strategies. *Robotica*, 24(2):211–220, 2006.
3. Y. Fukuoka, H. Kimura, and A. H. Cohen. Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Irregular Terrain Based on Biological Concepts. *The International Journal of Robotics Research*, 22(3-4):187–202, 2003.
4. L. Sentis, J. Park, and O. Khatib. Compliant control of multicontact and center-of-mass behaviors in humanoid robots. *Robotics, IEEE Transactions on*, 26(3):483 –501, 2010.



Vodenje ritmičnih nalog

(alternativen pristop)

- Nelinearni oscilatorji
- Centralni generatorji vzorcev
- Imitacija gibanja



Nelinearni oscilatorji

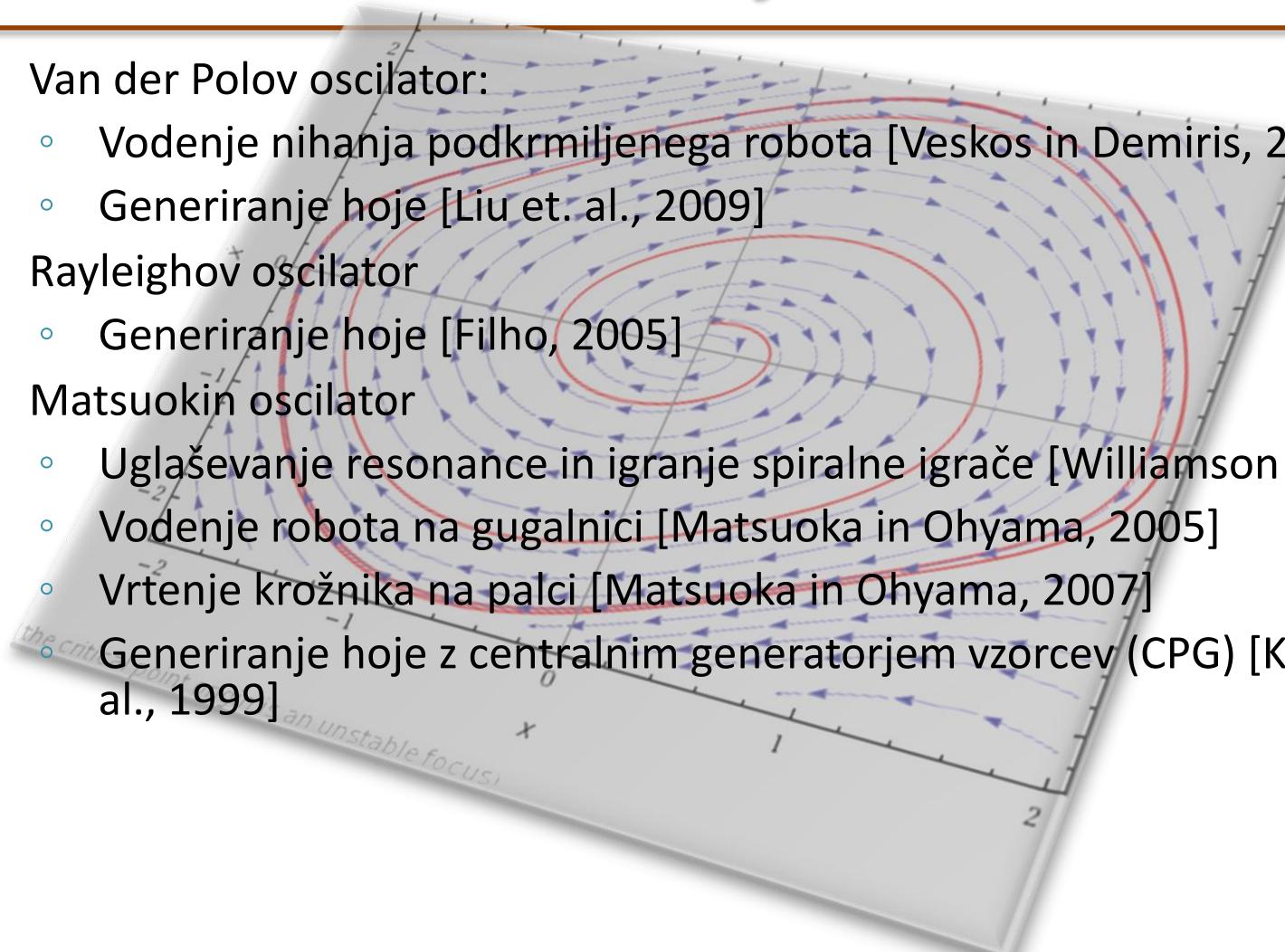
- Oscilator je avtonomen dinamični sistem z vsaj enim atraktorjem limitnega cikla.
- Močna orodja za modeliranje različnih sistemov [1]
 - Signali nevronov [2]
 - Biološkega ritma [3]
 - Bitja srca [4]
 - Koordinacije udov [5]
- Lastnosti:
 - Robustni limitni cikel
 - Sprotno prilagajanje frekvenci

1. S A. Pikovsky, M. Rosenblum, J. Kurths, R. C. Hilborn. Synchronization: A universal concept in nonlinear science. American Journal of Physics, 2002.
2. R. Kageyama, Y. Niwa, H. Shimojo, T. Kobayashi, and T. Ohtsuka. Ultradian oscillations in notch signaling regulate dynamic biological events. Developmental Biology, 2010.
3. S. H. Strogatz. The mathematical structure of the human sleep-wake cycle. Springer- Verlag New York, 1986.
4. R. E. Mirollo, Steven, and H. Strogatz. Synchronization of pulse-coupled biological oscillators. SIAM J. Appl. Math,1990.
5. H. Haken, J. A. S. Kelso, and H. Bunz. A theoretical model of phase transitions in human hand movements. Biological Cybernetics, 1985.



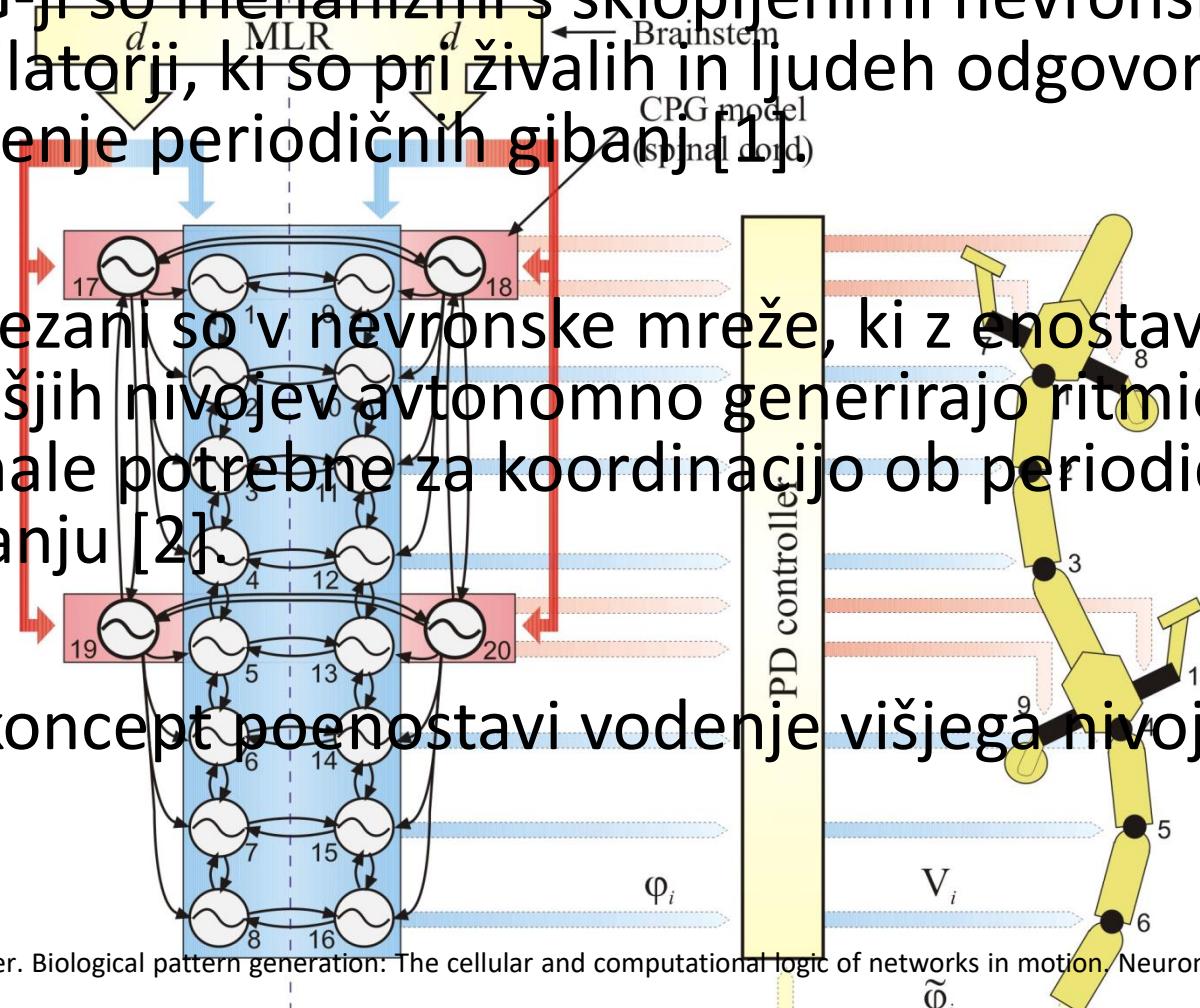
Nelinearni oscilatorji v robotiki

- Van der Polov oscilator:
 - Vodenje nihanja podkrmiljenega robota [Veskos in Demiris, 2009]
 - Generiranje hoje [Liu et. al., 2009]
- Rayleighov oscilator
 - Generiranje hoje [Filho, 2005]
- Matsuokin oscilator
 - Uglaševanje resonance in igranje spiralne igrače [Williamson 1998]
 - Vodenje robota na gugalnici [Matsuoka in Ohyama, 2005]
 - Vrtenje krožnika na palci [Matsuoka in Ohyama, 2007]
 - Generiranje hoje z centralnim generatorjem vzorcev (CPG) [Kimura, et. al., 1999]



Centralni generatorji vzorcev (CPG)

- CPG-ji so mehanizmi s sklopljenimi nevronskimi oscilatorji, ki so pri živalih in ljudeh odgovorni za vodenje periodičnih gibanj [1].
- Povezani so v nevronske mreže, ki z enostavnimi signali iz višjih nivojev avtonomno generirajo ritmične signale potrebne za koordinacijo ob periodičnem gibanju [2].
- Ta koncept poenostavi vodenje višjega nivoja.



1. S. Grillner. Biological pattern generation: The cellular and computational logic of networks in motion. *Neuron*, 52(5):751 – 766, 2006.
2. A. J. Ijspeert. Design of artificial neural oscillatory circuits for the control of lamprey and salamander-like locomotion using evolutionary algorithms. PhD thesis, 1998.



Imitacija gibanja

- Imitacija ritmičnega gibanja, poleg generiranja trajektorij, zahteva še določitev frekvence izvajanja.
- Znanih je samo nekaj pristopov, ki združujejo adaptacijo osnovne frekvence in hkratno učenje trajektorije:
 - Enonivojski sistem [1]
 - Dvonivojski sistem [2]

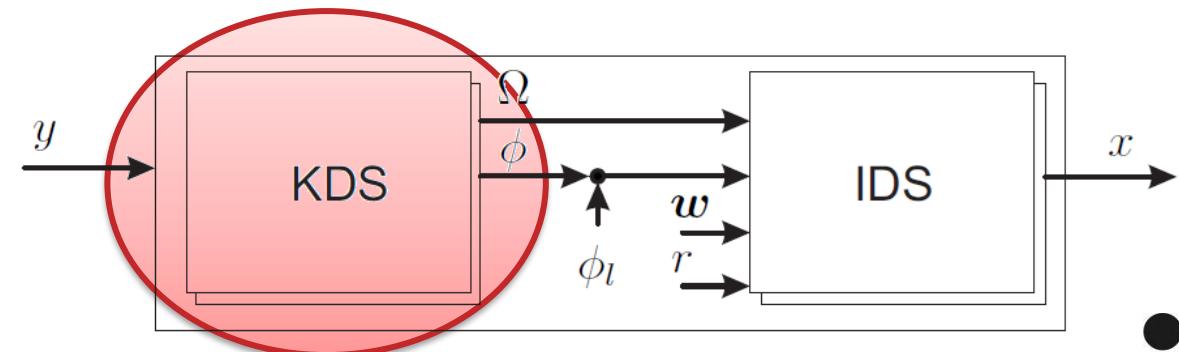
1. L. Righetti and A. Ijspeert. Programmable central pattern generators: an application to biped locomotion control. In Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on, pages 1585 –1590, May 2006.
2. A. Gams, A. J. Ijspeert, S. Schaal, and J. Lenarcic. On-line learning and modulation of periodic movements with nonlinear dynamical systems. Auton. Robots, 27(1):3–23, 2009.



Dvonivojski sistem

- Dvonivojski sistem za imitacijo gibanja
 - Prvi nivo – Kanonični dinamični sistem
 - Določa frekvenco in fazo
 - Drugi nivo – Izhodni dinamični sistem
 - Generira trajektorije

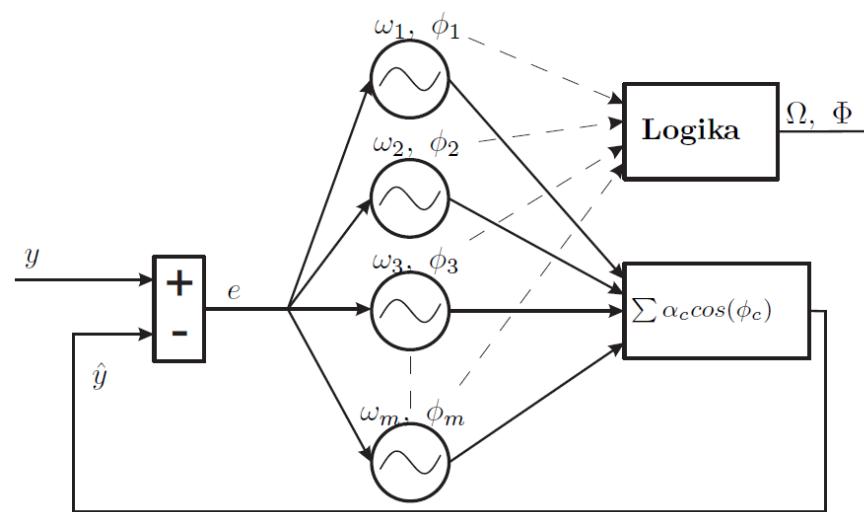
- Modulacije:
 - Frekvenčna
 - Fazna
 - Amplitudna



Prvi nivo – Kanonični dinamični sistem

(originalen pristop)

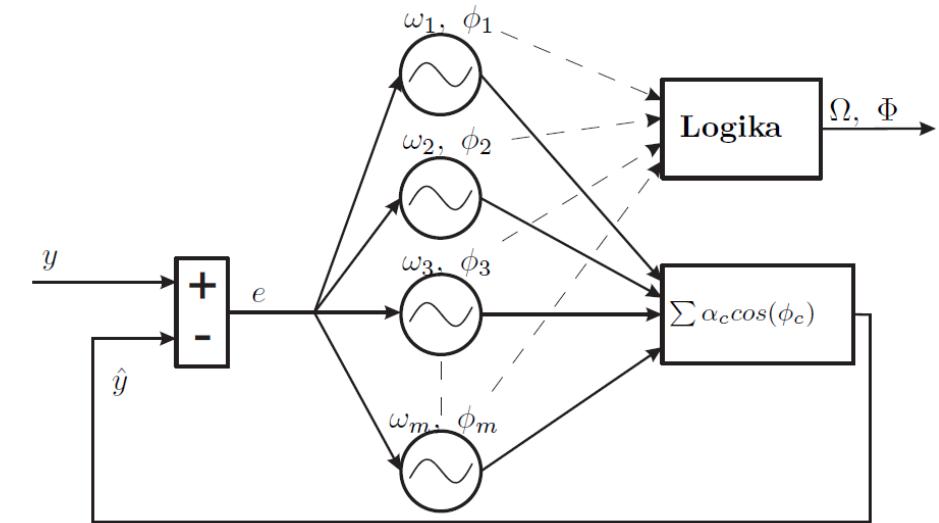
- Izloči frekvenco in fazo iz vhodnega signala
- Množica adaptivnih faznih oscilatorjev
- Omogoča izločanje neodvisnih frekvenčnih komponent
- **Pomanjkljivost: Potrebuje logični algoritem**



Razvoj nove metode

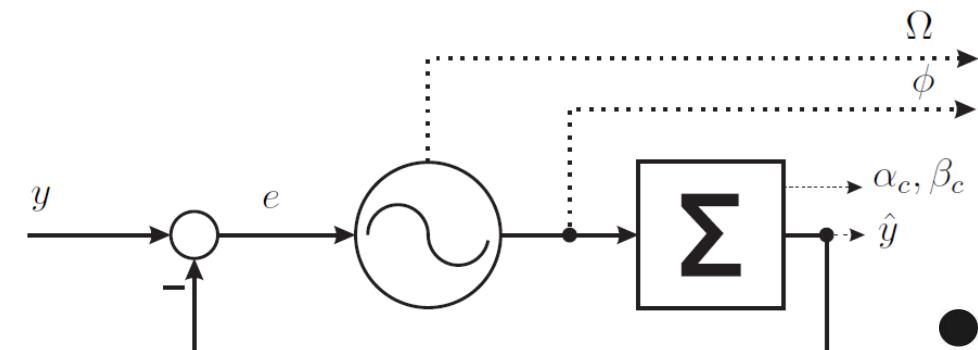
$$\dot{\phi}_i = \omega_i - K e \sin(\phi_i),$$

$$\dot{\omega}_i = -K e \sin(\phi_i),$$



$$\dot{\phi} = \Omega - K e \sin(\phi),$$

$$\dot{\Omega} = -K e \sin(\phi),$$



Nova metoda

- Originalna:

$$\dot{\phi}_i = \omega_i - Ke \sin(\phi_i),$$

$$\dot{\omega}_i = -Ke \sin(\phi_i),$$

$$e = y_{in} - \hat{y},$$

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^M \alpha_i \cos(\phi_i),$$

$$\dot{\alpha}_i = \eta \cos(\phi_i) e,$$

- Nova:

$$\dot{\phi} = \Omega - Ke \sin(\phi),$$

$$\dot{\Omega} = -Ke \sin(\phi),$$

$$e = y_{in} - \hat{y},$$

$$\hat{y} = \alpha_0 + \sum_{i=1}^M (\alpha_i \cos(i\phi) + \beta_i \sin(i\phi)),$$

$$\dot{\alpha}_o = \eta e,$$

$$\dot{\alpha}_i = \eta \cos(i\phi) e,$$

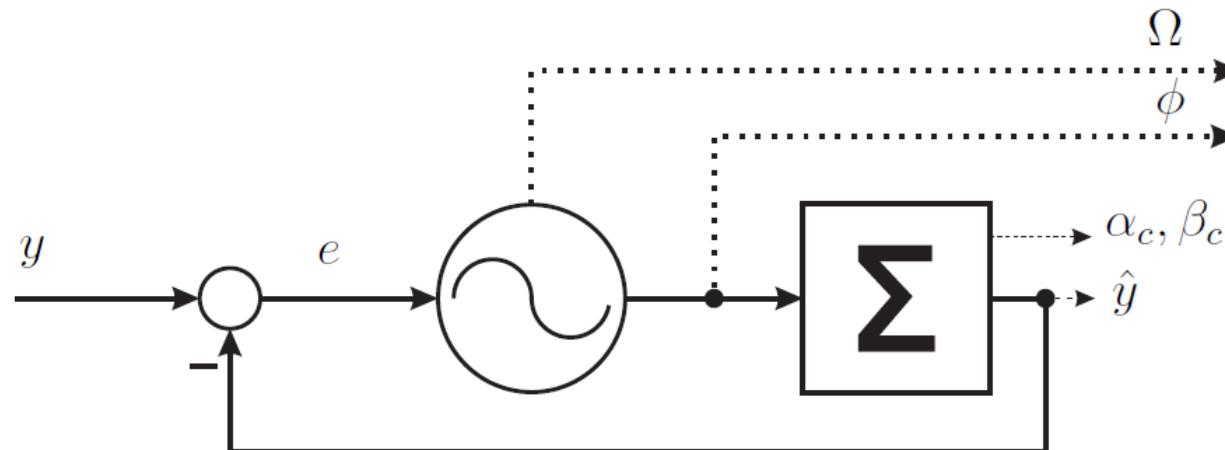
$$\dot{\beta}_i = \eta \sin(i\phi) e,$$



Prvi nivo – Kanonični dinamični sistem

(nov pristop)

- Izloči osnovno frekvenco in fazo iz vhodnega signala
- Temelji na enem adaptivnem faznem oscilatorju
- Ne potrebuje dodatne obdelava signala (e.g. FFT)
- **Prednost: Ne potrebuje logičnega algoritma**

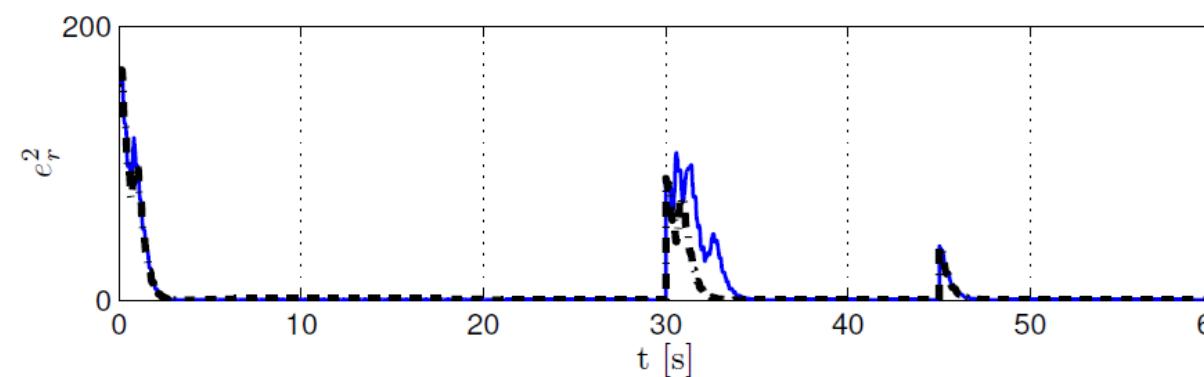
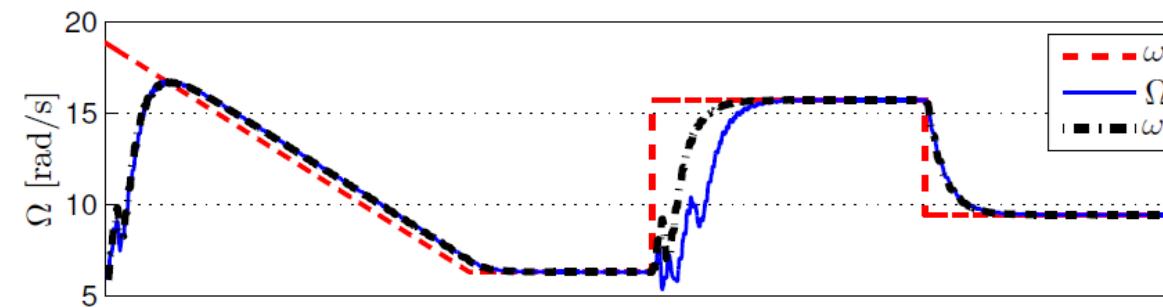
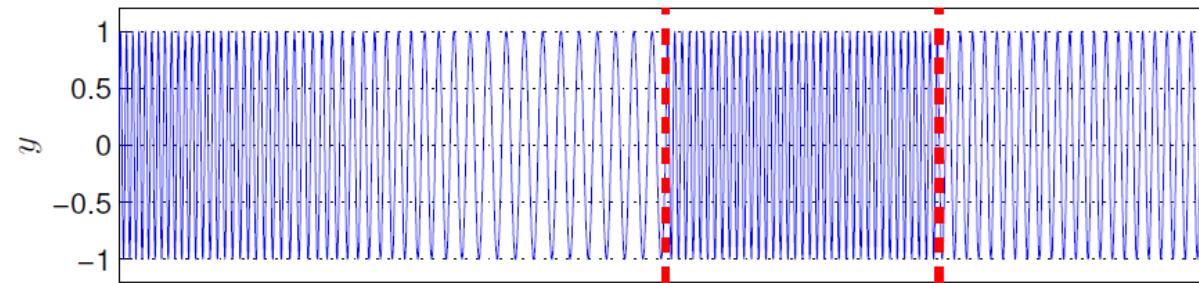


Primerjava osnovnih lastnosti

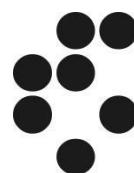
- Izloči frekvenco vhodnega signala 😊
- ~~Temelji na množici adaptivnih faznih oscilatorjih~~ 😞
- Temelji na enem adaptivnem faznem oscilatorju 😊
- ~~Pomanjkljivost: Potrebuje logični algoritem~~ 😞
- Logični algoritem ni potreben 😊
- ~~Izloči lahko poljubne frekvenčne komponente~~ 😊
- Izločeni harmoniki osnovne frekvenčne komponente so definirani v naprej 😊



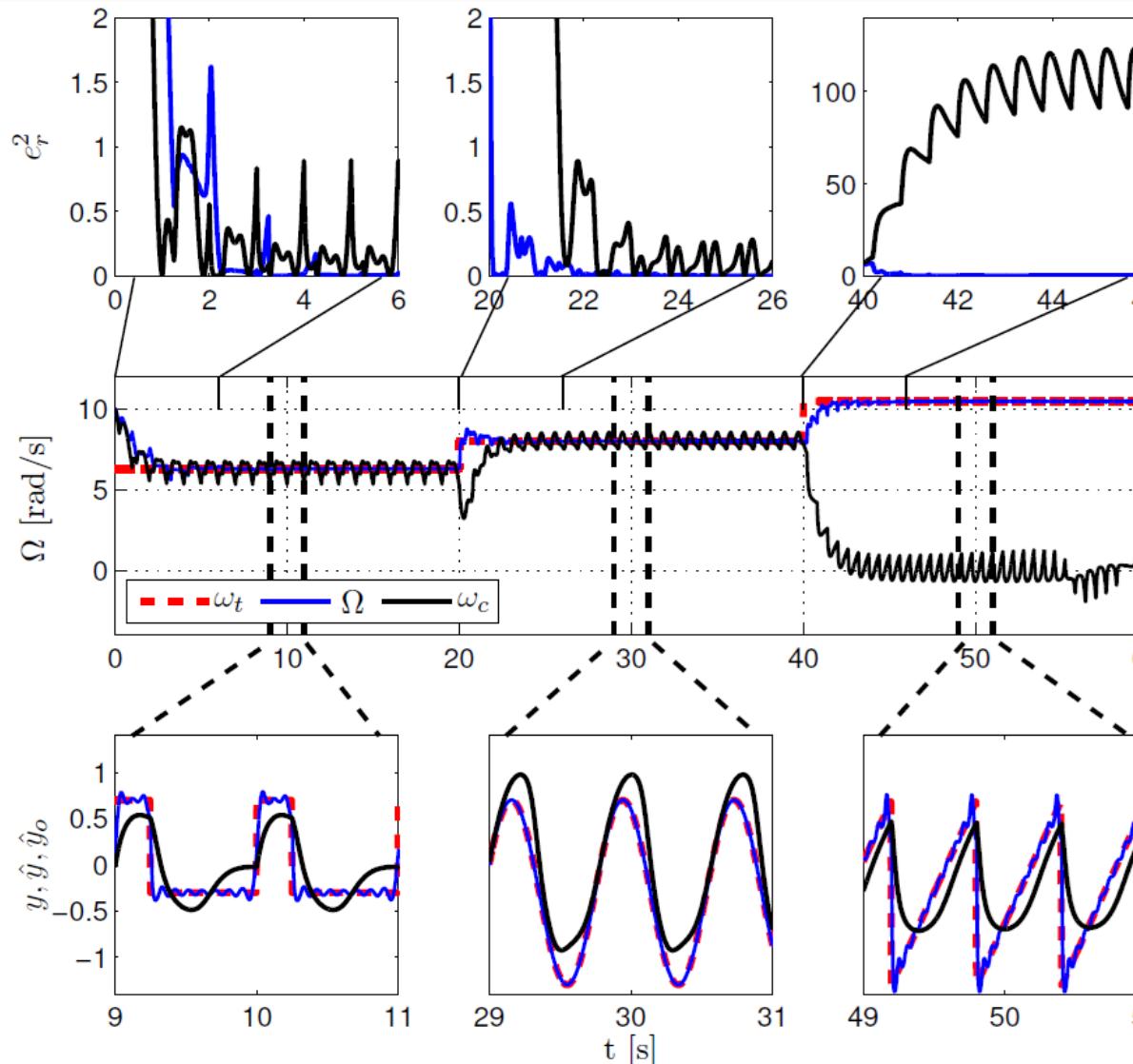
Izločanje frekvence iz časovno spremenljivega signala



- Parametri:
 - $\eta = 2$
 - $K = 20$
 - $M = 10$
- Star pristop:
 - $M = 1$
- Vhodni signal:
$$y = \sin(\omega_t t)$$



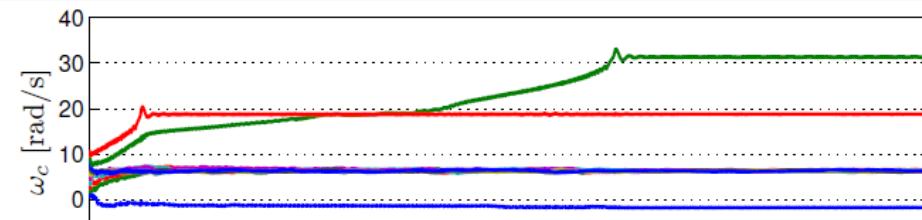
Izločanje frekvence iz časovno in oblikovno spremenljivega signala



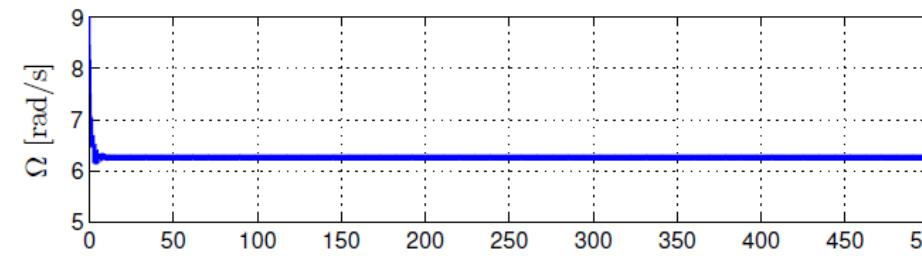
- Parametri:
 - $\eta = 2$
 - $K = 20$
 - $M = 10$
- Star pristop:
 - $M = 1$



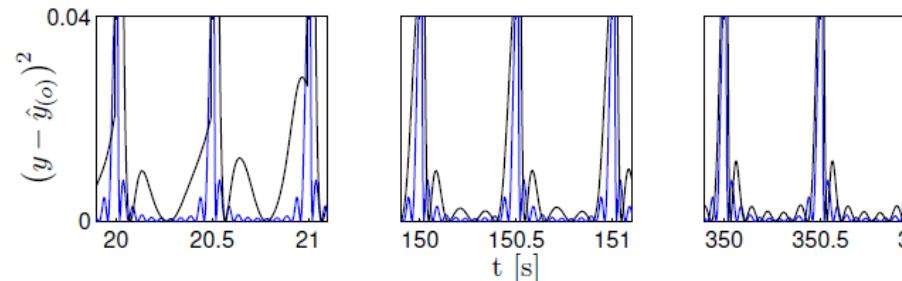
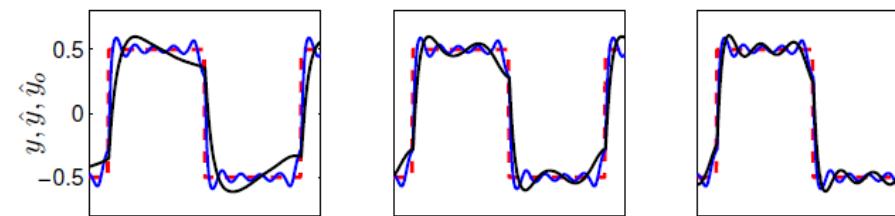
Izločanje frekvence iz časovno in oblikovno spremenljivega signala



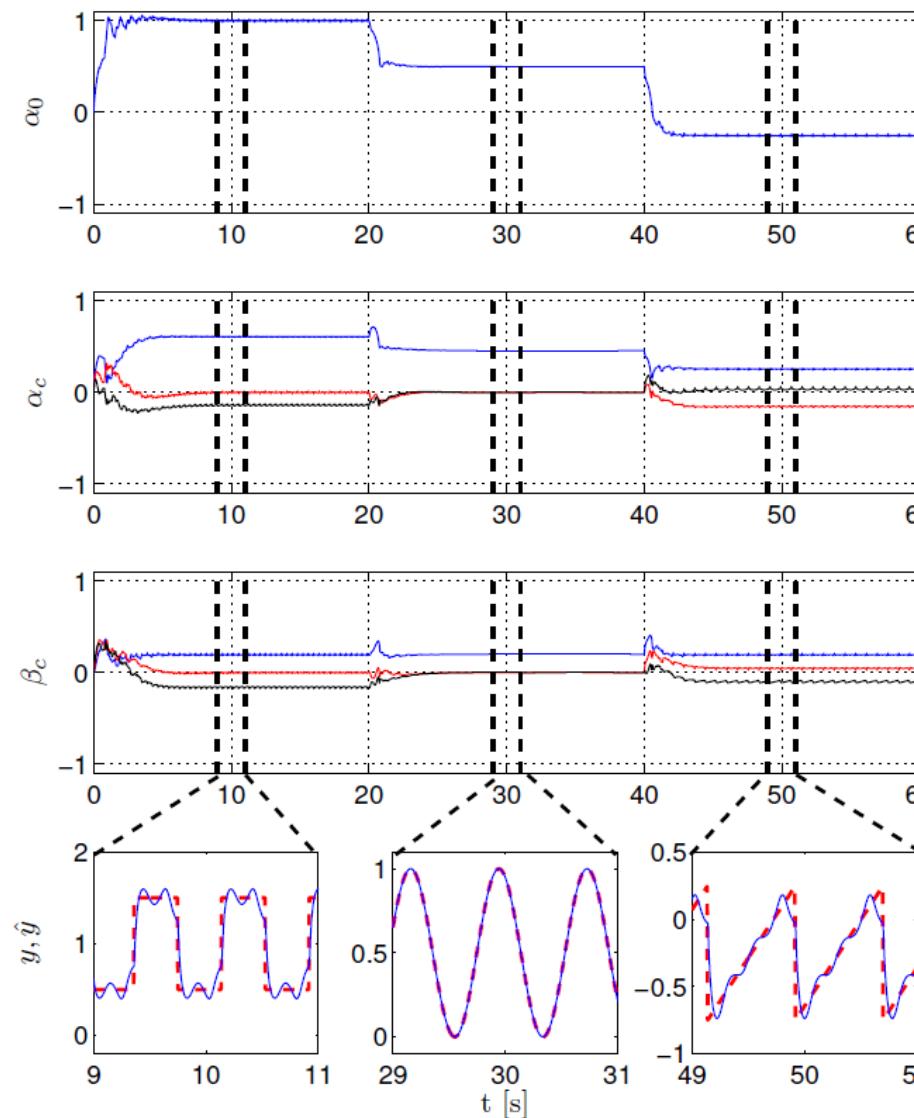
- Parametri:
 - $\eta = 2$
 - $K = 20$
 - $M = 10$



- Star pristop:
 - $M = 10$



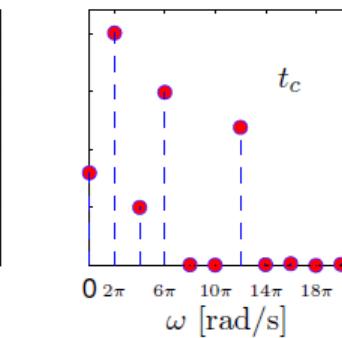
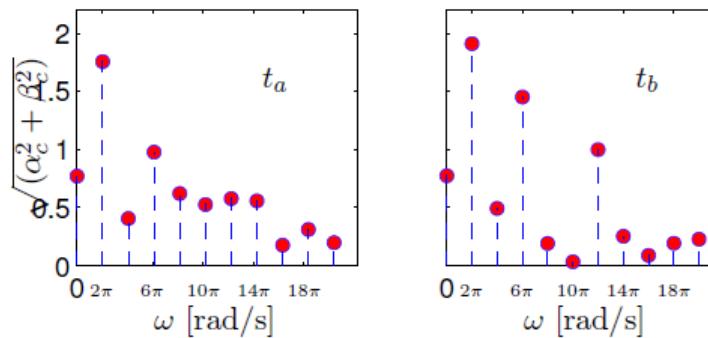
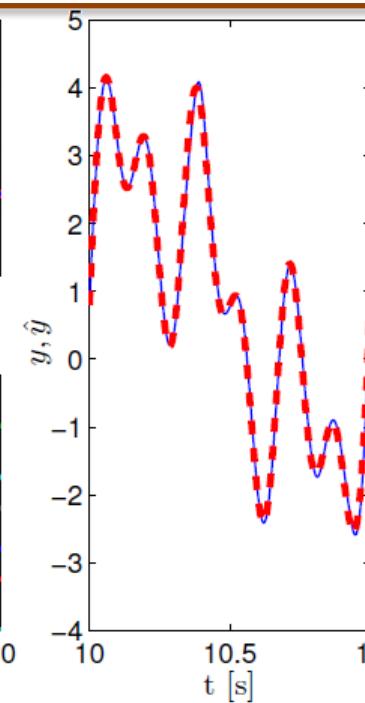
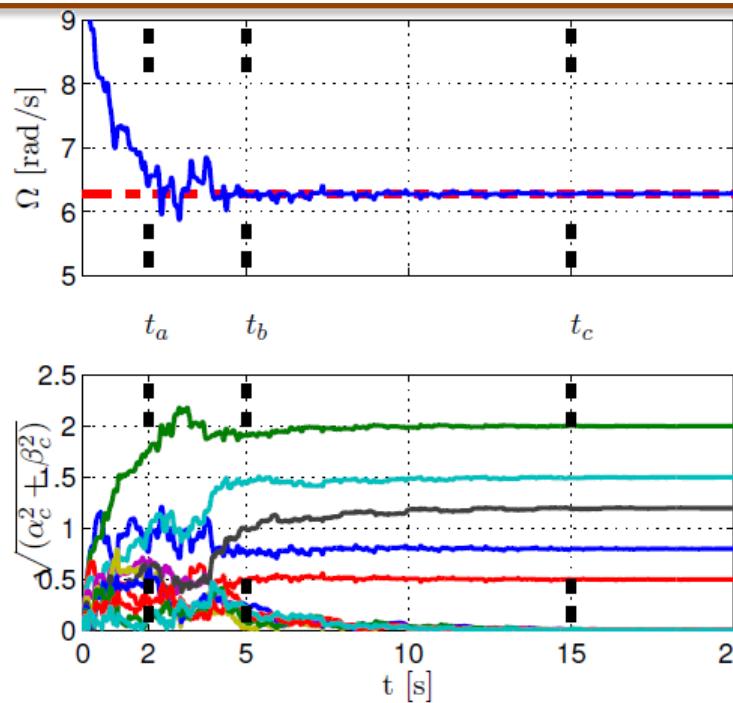
Konvergenca koeficientov Fourierove vrste



- Parametri:
 - $\eta = 2$
 - $K = 20$
 - $M = 3$



Konvergenca koeficientov Fourierove vrste



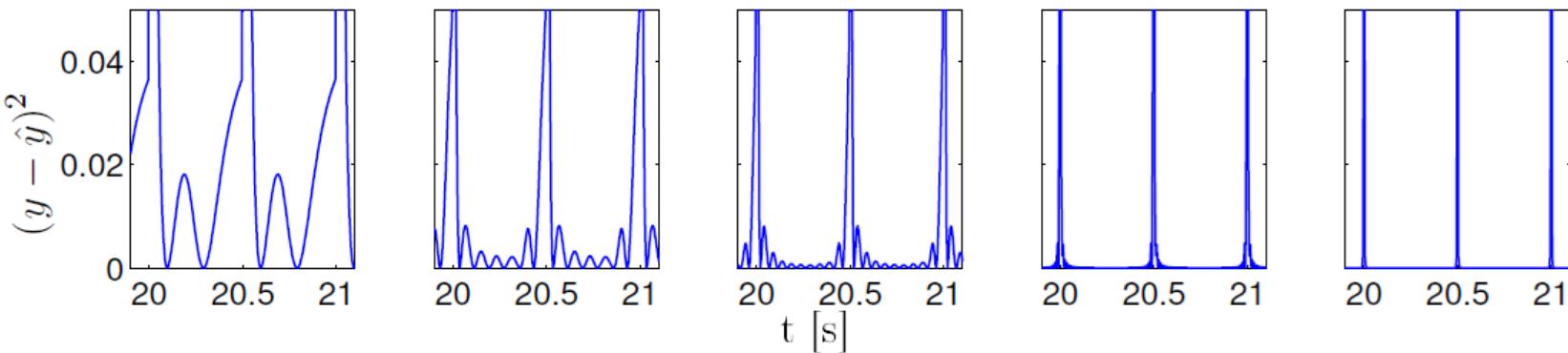
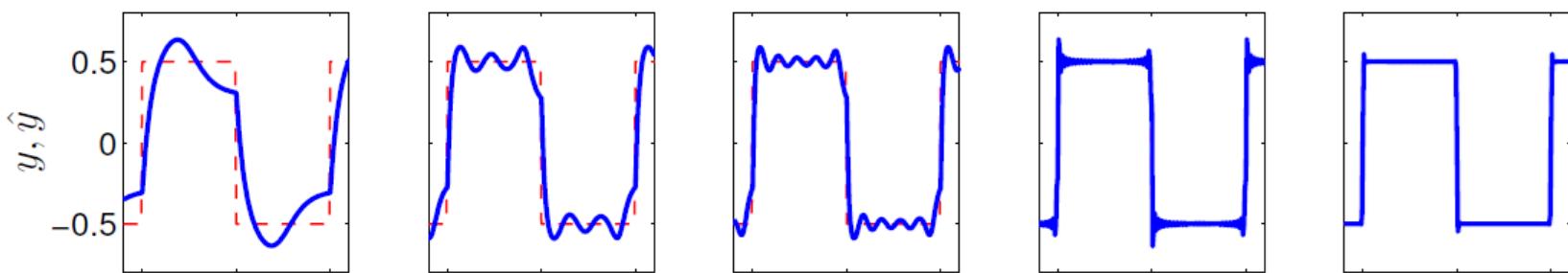
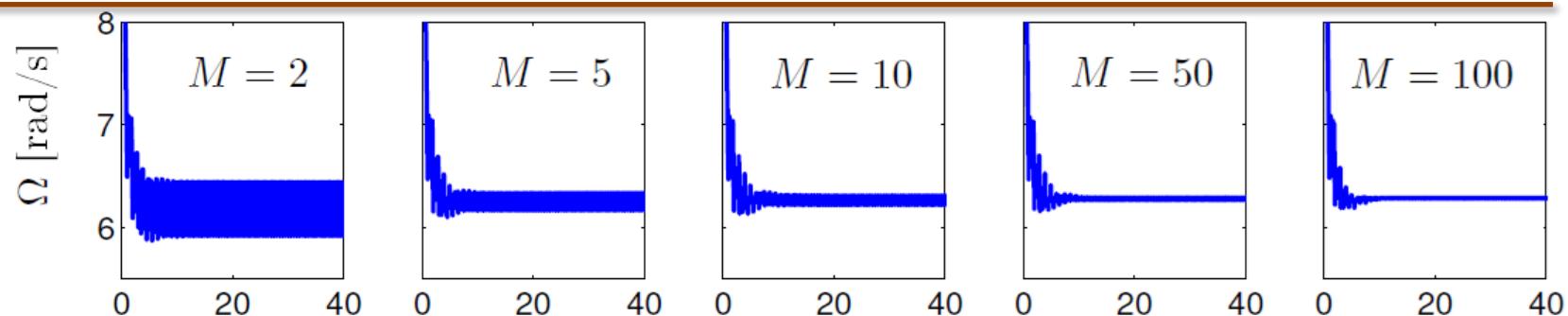
- Parametri:
 - $\eta = 2$
 - $K = 20$
 - $M = 10$

- Vhodi signal:

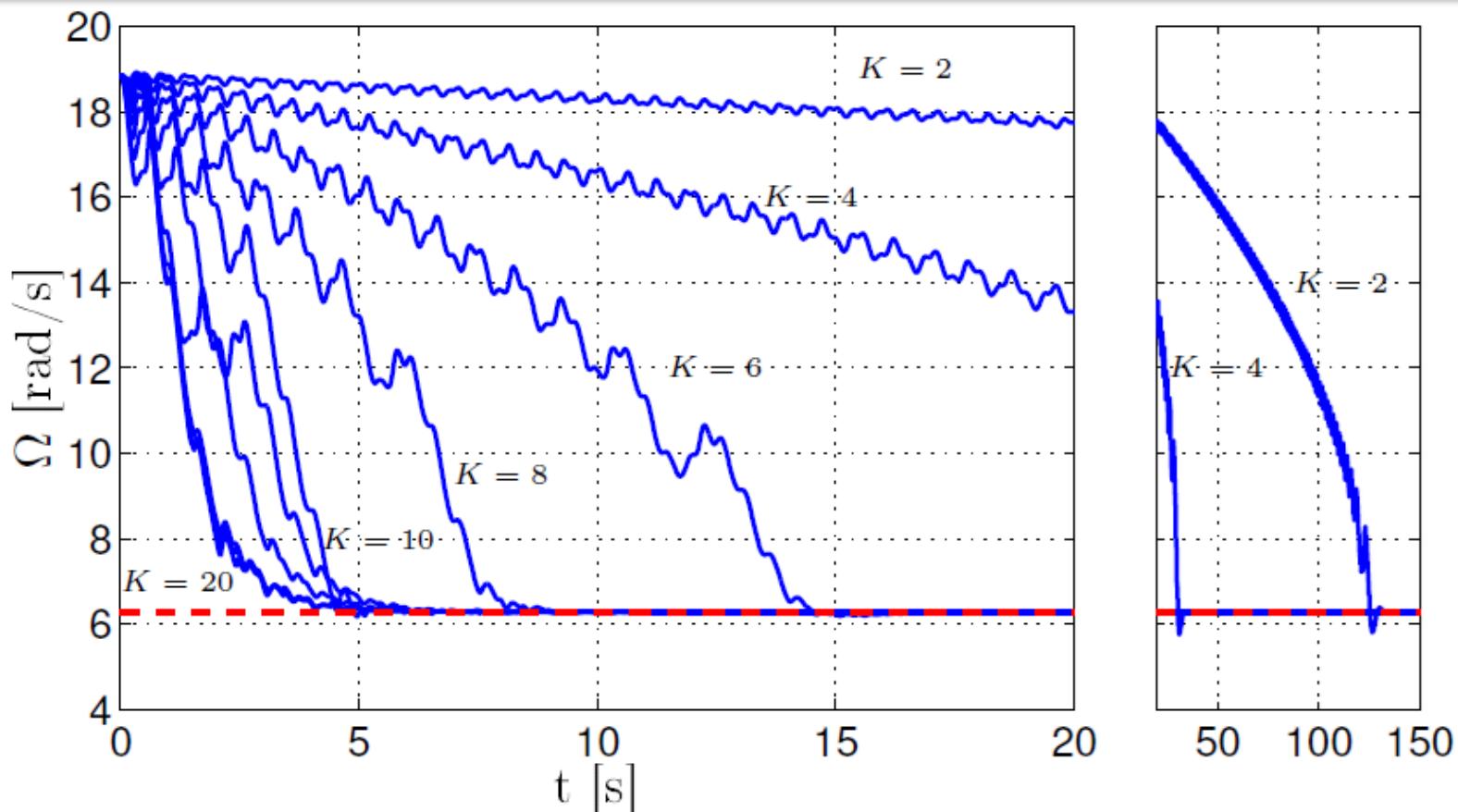
$$y(t) = 0.8 + 2\sin(2\pi t) + 0.5\sin(4\pi t) + 1.5\sin(6\pi t) + 1.2\sin(12\pi t)$$



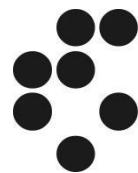
Vpliv velikosti Fouriereve vrste



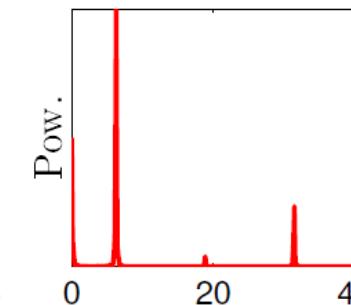
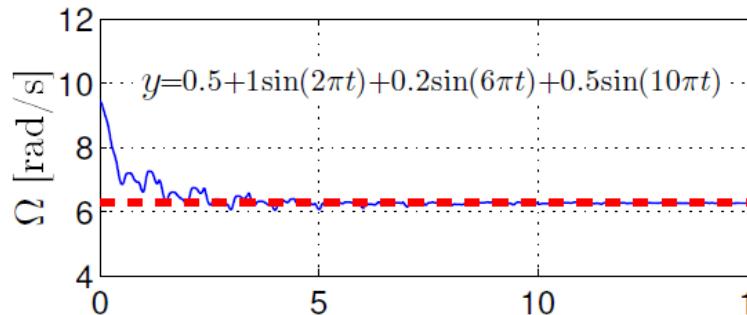
Vpliv konstante K



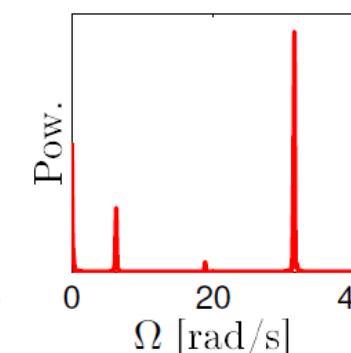
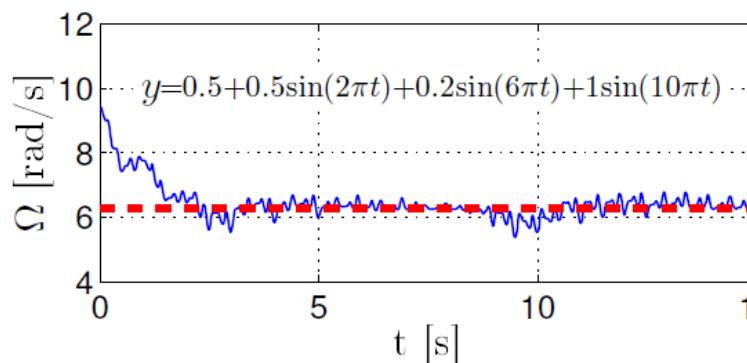
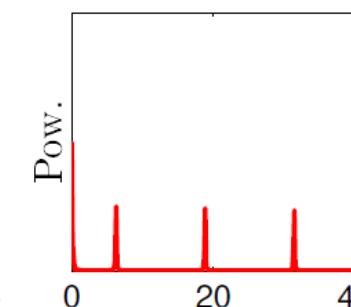
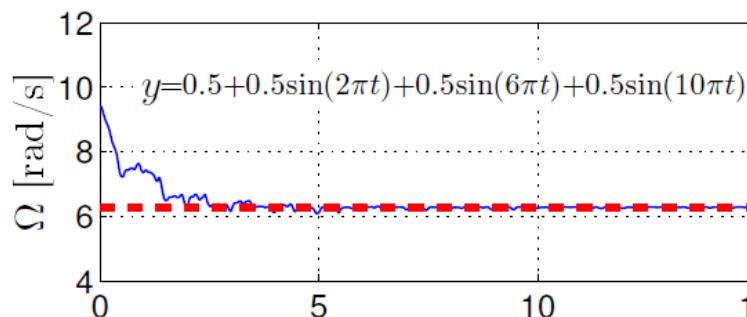
- Parametri: $\eta = 2$, $M = 10$,
- Vhodni signal: $y = \sin(\omega_t t)$



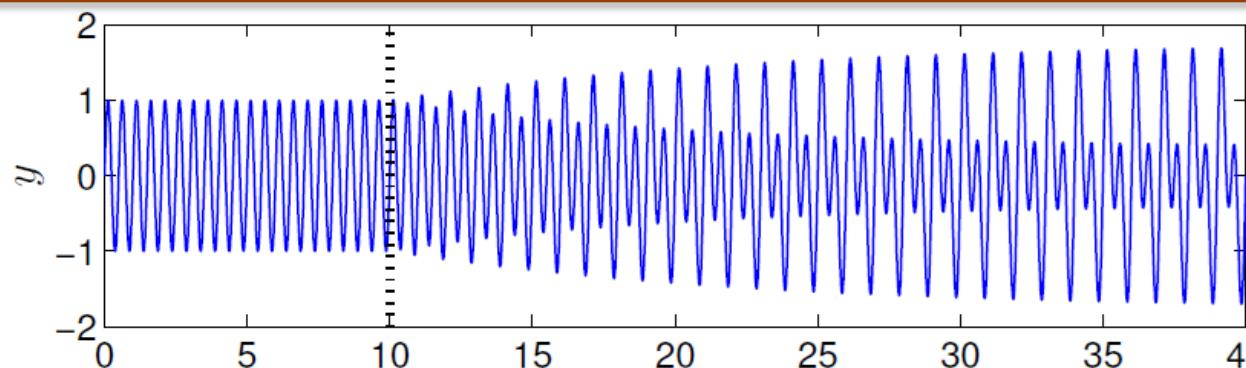
Izločanje frekvence



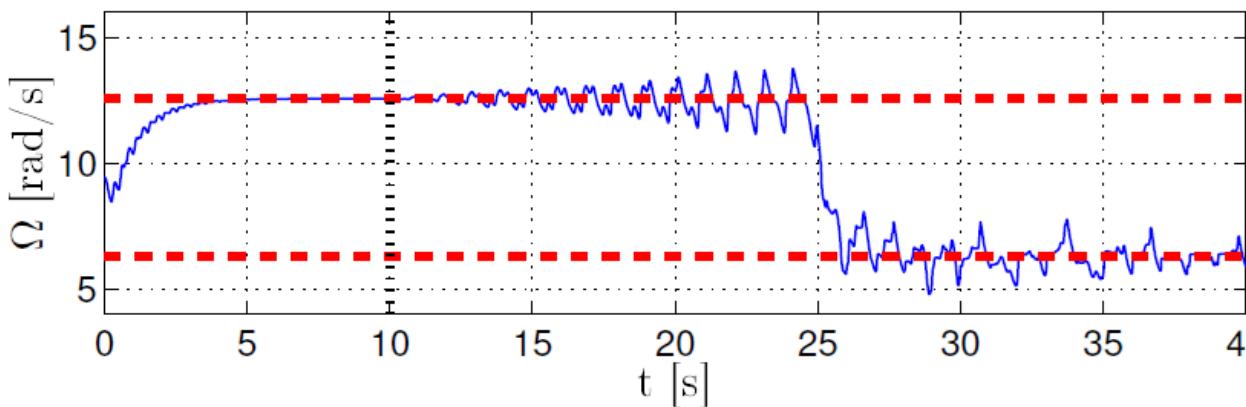
- Parametri:
 - $\eta = 2$
 - $K = 20$
 - $M = 10$



Pojav dodatne frekvenčne komponente



- Parametri:
 - $\eta = 2$
 - $K = 20$
 - $M = 10$

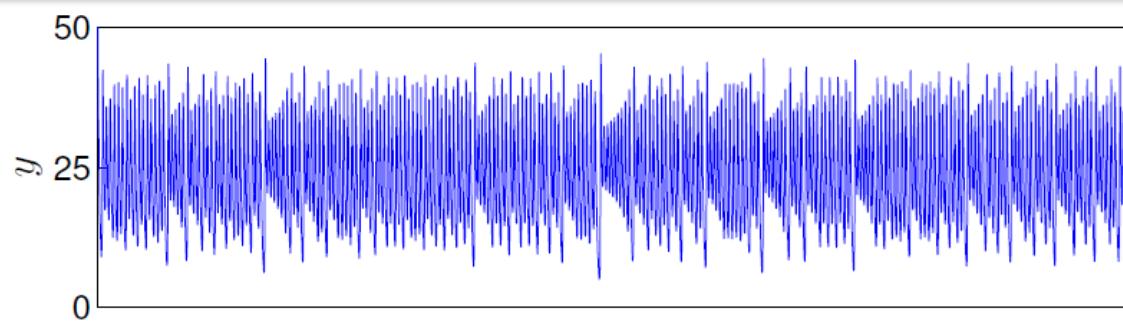


- Vhodni signal:

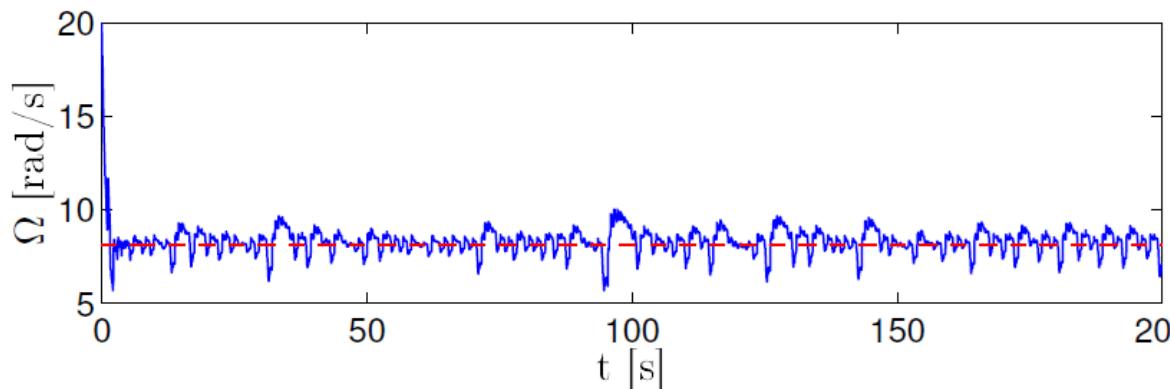
$$y(t) = \begin{cases} \sin(4\pi t) & t \leq 10 \\ \sin(4\pi t) + (1 - e^{-0.035t})\sin(2\pi t) & t > 10 \end{cases}$$



Konvergenca na psevdo-periodičen signal



- Parametri:
 - $\eta = 2$
 - $K = 20$
 - $M = 10$



- Lorenzov sistem:
$$\begin{aligned}\dot{a} &= -\sigma a + \sigma b, \\ \dot{b} &= -ac + ra - b, \\ \dot{c} &= ab - \beta c,\end{aligned}$$
- Vhodni signal:
$$y = c$$
- Iskana frekvenca:
$$\begin{aligned}8.27 \text{ rad/s} \\ \sim 1.3 \text{ Hz}\end{aligned}$$

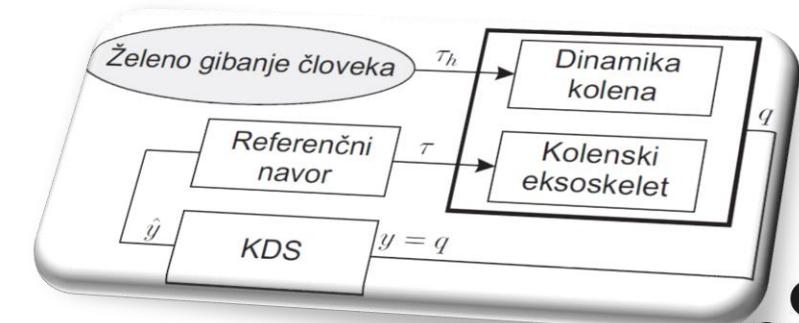


VODENJE ROBOTSKEGA EKSOSKELETA



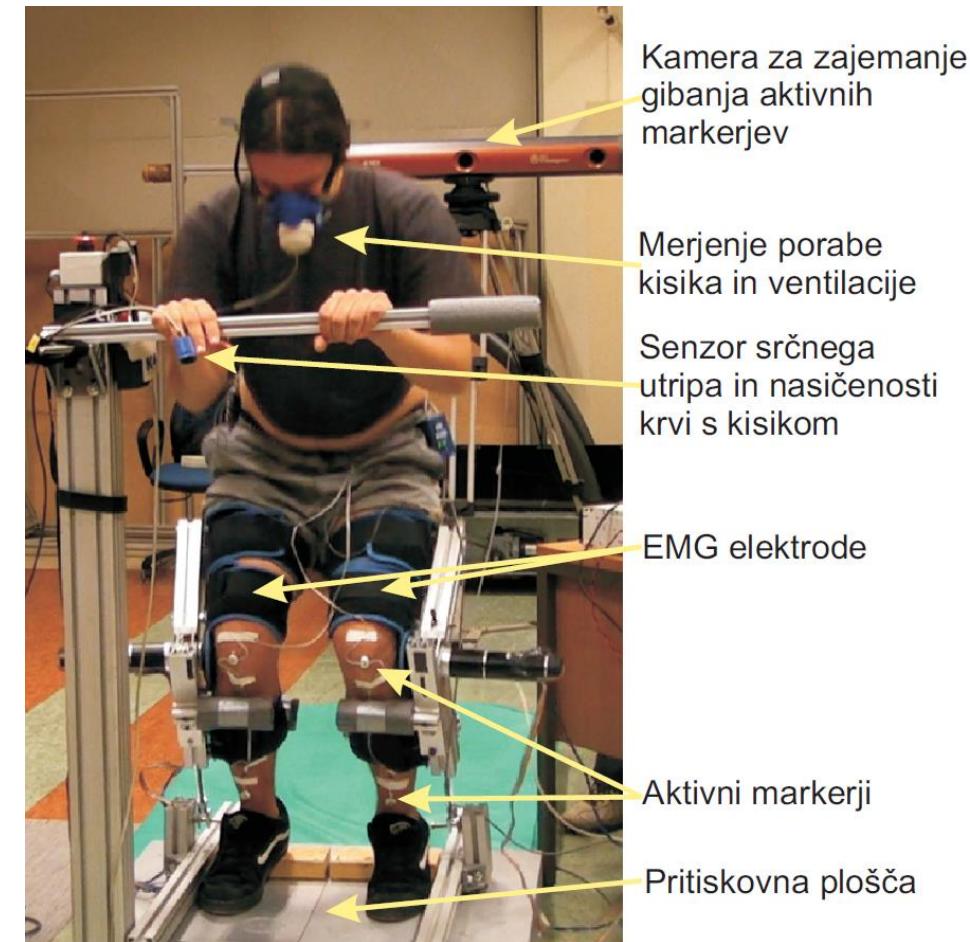
Vodenje robotskega eksoskeleta

- Motivacija – State-of-the-art
 - EMG, Živčevje, Možgani
 - Slabosti
 - Nezanesljivo merjenje signalov
 - Potrebna kalibracija sistema
- Uporaba KDS-ja
 - Ne invaziven sistem
 - Ne potrebuje kalibracije

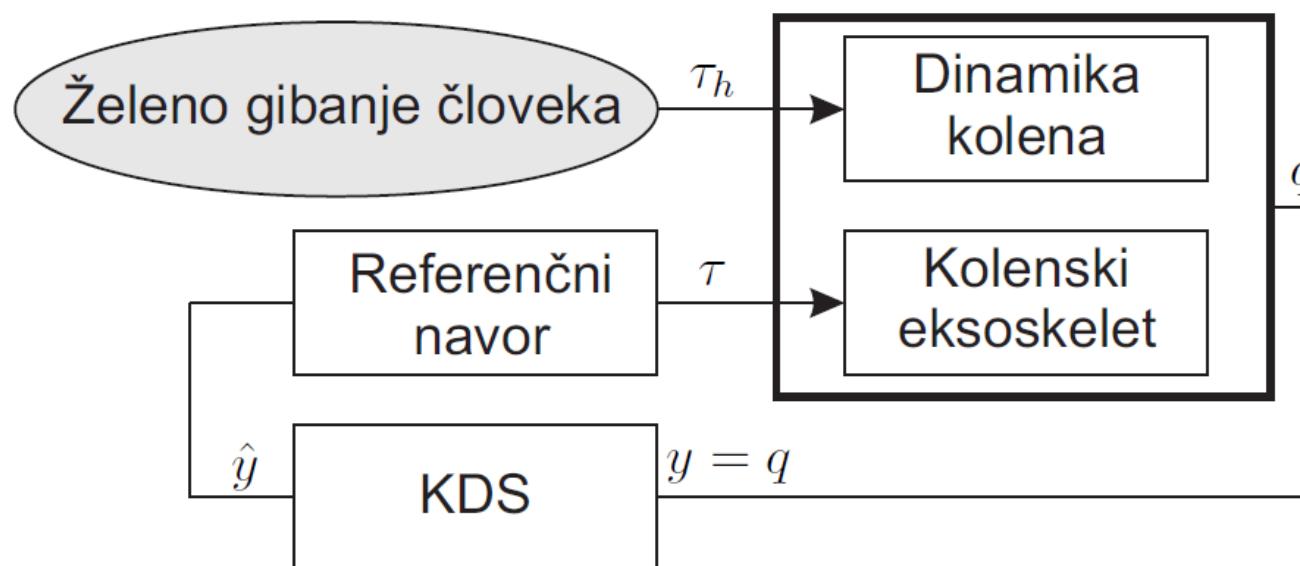


Eksperimentalni sistem

- Fiziološke meritve
 - Srčni utrip (HR)
 - Poraba kisika (VO₂)
 - Ventilacijo zraka v minuti (VE)
 - Nasičenost krvi (SpO₂)
 - Elektromiografske meritve (EMG)
- Meritve kinematike in dinamike
 - Vizualni sistem
 - Pritisakovne plošče



Shema vodenja



Blokovna shema vodenja z uporabo KDS-ja in referenčnega navora.

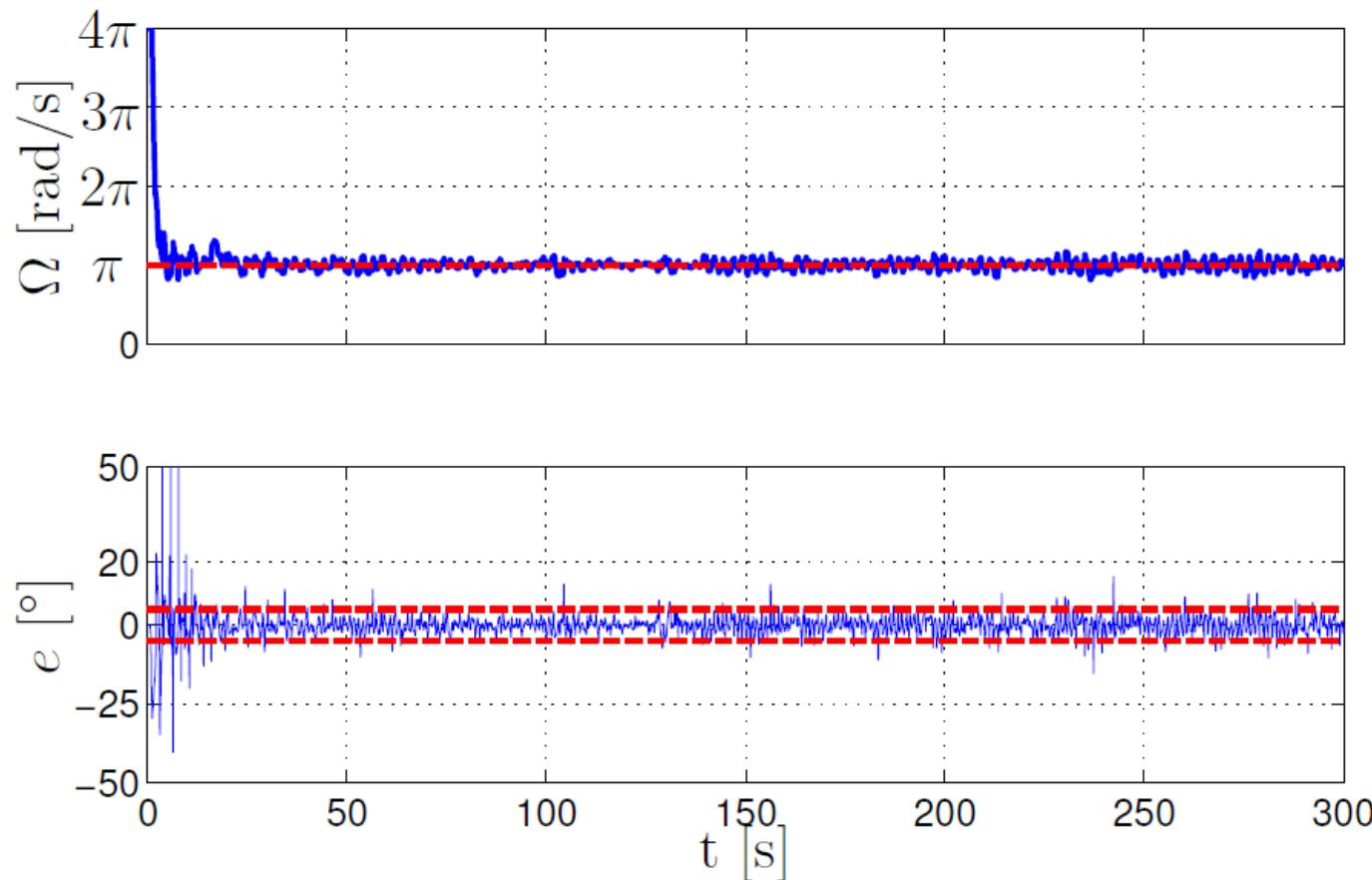


Osnovni podatki testirancev

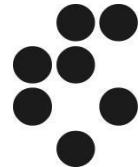
	Povprečje	Standardna deviacija (SD)
Leta	28.6	2.7
Teža (kg)	79.3	3.7
Višina (cm)	182.9	3.7
Indeks telesne mase (ITM)	23.7	1.7



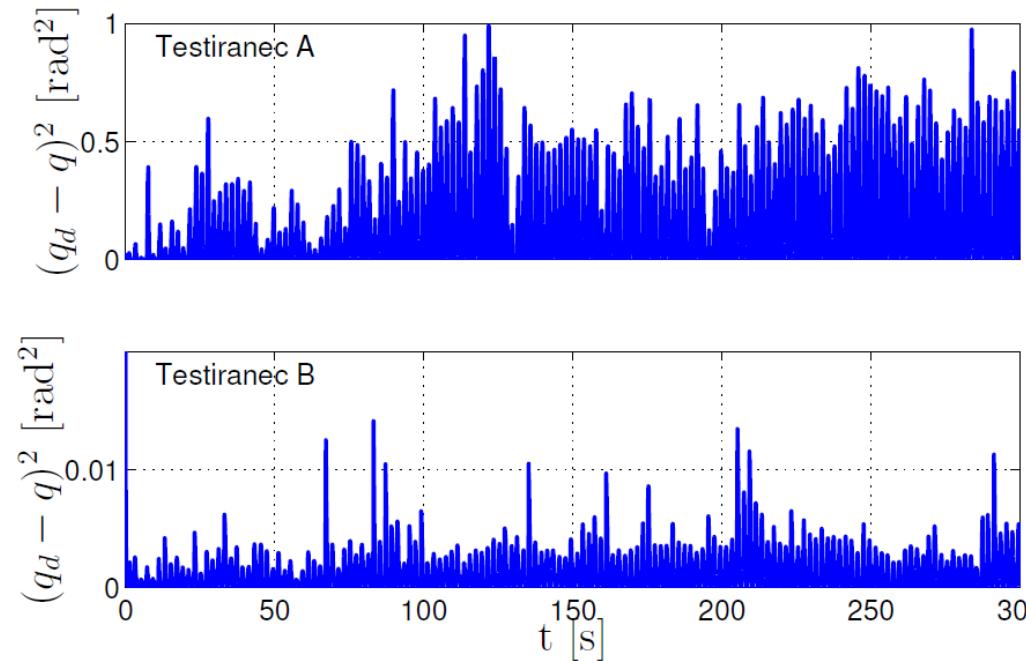
Rezultati – KDS



KDS je uspešno izločil pravilno frekvenco počepanja in se s tem prilagodil vsem testirancem



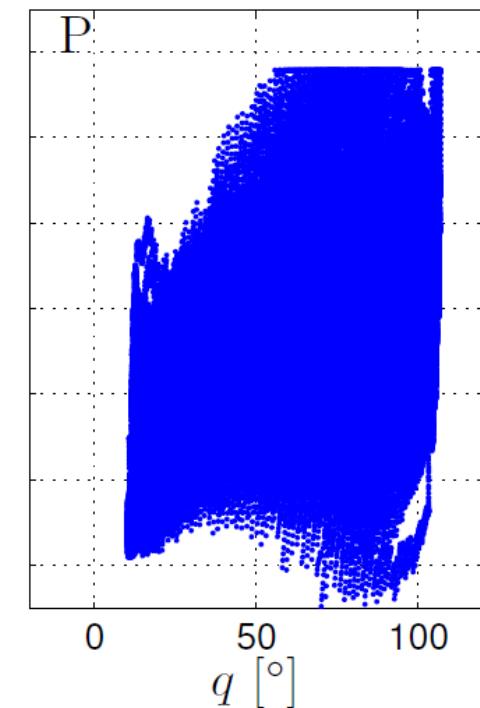
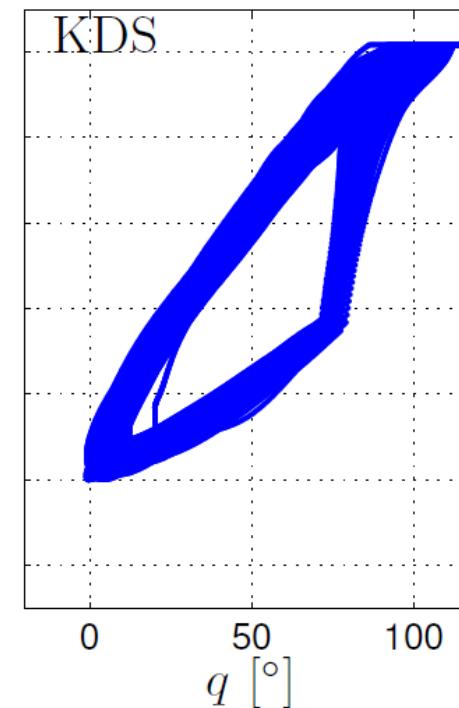
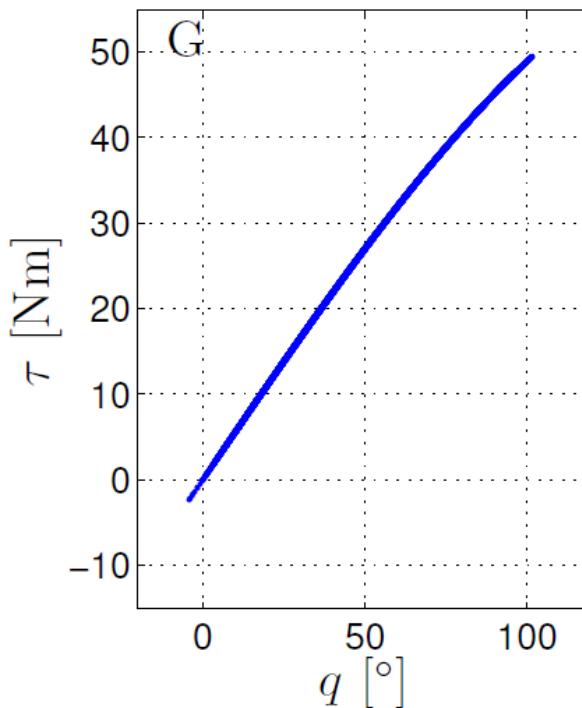
Rezultati – Položajno vodenje



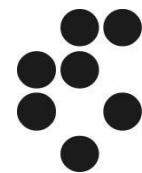
- Skala na drugem grafu je manjša za dva razreda
- Različno fazno usklajena
- Testiranec A je izkoristil ponujen navor
- Testiranec B je izvajal počepe brez pomoči robotskega eksoskeleta.



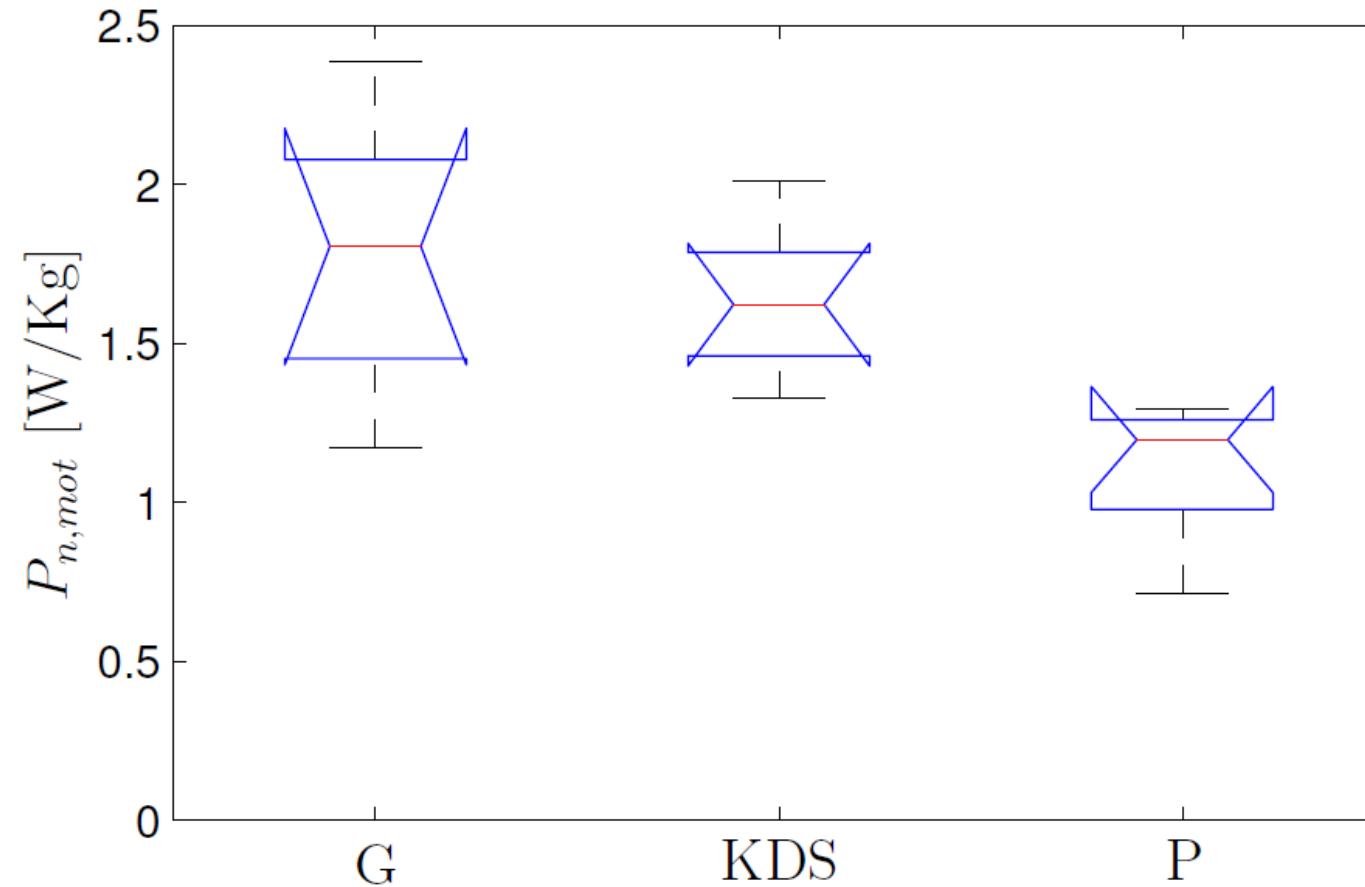
Rezultati



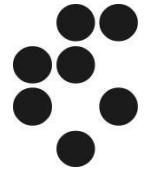
Navor kot funkcija kota v kolenu



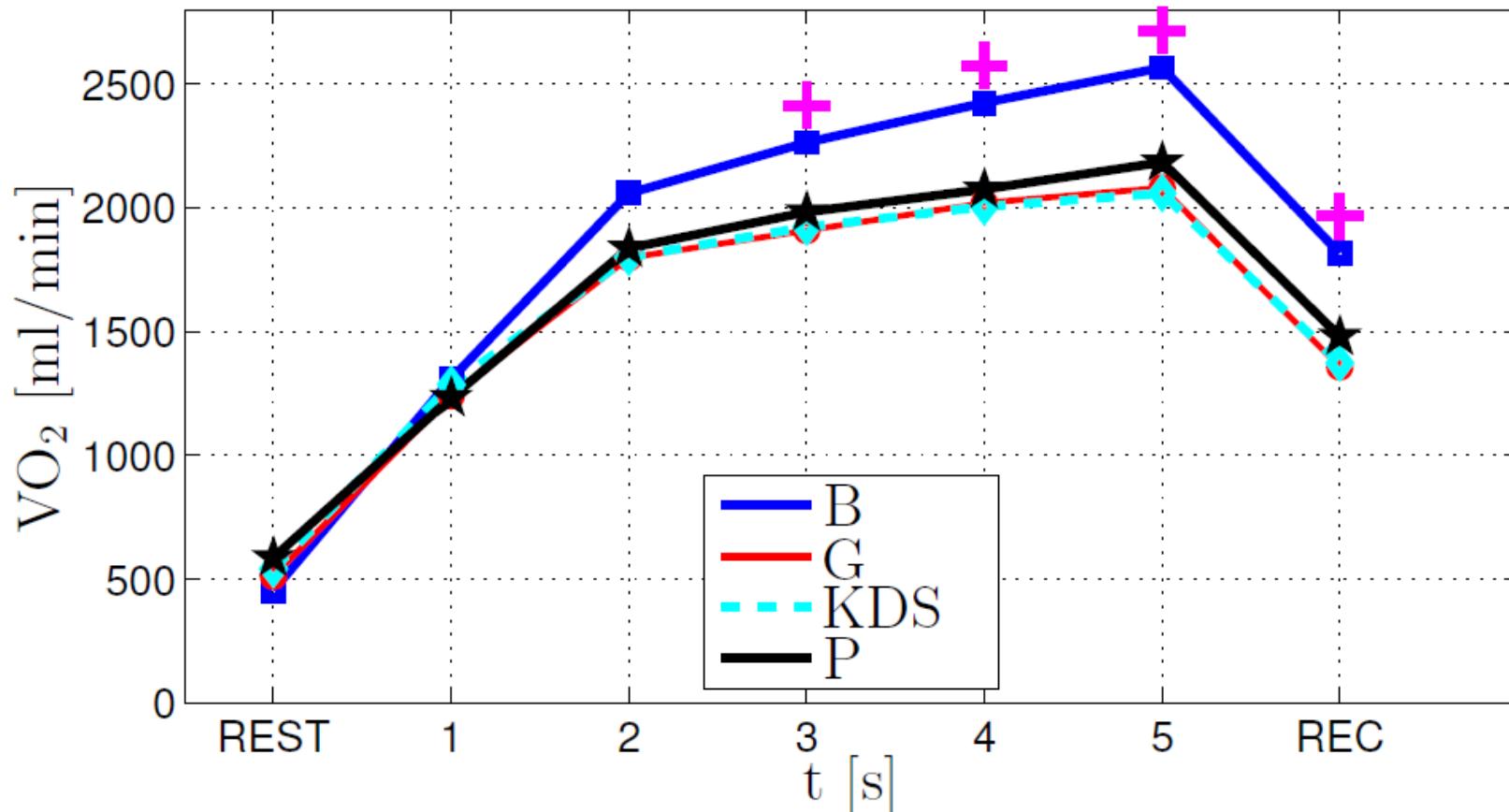
Energija



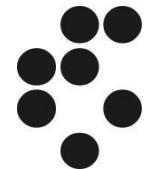
Poraba energije kolenskega robotskega eksoskeleta na kilogram telesne teže testiranca



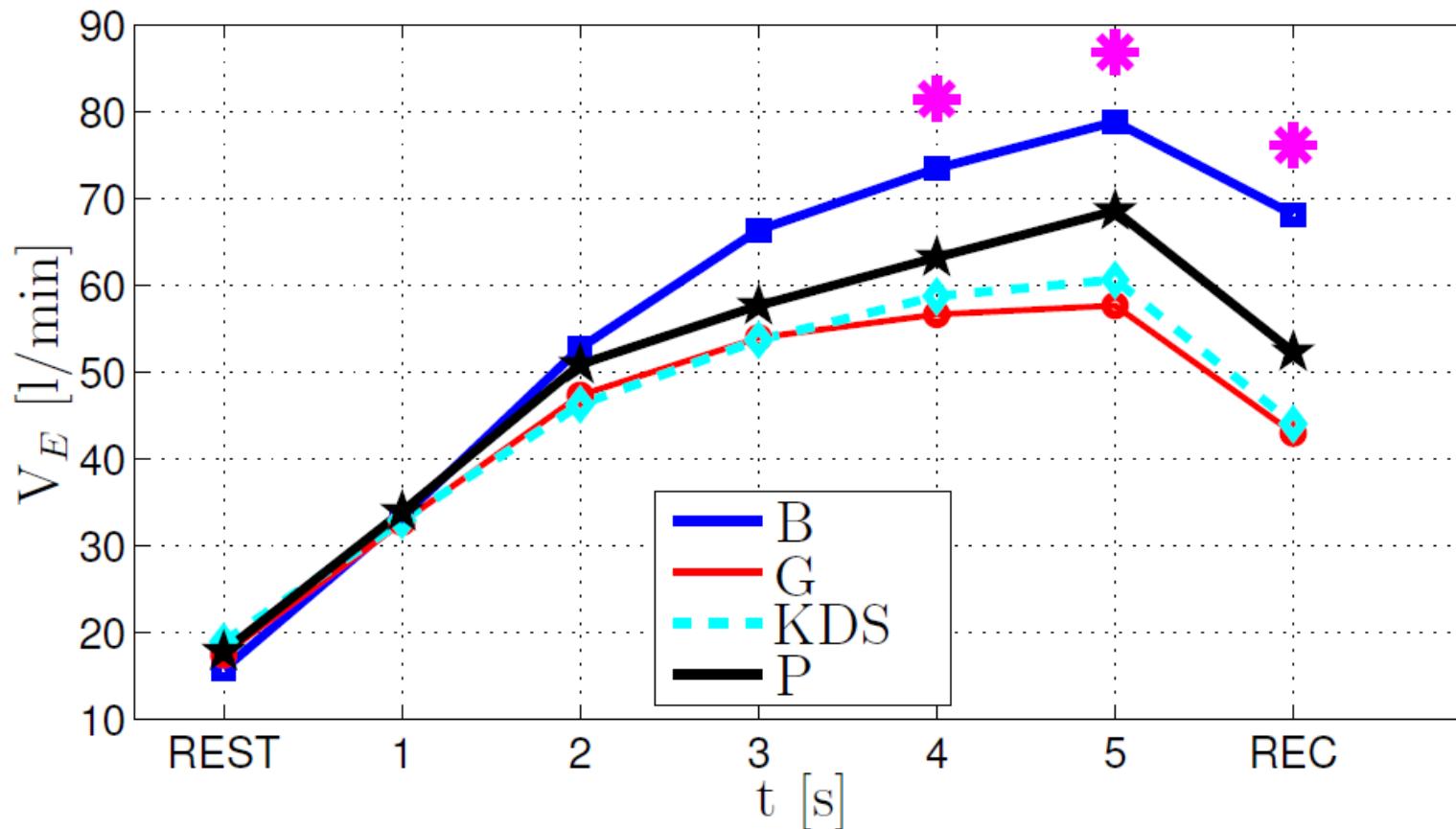
Fiziološki rezultati



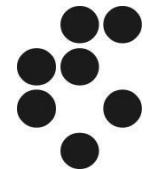
Povprečna poraba kisika testirancev pri izvajanju vaje počepanja.



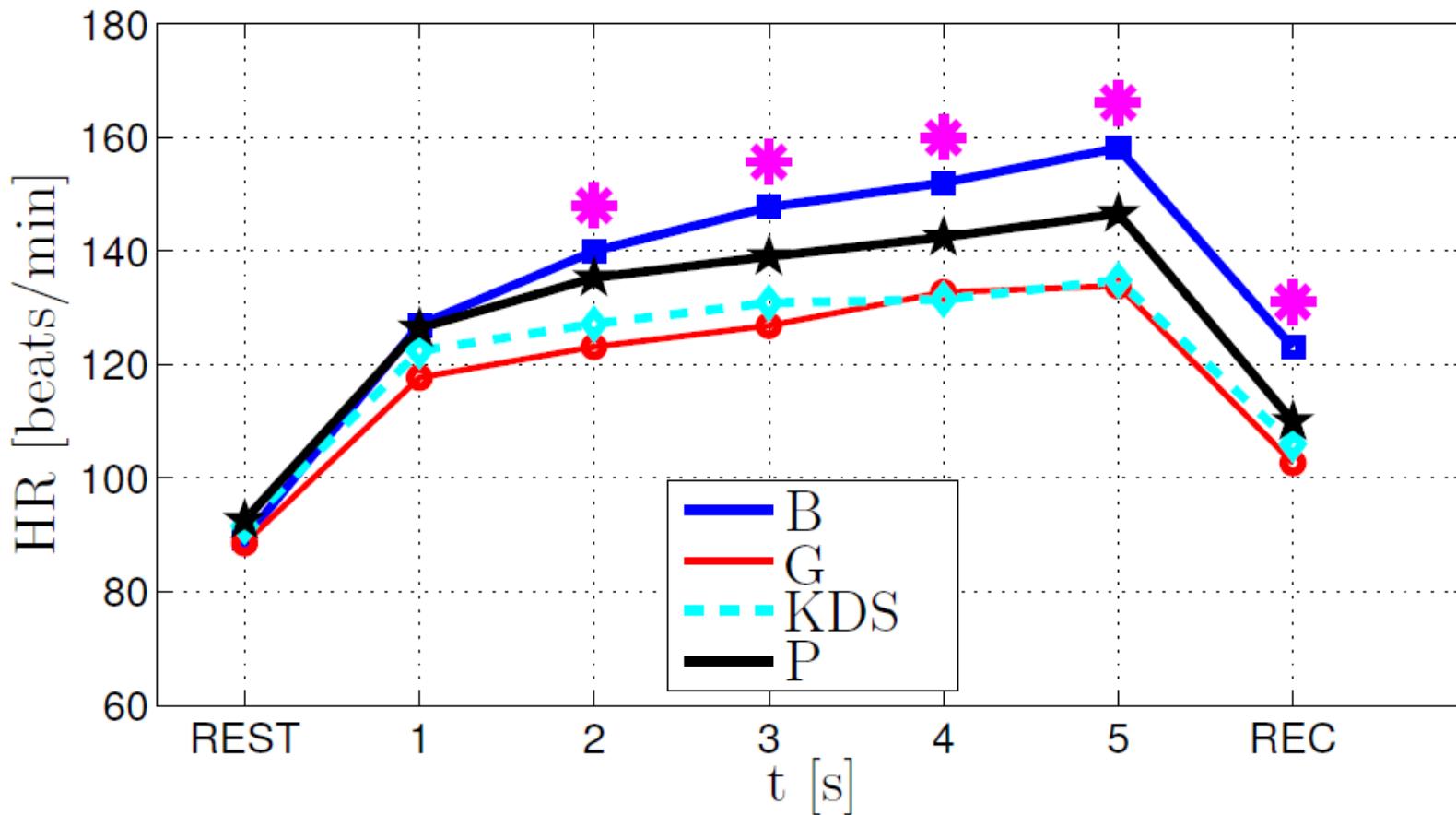
Fiziološki rezultati



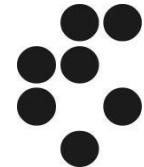
Povprečna vrednost ventilacije zraka v minuti med izvajanjem vaje počepanja.



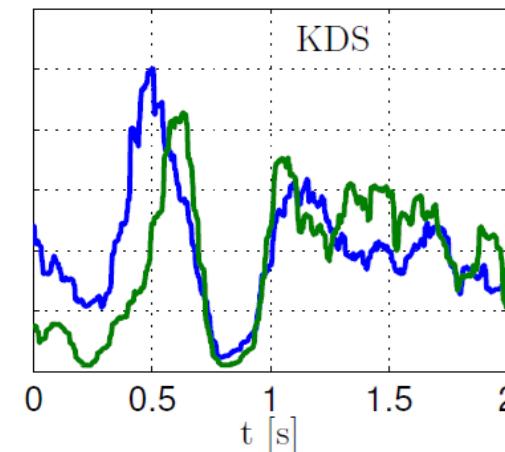
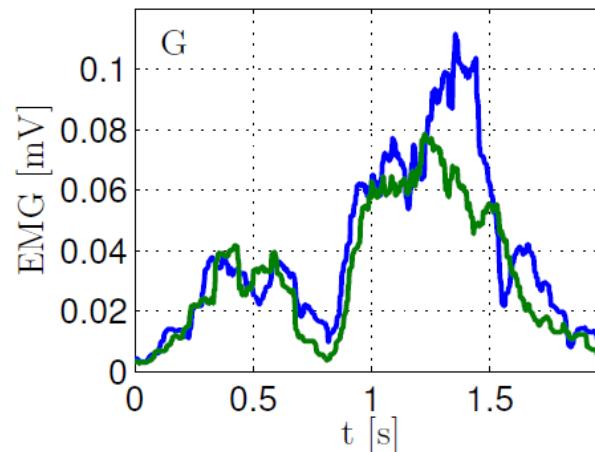
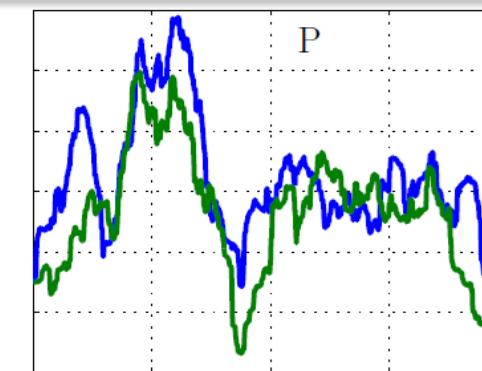
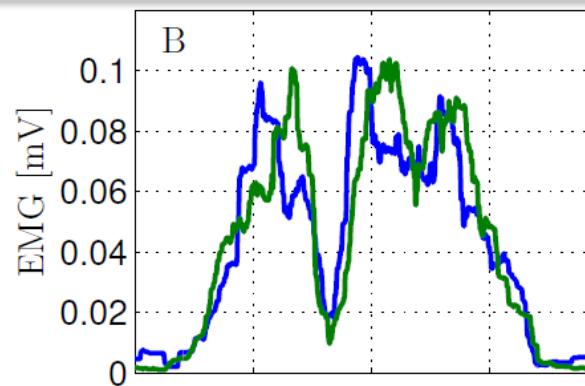
Fiziološki rezultati



Povprečna vrednost srčnega utripa testirancev med izvajanjem vaje počepanja.



Fiziološki rezultati



Ovojnice merjenega EMG-signala enega povprečnega signala na polovici 5-minutne serije za vse 4 serije počepanja.



Video

