

Jernej Perdan

Urjenje in ocenjevanje senzomotoričnih sposobnosti roke

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor: izr. prof. dr. Roman Kamnik



Univerza *v Ljubljani*
Fakulteta *za elektrotehniko*

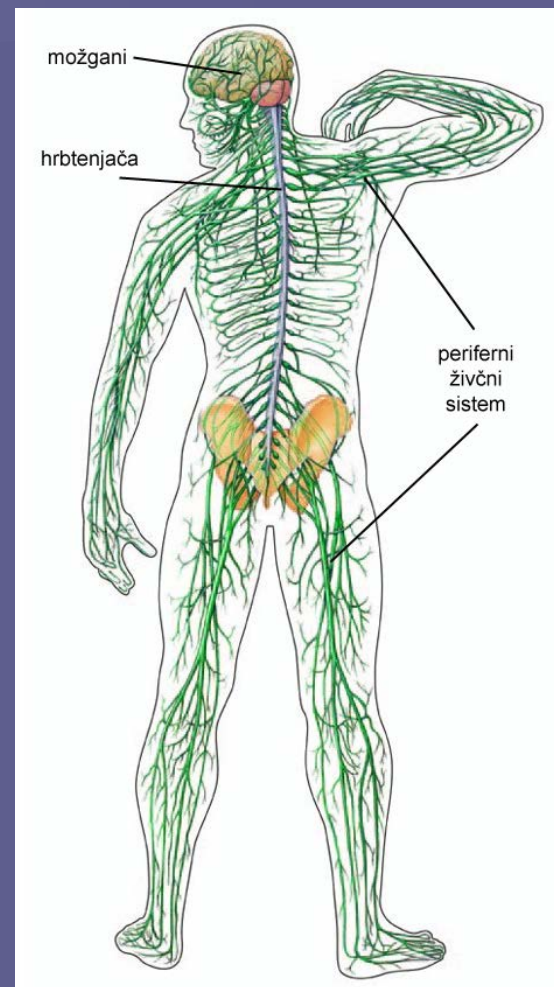


Potek predstavitve

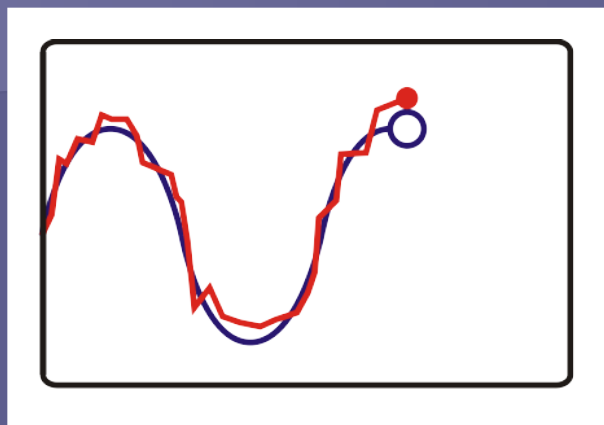
- Uvod
- Delo disertacije
 - Vadba z nalogami sledenja in FES
 - Evalvacija TENS terapije dermatomov
 - Naprava za urjenje roke v dinamičnih pogojih
- Originalni prispevki disertacije

Uvod

- Prijemanje in manipulacija s predmeti
- Usklajeno delovanje človeškega senzorično-motoričnega sistema
- Delna ali popolna okvara senzoričnih in motoričnih sposobnosti roke zaradi poškodbe ali bolezni OŽS
- Zmanjšana funkcijska sposobnost roke
- Terapevtske vaje
- Ocena okvare pomembna za načrtovanje terapije, ugotavljanje njene ustreznosti in oceno napredka
- Funkcijski testi



Naloge sledenja sile



○ referenčna sila

● dejanska sila

- Ocena senzorično-motoričnih sposobnosti roke
- Napaka sledenja ($rrmse$) objektivni pokazatelj o senzorično-motoričnih sposobnostih

$$rrmse = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{k=1}^{k=n} \frac{(F_{ref}(t_k) - F_{izm}(t_k))^2}{\max(F_{ref})^2}}$$

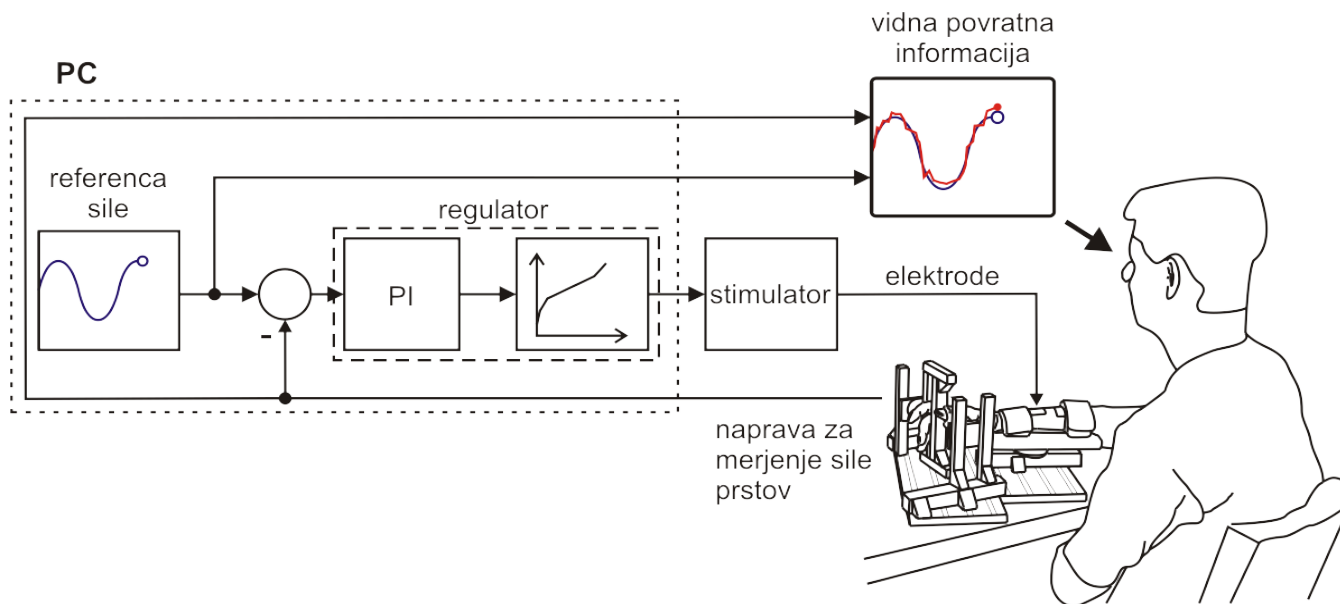
- Urjenje nadzora prijema

Električna stimulacija

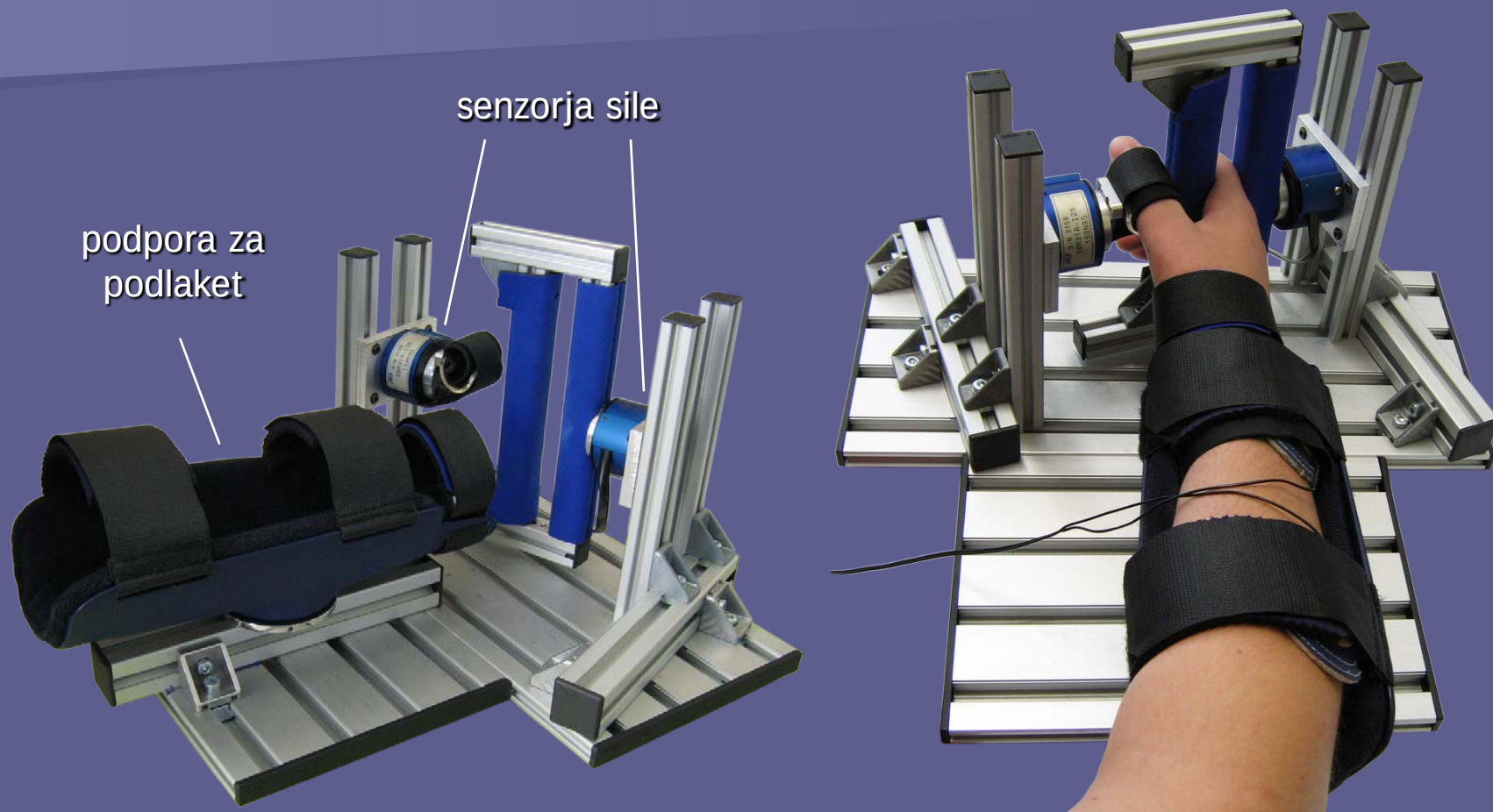
- Izboljšanje motoričnih in funkcijskih sposobnosti roke zaradi funkcionalne električne stimulacije (FES)
- FES kot pomoč pri izvedbi gibov
- Uspešnost kombinacije hotenega napora osebe in FES
- Spastičnost: motnja senzorično-motoričnega nadzora zaradi poškodbe zgornjega motoričnega nevrona, zaradi česar pride do nenamernih aktivacij mišic, ki se pojavljajo v presledkih ali so stalno prisotne
- Vpliv električne stimulacije na zmanjšanje spastičnosti mišic (kratkotrajni in dolgotrajni vpliv)
- Prevodna rokavica za stimulacijo roke
- Zmanjšanje spastičnosti in izboljšanje motoričnih sposobnosti roke

Vadba z nalogami sledenja in FES

Sistem za urjenje roke



Naprava za merjenje sile prstov



Električna stimulacija



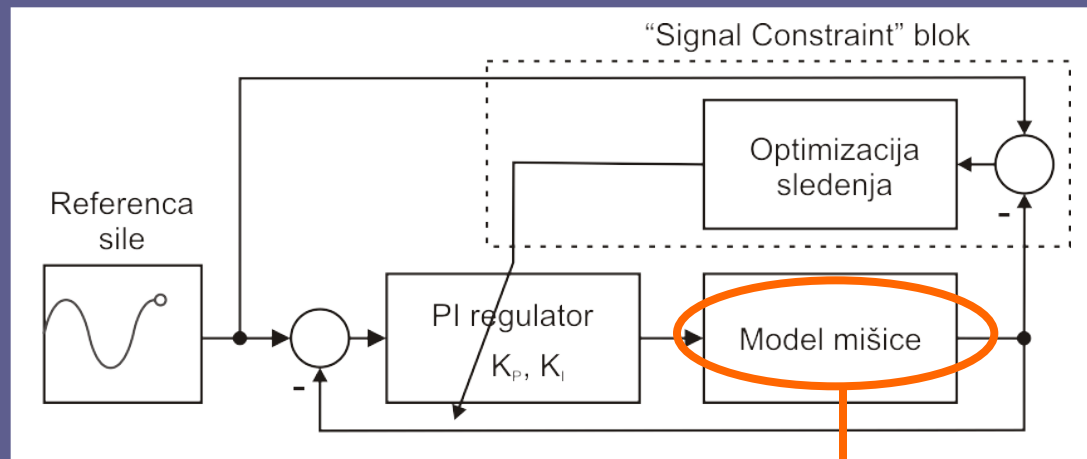
stimulacijski
kanali

serijska povezava
z osebnim
računalnikom

- FES je vodena zaprtozančno.
- Stimulator je voden s pomočjo osebnega računalnika preko serijske povezave RS-232.
- Uporabljena sta 2 kanala (fleksorji, ekstenzorji).
- Monofazni tokovni impulzi:
Ampl: 0 – 100 mA,
PW: 0 – 1,3 ms (0 – 500 μ s)
- Frekvenca stimulacije: 33 Hz

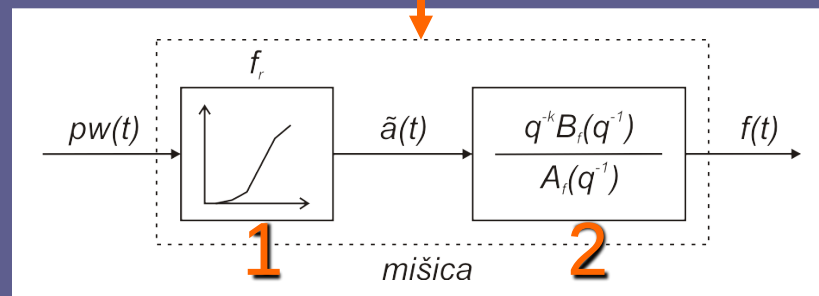
Zaprtozančno vodenje FES

- Proporcionalno-integrirni (PI) regulator
- Določitev obeh ojačenj regulatorja K_p in K_i

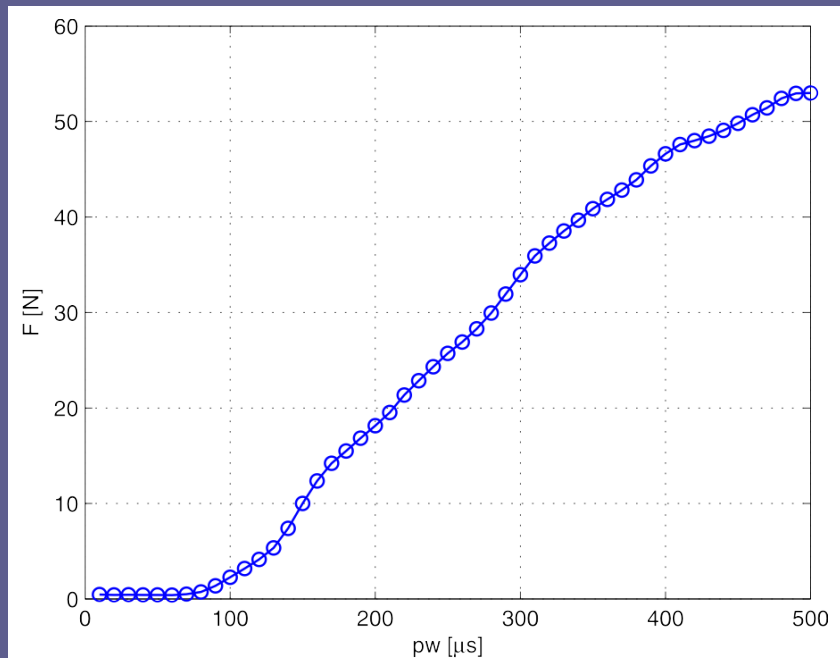
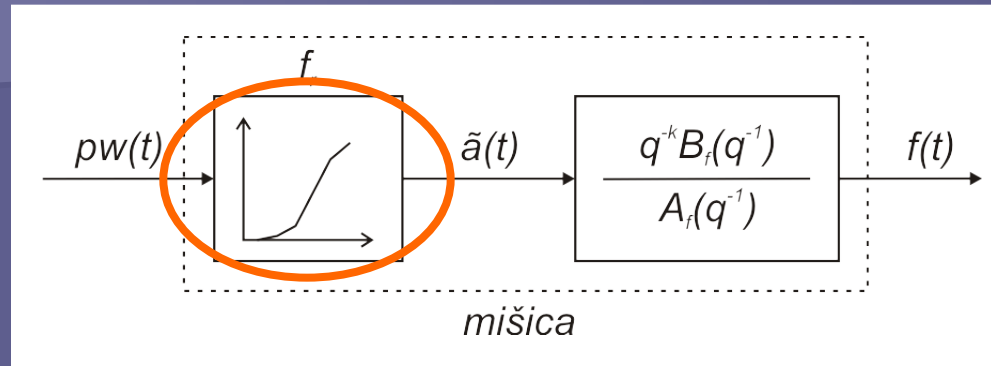


Hammersteinov model:

- 1 - statična nelinearnost
- 2 - linearna diskretna prenosna funkcija

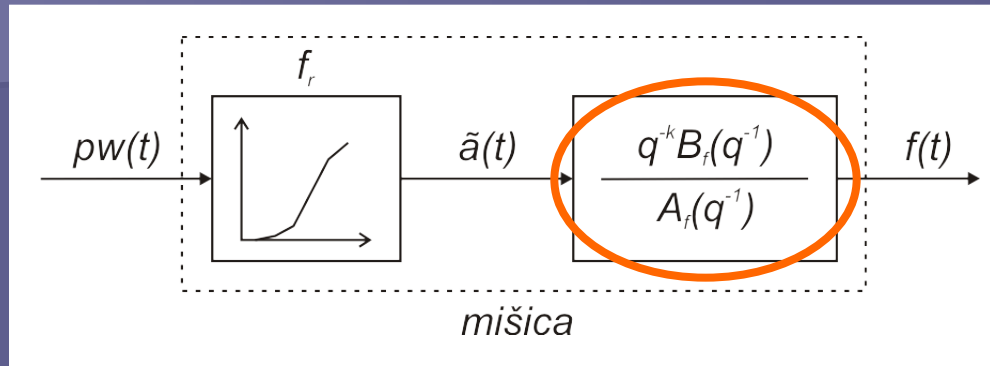


Model mišice



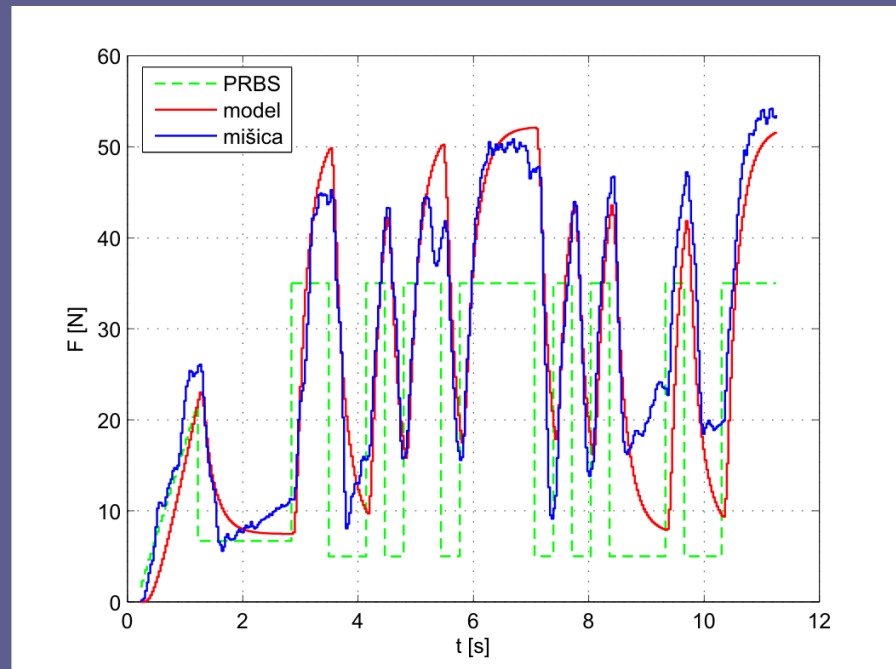
- Pet meritev odziva na linearno naraščajoč signal
PW: 0 – 500 μs
Ampl: konst.
- Povprečenje petih meritev

Model mišice



- Izmerjen odziv na PRBS signal
- Odziv in PRBS signal sta vhodna parametra v *arx* Matlab funkcijo

$$\frac{q^{-1}(b_0 + b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2})}{1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + a_3 q^{-3}}$$



Preizkus sistema

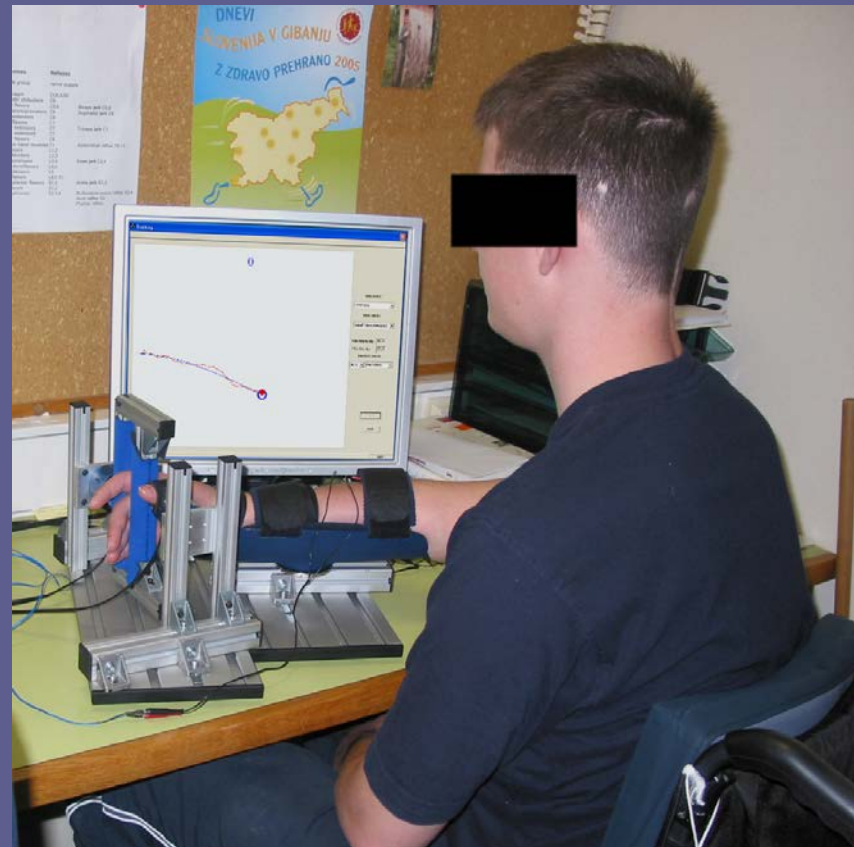
- 5 zdravih oseb
- 4 dni
- Vsak dan naloga sledenja
 - 3× fleksorji
 - 3× ekstenzorji
- Zadnji dan preizkus zaprtozančno vodene FES

	hoteno	FES
FL	$0,22 \pm 0,06$	$0,47 \pm 0,15$
EK	$0,41 \pm 0,17$	$0,46 \pm 0,33$



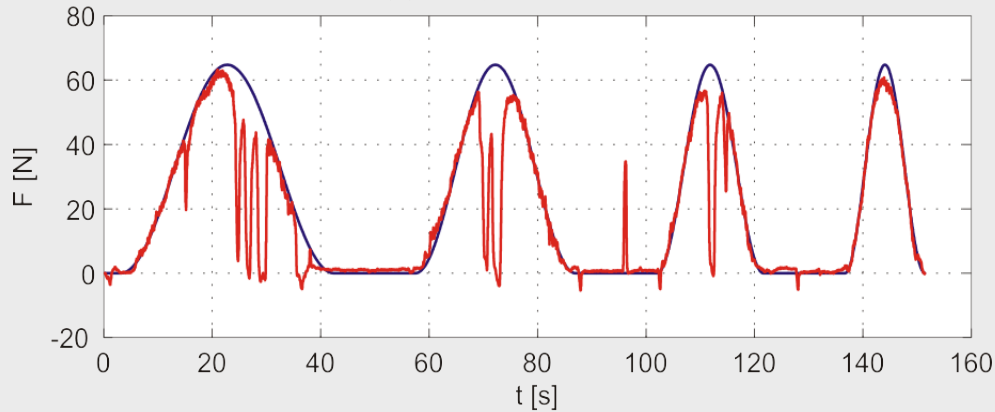
Klinični preizkus sistema

- 2 osebi s tetraparezo v kroničnem stanju (P1 - 4 leta, P2 - 8 mesecev po nesreči)
- Trajanje urjenja desne roke: 4 tedne
- Naloge:
 - maksimalna hotena sila (1×EK, 1×FL)
 - sledenje sile (3×EK, 3×FL)
 - Naloga A (hoteno)
 - Naloga B (hoteno + FES)



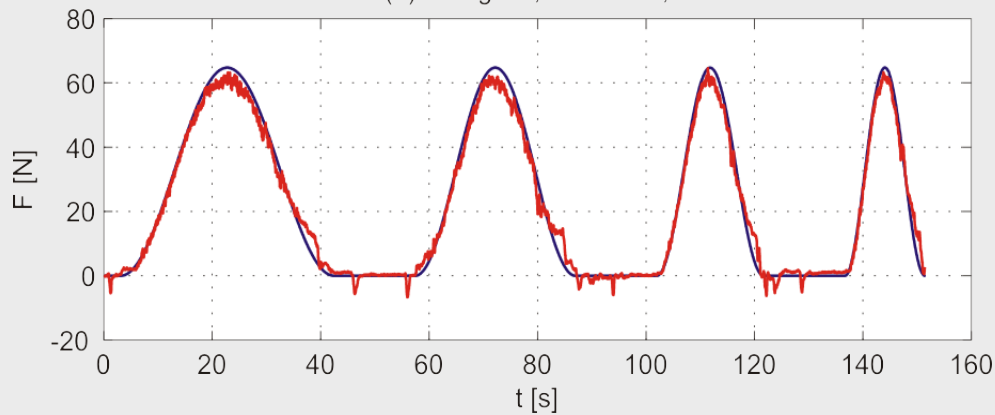
Rezultati – primer sledenja

(a) *Naloga A*, rmse = 2.46



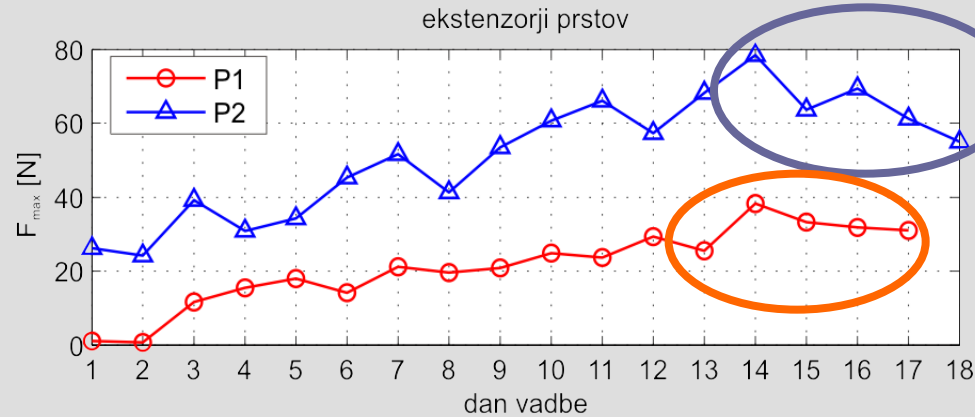
hoteno sledenje

(b) *Naloga B*, rmse = 0,51



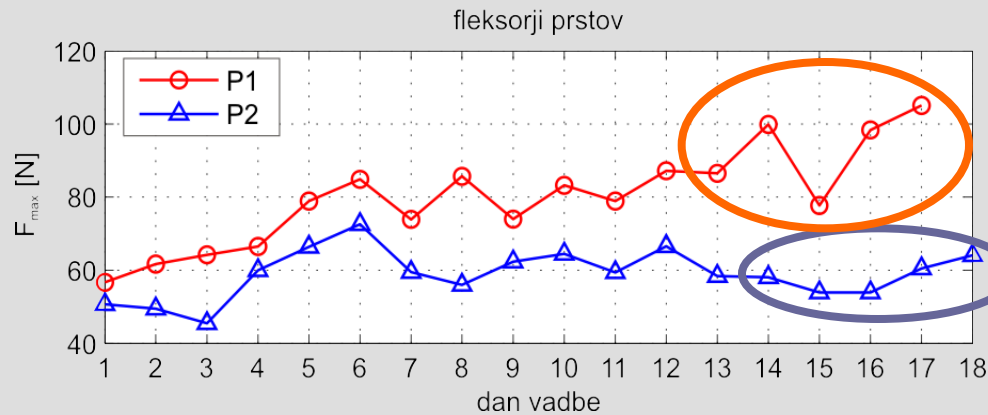
kombinacija hotenega
sledenja in FES

Rezultati – maksimalna sila $F_{\max}$



65,5 N (108% $F_{\max}$ zdravih)

32,0 N (52% $F_{\max}$ zdravih)

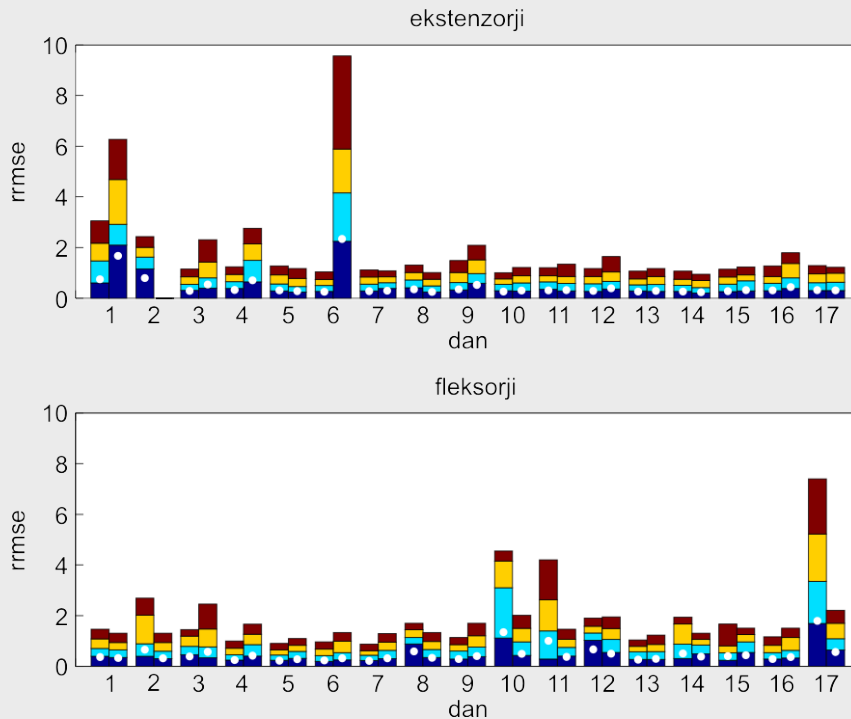


93,5 N (63% $F_{\max}$ zdravih)

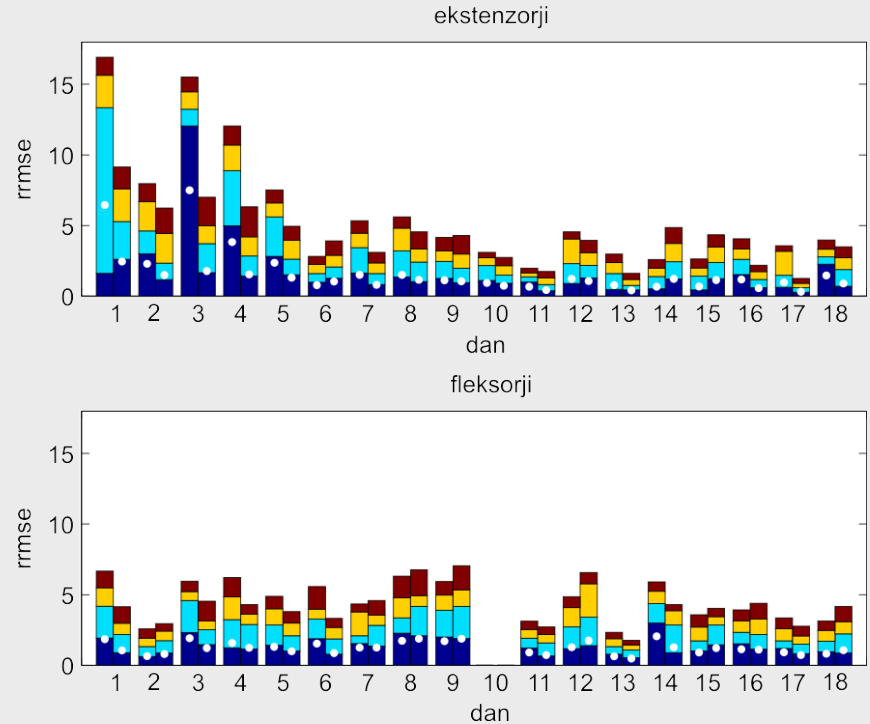
58,1 N (38% $F_{\max}$ zdravih)

Rezultati – napaka sledenja rmse

P1



P2

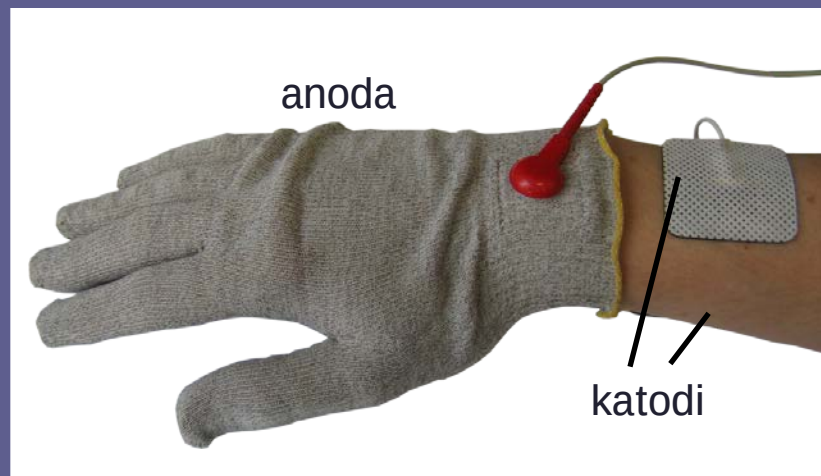
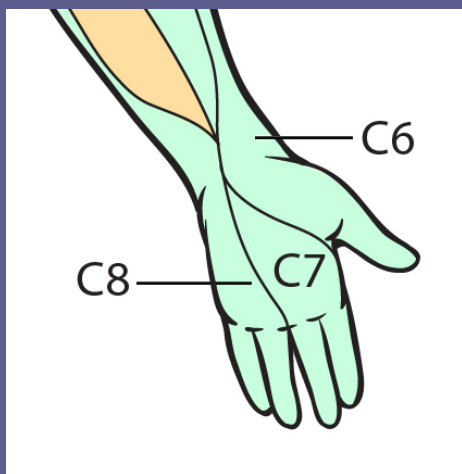


	zdravi	P1	P2
fleksorji	$0,22 \pm 0,06$	$0,67 \pm 0,83$	$1,20 \pm 0,78$
ekstenzorji	$0,41 \pm 0,17$	$0,29 \pm 0,05$	$1,02 \pm 0,60$

Evalvacija TENS terapije dermatomov

Transkutana električna nevrostimulacija dermatomov

- TENS - transkutana električna nevrostimulacija (zdravljenje bolečine)
- Dermatom – kožno področje, ki ga oživčujejo aferentni aksoni iz istega spinalnega živca
- Dermatomi roke pripadajo nivojem C6 – C8



- Nivoji C6 – C8 pripadajo tudi motoričnim aksonom mišic ektenzorjev in fleksorjev prstov ter zapestja
- Predpostavka: električna stimulacija aferentnih vlaken pripomore k sinaptični reorganizaciji in poveča prispevek ostalih motoričnih struktur

TENS terapija

- 2 osebi s tetraparezo v akutnem stanju (3, 4 mesece po nesreči)
- Čas TENS terapije:
4 tedne (20 min/dan)
- Parametri TENS:
 - monofazni tokovni impulzi
 - frekvenca: 50 Hz
 - PW: 200 μ s
 - amplituda: na meji praga zaznavanja stimulacije



Evalvacija TENS terapije

■ Tri faze:

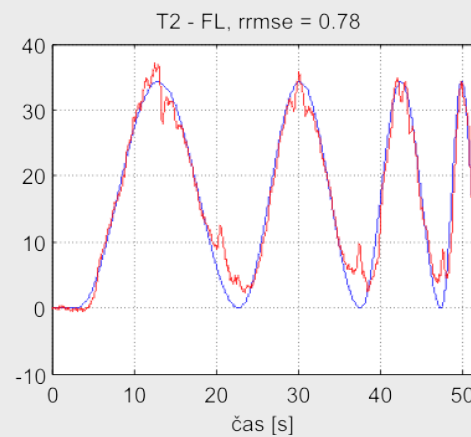
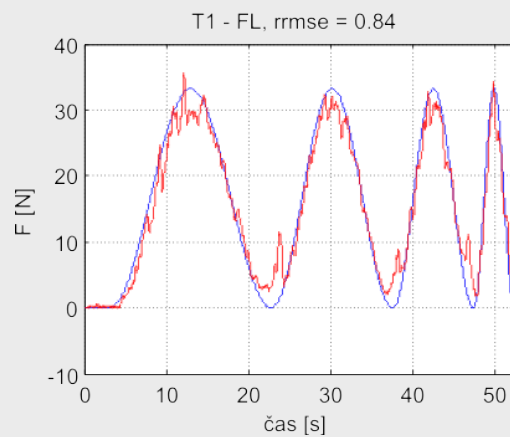
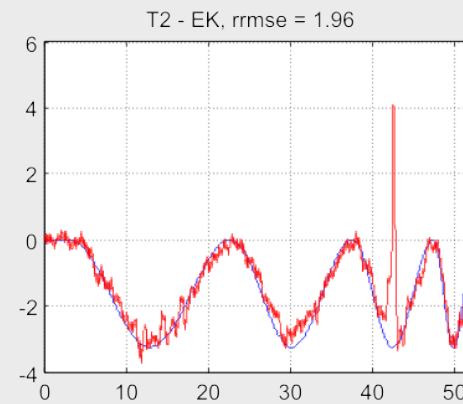
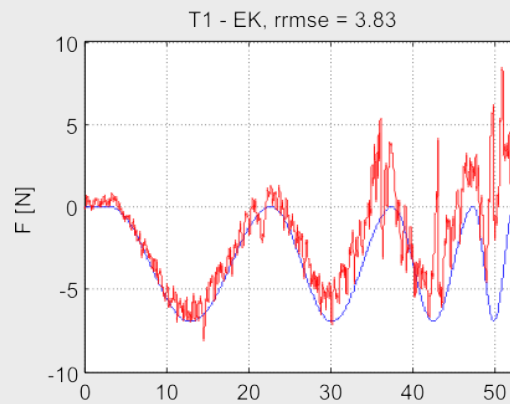
- faza pred terapijo (2 zaporedna dneva)
- terapevtska faza (4 tedne, 5 dni/teden)
- faza po terapiji (2 dneva)

■ Štiri evalvacijske metode:

- | | | |
|-------------------------------------|---|--|
| – Maksimalna sila | } | 3 × dnevno
trenutni vpliv TENS terapije |
| – Naloga sledenja | | |
| – Funkcijski test roke po Jebsenu | } | 2 × tedensko
spremljanje dolgoročnega
napredka |
| – Modificirana Ashworthova lestvica | | |

■ Merjenje fleksorjev in ekstenzorjev prstov leve in desne roke

Rezultati – primeri sledenja



Rezultati – Modificirana Ashworthova lestvica

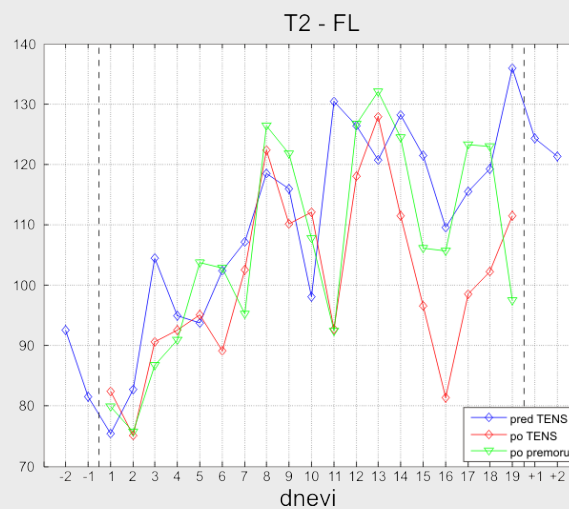
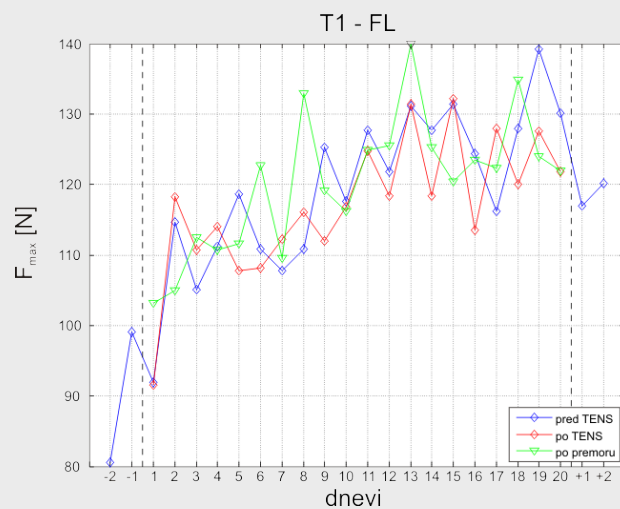
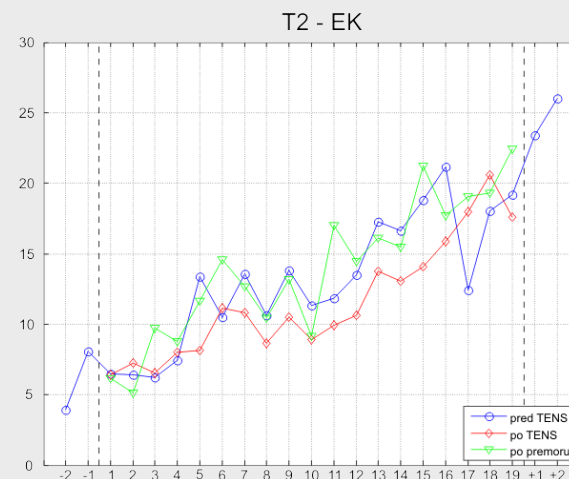
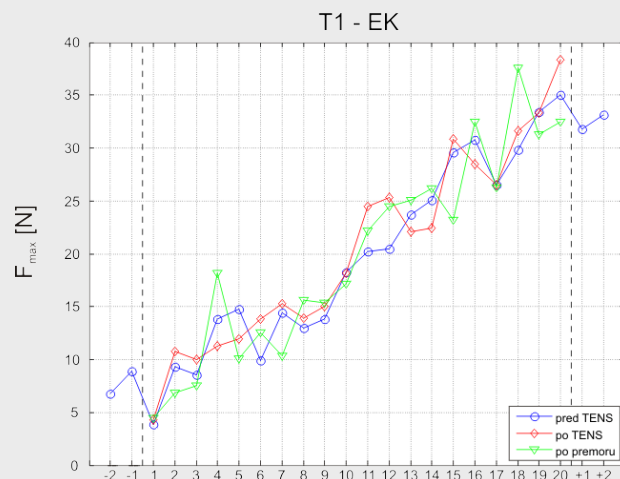
nedominantna roka

Pacient	Mišice	Teden 1	Teden 2	Teden 3	Teden 4	Po terapiji
T1	EK	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
	FL	2, 2	2, 2	2, 2	2, 2	2, 2
T2	EK	4, 4	4, 3	3, 3	3, 3	3, 3
	FL	4, 4	4, 3	3, 3	3, 3	3, 3

dominantna roka

Pacient	Mišice	Teden 1	Teden 2	Teden 3	Teden 4	Po terapiji
T1	EK	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
	FL	1, 1	1, 1	1, 1	1, 1	1, 1
T2	EK	3, 3	3, 2	2, 2	2, 2	3, 3
	FL	3, 3	3, 2	2, 2	2, 2	3, 3

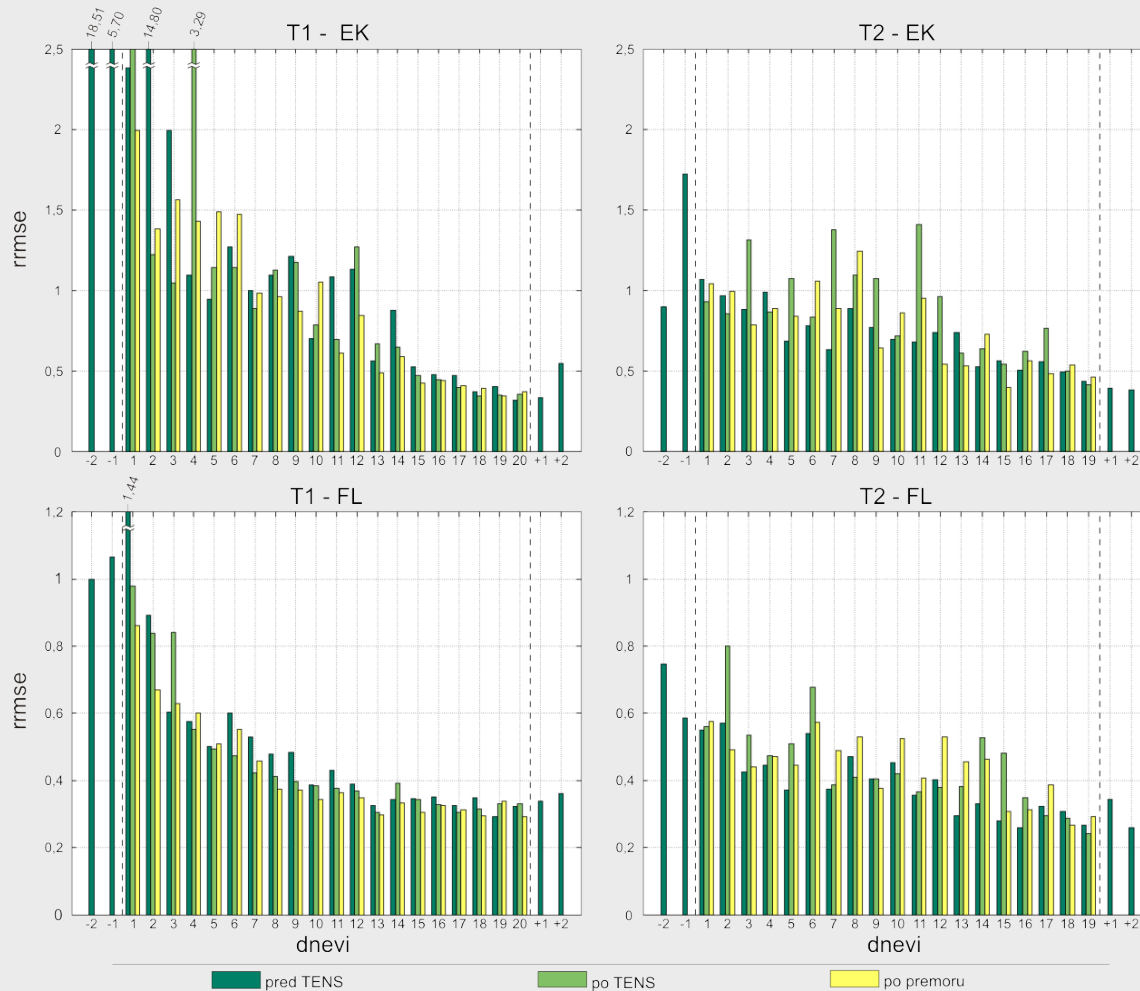
Rezultati – Maksimalna sila



Rezultati – Maksimalna sila

- Izboljšanje motoričnih sposobnosti roke
- Konstanten napredek pri ekstenzorjih nedom. roke
- Razlika med nedominantno in dominantno roko (5-10 N in 25-30 N) v začetku
- Večja sila s fleksorji dominantne roke kot z nedominantno
- Vpliv TENS na maksimalno silo različen pri obeh pacientih

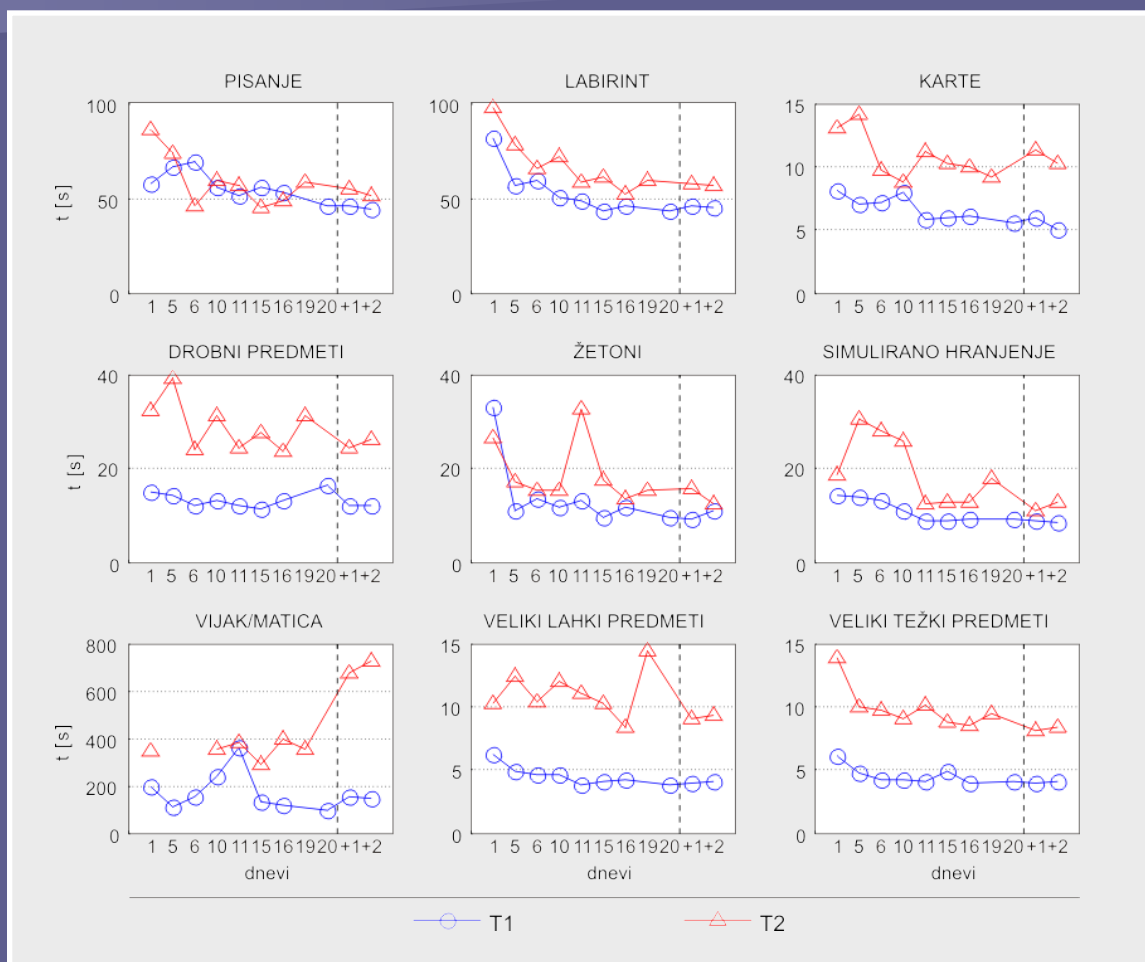
Rezultati – Naloga sledenja



Rezultati – Naloga sledenja

- Izboljšana sposobnost sledenja sile pri obeh pacientih, za obe roki in obe mišični skupini
- Boljše sledenje, tj. manjša napaka *rrmse*, s fleksorji kot z ekstenzorji prstov (sovpada z meritvami na zdravih osebah)
- T1 – rezultati sledenja variirajo iz dneva v dan za ekstenzorje
- T2 – rezultati sledenja variirajo za obe mišični skupini
- Vpliv TENS pri obeh različen
 - T1 – po TENS približno enako sledenje kot pred TENS
 - T2 – po TENS v večini primerov dosegala slabše rezultate sledenja

Rezultati – Funkcijski test roke po Jebsenu



Rezultati – Funkcijski test roke po Jebsenu

- Izboljšanje funkcijskih sposobnosti roke pri obeh pacientih za obe roki
- Manjša funkcionalnost roke osebe T2 v primerjavi z osebo T1 (ASIA, Modificirana Ashworthova lestvica)
- Razlika bolj opazna za dominantno roko
- Boljši rezultati z dominantno roko

Statistična analiza

- Spearmanov koeficient korelacije (Jebsen-Maksimalna sila, Jebsen-Naloga sledenja)
- Na podlagi rezultatov ne moremo govoriti o statistični povezanosti med nalogama, ki temeljita na merjenju sil prstov, in funkcijskim testom roke
- Izjema podtest *labirint* (visoka povezanost z Nalogo sledenja za nedominantno roko)

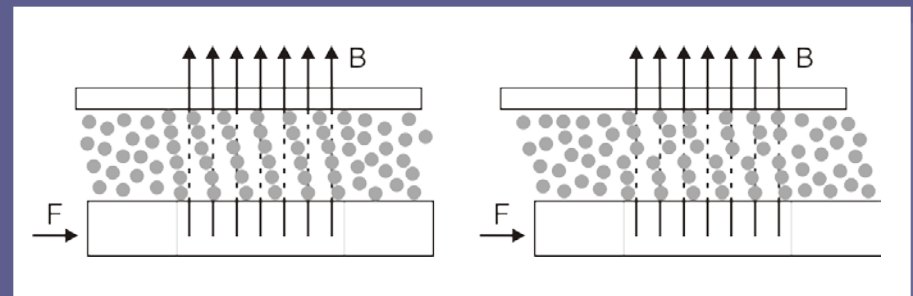
Ugotovitve

- Napredek senzorično-motoričnih in funkcijskih sposobnosti rok obeh pacientov
- Vpliv TENS terapije na senzorično-motorične sposobnosti v splošnem različen za oba pacienta
- Primerjava podatkov vseh štirih evalvacijskih metod kaže, da so si metode komplementarne.

Naprava za urjenje roke v dinamičnih pogojih

Magnetoreološka naprava

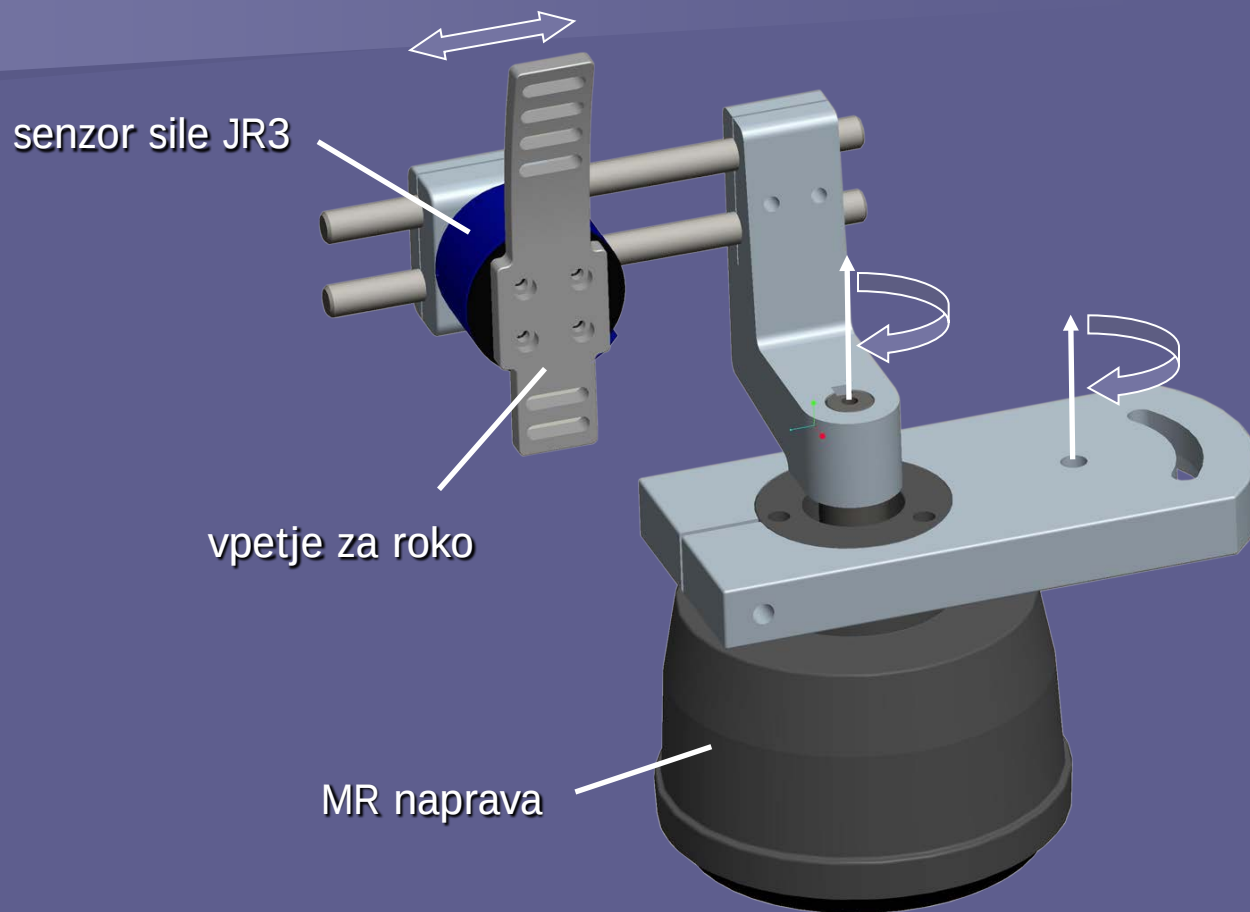
- Realizacija dinamičnih pogojev z magnetoreološko (MR) napravo (TFD RD-8053-1 Lord Corp.)
- Rotacijski tip (strižni način delovanja)
- MR tekočine pod vplivom magnetnega polja spreminjajo reološke značilnosti (elastičnost, plastičnost, viskoznost)
- Napajanje: 2-25 V, 1-2 A
- Moment: 14 ± 2 Nm pri 1,5 A
- Odzivni čas: ms
- Vgrajen absolutni pozicijski senzor
- Celoten moment:
$$M_b = M_{tr} + M_B + M_\eta$$



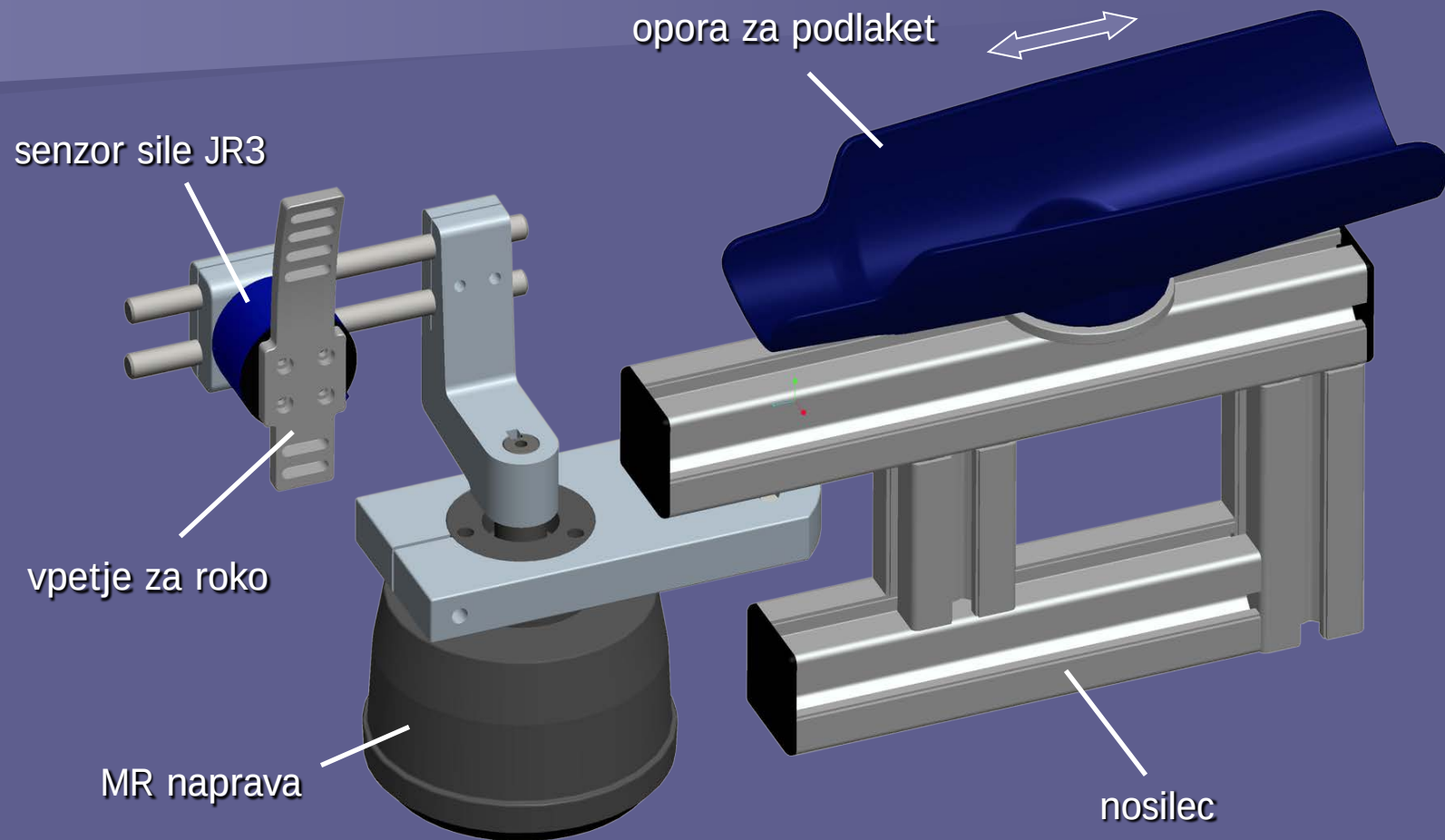
pod mejo tečenja

nad mejo tečenja

Konstrukcija naprave



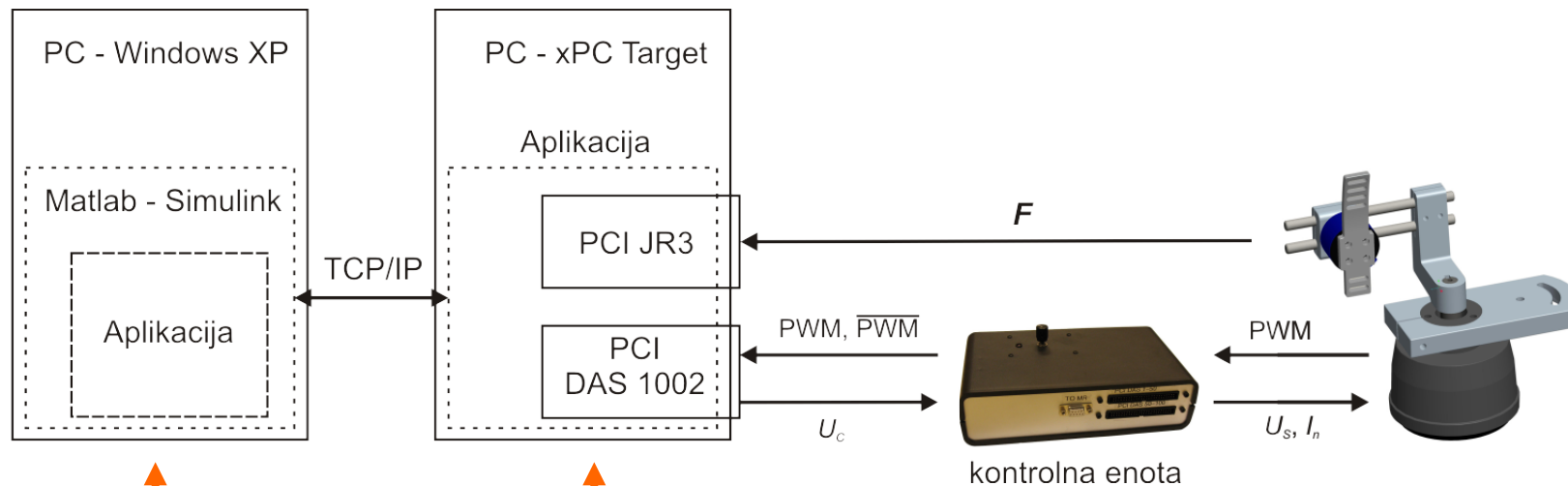
Konstrukcija naprave



Naprava za urjenje roke



Vodenje MR naprave



↑
razvojni
računalnik

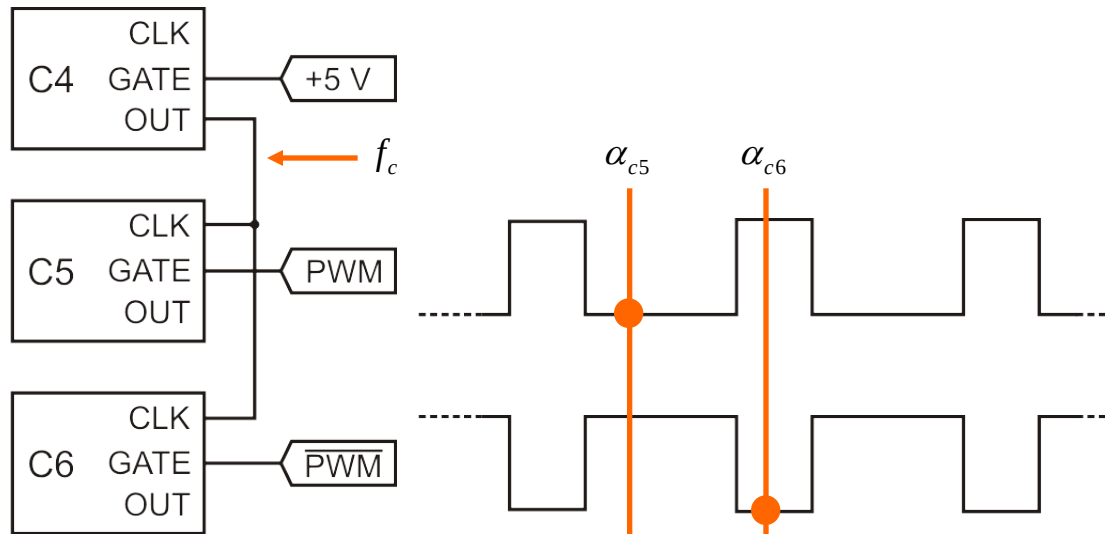
↑
ciljni
računalnik

razvoj aplikacije

MR sistem

Izračun kota MR naprave

- Izhodni signal senzorja zasuka MR naprave:
PWM signal ($f_{pwm} \sim 200$ Hz, 5% $T_{pwm} = 0^\circ$, 95% $T_{pwm} = 360^\circ$)
- Izračun kota s števci C4, C5, C6 na PCI DAS 1002



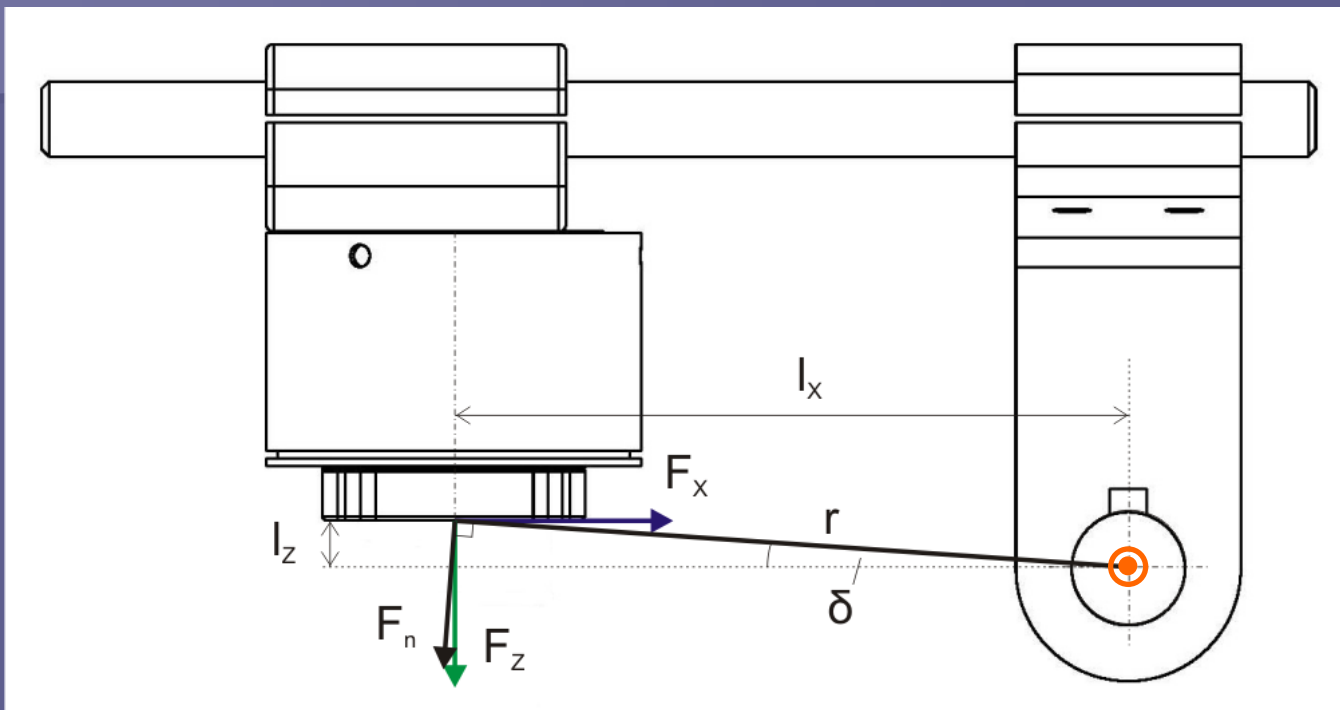
$$f_c = 399970 \text{ Hz}$$

$$\alpha_{c5} = 400 \frac{f_{pwm}}{f_c} n_{c5} - 20$$

$$\alpha_{c6} = 380 - 400 \frac{f_{pwm}}{f_c} n_{c6}$$

$$\alpha = \frac{\alpha_1 + \dots + \alpha_n}{n}$$

Izračun navora

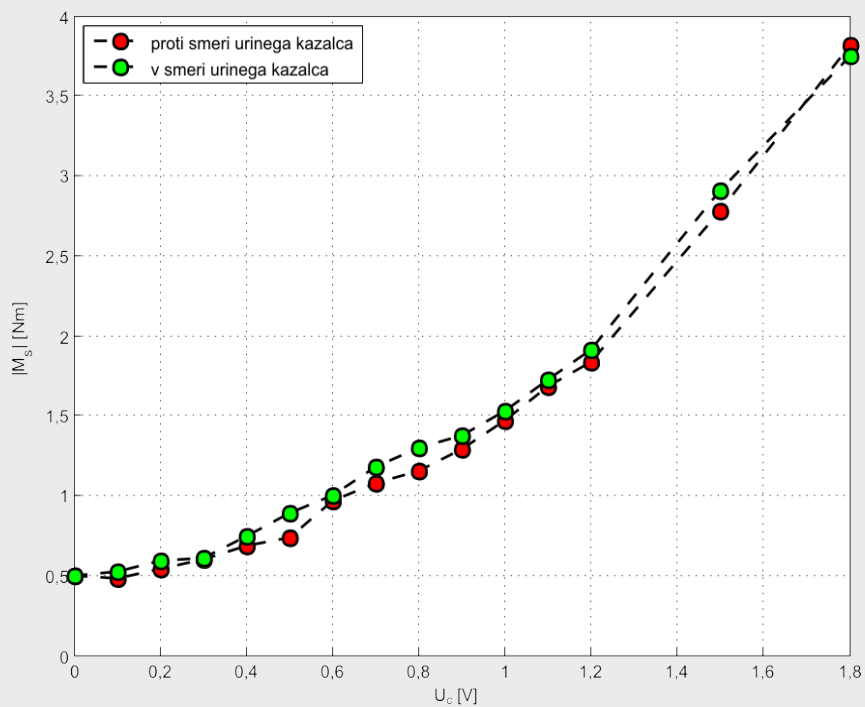


$$M = (F_x \sin \delta + F_z \cos \delta) \cdot r$$

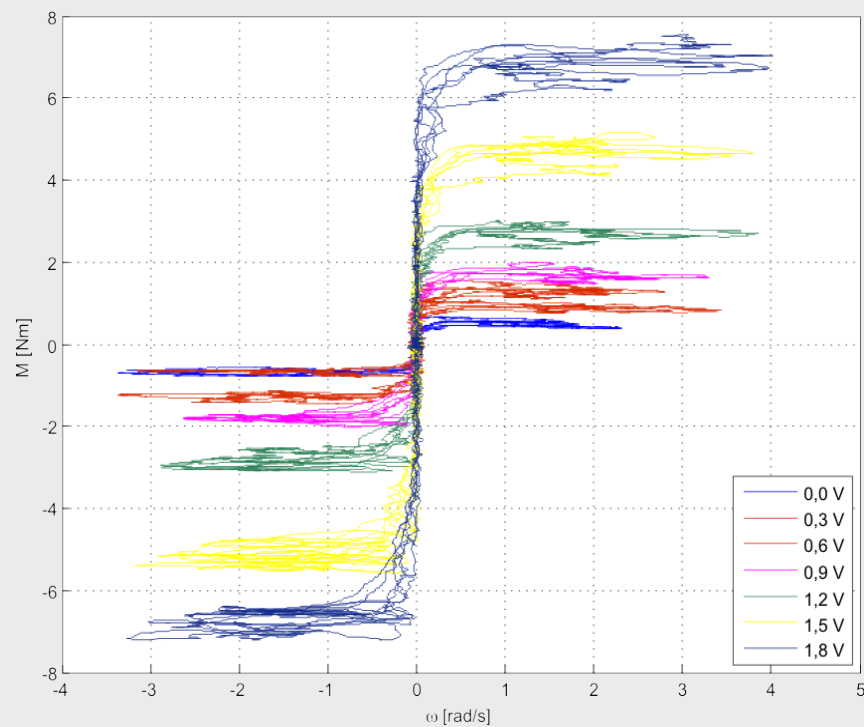
$$\delta = \tan^{-1} \frac{l_z}{l_x}$$

Karakteristiki MR naprave

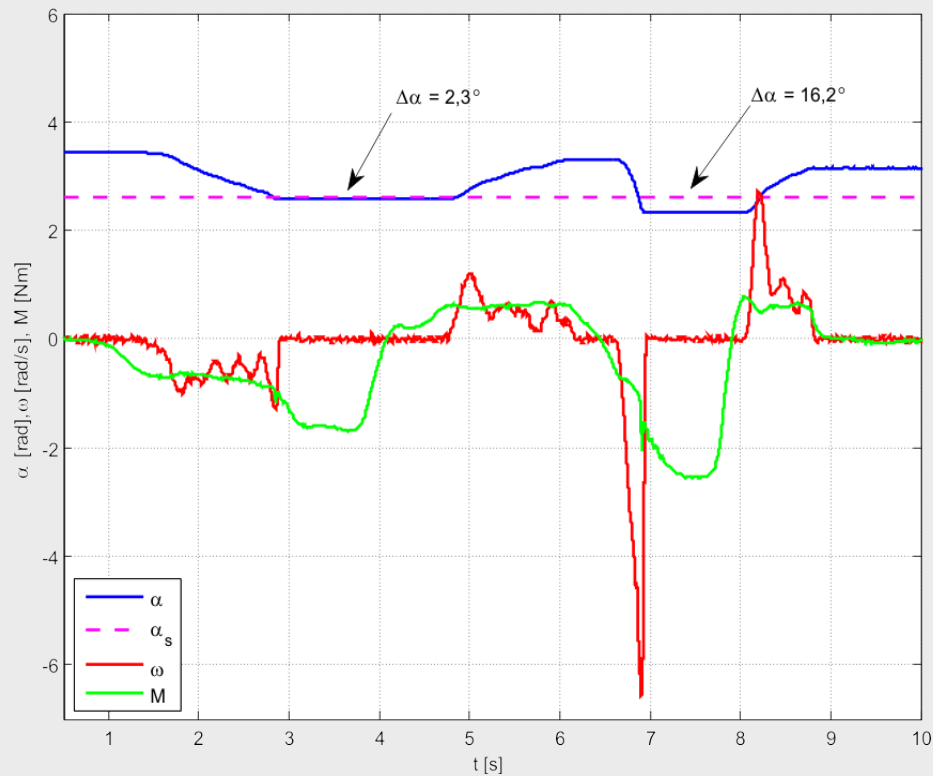
statični navor



dinamična karakteristika



Navidezna stena



v steni

$$M \begin{cases} M_{max} & ; a < a_s \text{ in } \omega < 0 \\ 0 & ; a < a_s \text{ in } \omega > 0 \\ 0 & ; a > a_s \end{cases}$$

$$\Delta a = 2,3^\circ$$

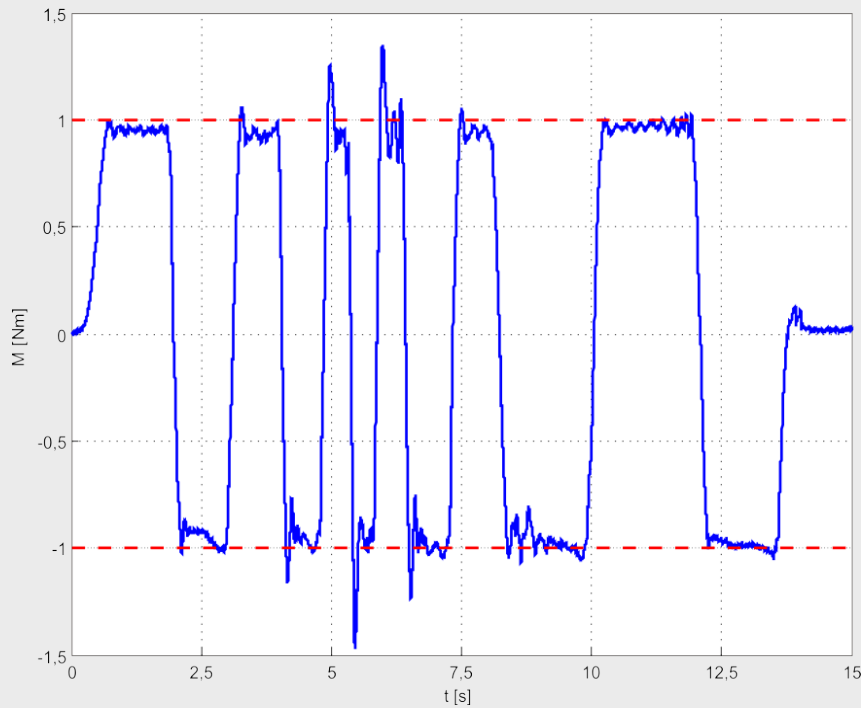
$$t = 44 \text{ ms}$$

$$\Delta a = 16,2^\circ$$

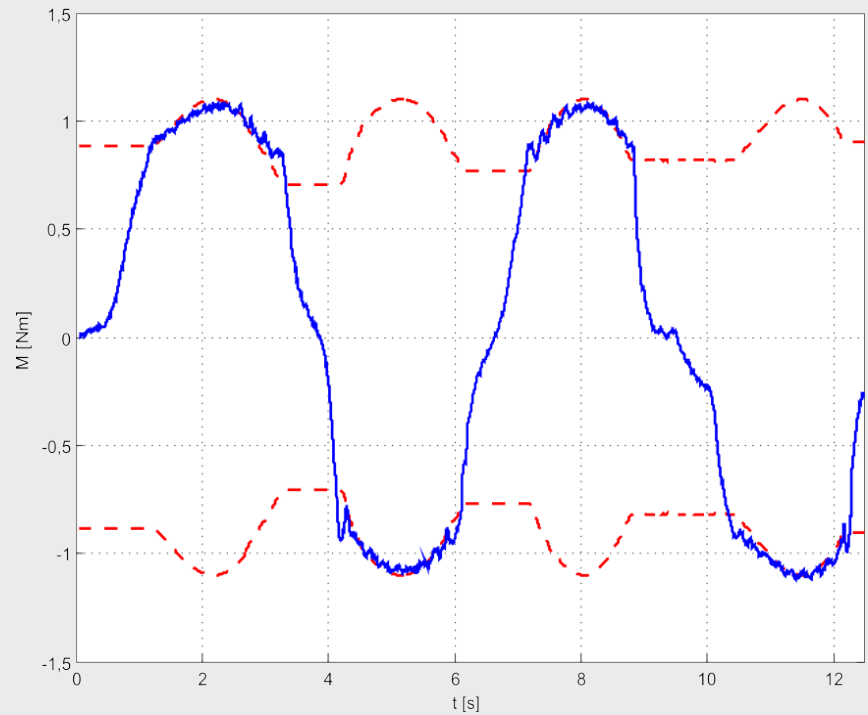
$$t = 53 \text{ ms}$$

Regulacija navora

$$M_{ref} = 1 \text{ Nm}$$



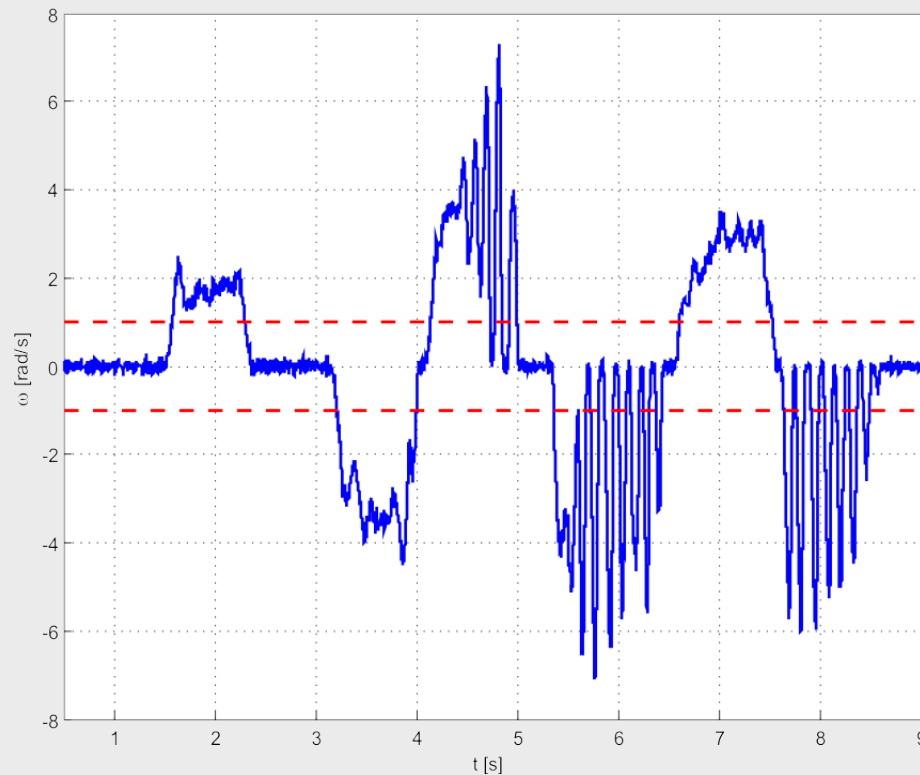
$$M_{ref} = 0,6 + 0,5 \cdot \sin(1,8 \cdot (t - 2,269))$$



Uporabljen PI regulator: $K_p = 4,0$ in $K_i = 0,1$

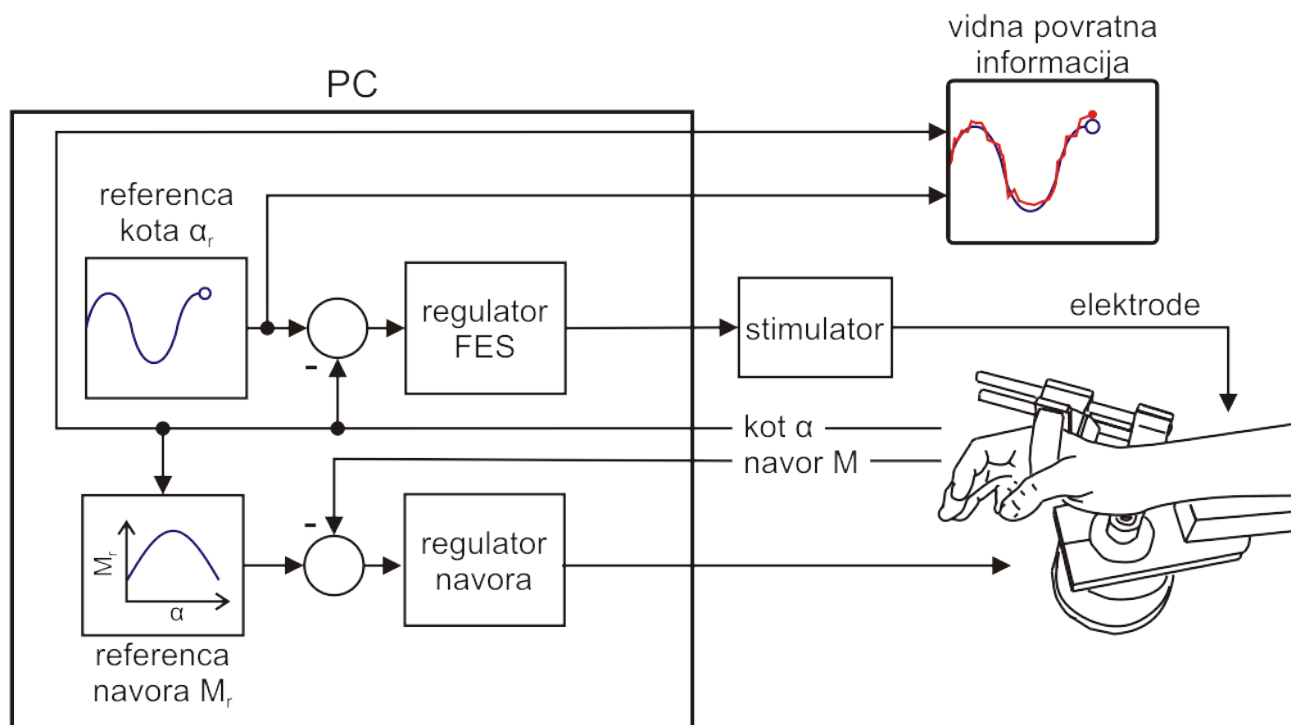
Regulacija hitrosti

$$\omega_{ref} = 1 \text{ rad/s}$$



Uporabljen PI regulator: $K_p = 0,3$ in $K_I = 0,05$

Konceptualna shema MR sistema



Ugotovitve

- Z maksimalnim navorom M_{max} realizacija zelo toge stene
- Možnost realizacije izometričnih pogojev
- Prepočasna odzivnost sistema
- PI regulator uspešen pri regulaciji konstantnega in spremenljivega referenčnega navora
- PI regulator ni primeren za regulacijo kotne hitrosti

Originalni prispevki disertacije

- Sistem za urjenje senzorično-motoričnih sposobnosti rok, osnovan na metodi sledenja sile in zaprtozračno vodeni FES, ter postopek urjenja.
- Sistem za ocenjevanje senzorično-motoričnih sposobnosti rok, osnovan na metodi sledenja sile, in primerjava s kliničnimi testi.
- Izvirna naprava za ocenjevanje in urjenje senzorično-motoričnih sposobnosti roke, namenjena urjenju mišic fleksorjev in ekstenzorjev prstov ter zapestja v dinamičnih pogojih.

Hvala za pozornost!



Univerza *v Ljubljani*
Fakulteta *za elektrotehniko*

