

# FUNKCIONALNA ELEKTRIČNA STIMULACIJA PRI URJENJU HOJE *FUNCTIONAL ELECTRICAL STIMULATION IN GAIT TRAINING*

prof. dr. Tadej Bajd, univ. dipl. inž. el., prof. dr. Marko Munih, univ. dipl. inž. el.  
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Laboratorij za robotiko

## Izvelek

V uvodnem delu podajamo kratek pregled uporabe peronealne funkcionalne električne stimulacije (FES) pri urjenju hoje bolnikov z nepopolno poškodbo hrbtenjače, kot so ga vpeljali ljubljanski raziskovalci. V osrednjem delu povzemamo rezultate mednarodnih študij nevrorehabilitacije hoje, ki so pomembni z vidika z dokazi podprte rehabilitacije. V študijah so opisane tudi primerjave med FES in robotskim urjenjem hoje ter hojo z ortoza. V zaključku so podane nekatere misli o razvoju na področju FES.

## Ključne besede:

funkcionalna električna stimulacija, bolniki z nepopolno poškodbo hrbtenjače, hoja

## Abstract

*We briefly review the peroneal functional electrical stimulation (FES) applications in gait training of subjects with incomplete lesion to the spinal cord as introduced by the researchers from Ljubljana. Next, we describe the results of international studies on neurorehabilitation gait relevant for evidence based rehabilitation. The studies include the comparisons of FES, robot, and orthosis-assisted walking. In conclusion, some thoughts on future development in the field of FES are given.*

## Key words:

*functional electrical stimulation, patients with incomplete spinal cord lesion, gait*

## UVOD

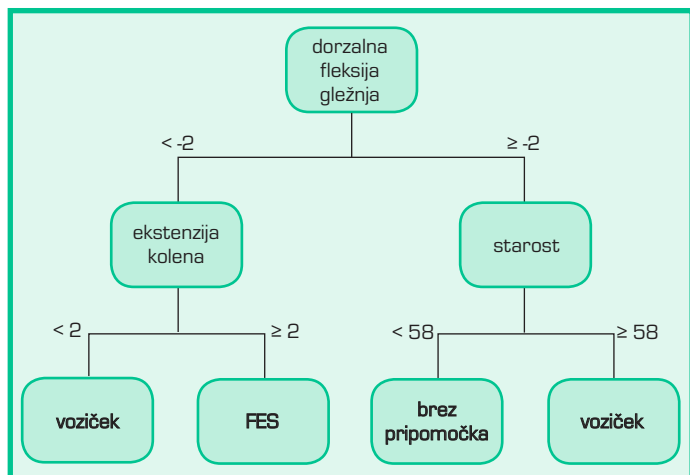
Pomemben dosežek ljubljanskih raziskovalcev na področju funkcionalne električne stimulacije (FES) je minimalni vzorec recipročne hoje pri paraplegičnih bolnikih. Sinteza hoje je bila ob pomoči hodulje ali bergel dosežena samo s štirimi kanali električne stimulacije. Dva kanala povzročata kontrakcijo ekstenzornih mišic kolena v fazi dvojne opore in tako omogočata stojo ohromeli osebi. Zamah povsem paraliziranega spodnjega uda pa je rezultat peronealne stimulacije, ki povzroči fleksijski odziv, to je simultano fleksijo v kolku in kolenu ter dorzalno fleksijo gležnja. Bolnik preklaplja med fazo dvojne opore in fazo zamaha s tipko, vgrajeno v ročaj hodulje ali bergle (1).

Počasnost in energijska neučinkovitost FES pri hoji bolnikov s popolno poškodbo hrbtenjače sta kmalu pokazali, da FES nikakor ne more nadomestiti invalidskega vozička. Tako smo že zgodaj del raziskav usmerili v študij učinkov terapevtske FES v zgodnjem popoškodbenem obdobju pri bolnikih z nepopolno poškodbo hrbtenjače. Najprej nas je zanimalo, kateri bolniki izpolnjujejo pogoje za hojo s FES (2). Pri 31 osebah z nepopolno poškodbo hrbtenjače so bili

opravljeni manualni testi agonističnih in antagonističnih mišičnih skupin kolka, kolena in gležnja takoj po sprejemu bolnikov v rehabilitacijski center. Na osnovi izmerjenih rezultatov in splošnih podatkov o bolnikih smo z uporabo metod umetne inteligence zgradili odločitveno drevo, ki ga prikazuje slika 1. Pri bolnikih s šibkimi dorzalnimi flektor-nimi mišicami gležnja moramo testirati še moč ekstenzornih mišic kolena. Če je tudi ta nezadostna, bo bolnik verjetno ostal na invalidskem vozičku, sicer pa izpolnjuje pogoje za uporabo FES in bergle. Pri bolnikih z zadovoljivimi odzivi v gležnju je odločujoča starost. Mlajši bodo bržkone lahko hodili brez vsakršnega ortotskega pripomočka, starejši pa bodo ostali na vozičku. Pomembna značilnost bolnikov z nepopolno poškodbo hrbtenjače je nesimetričnost odzivov desnega in levega uda. Običajno je en ud močno paraliziran, medtem ko je drug skoraj normalen. Zato smo v veliki večini primerov uporabljali unilateralno peronealno stimulacijo, ki je povzročila fleksijski odziv in s tem zamah bolj paralizirane noge. Ker bolniki v začetku vsekakor potrebujejo oporo z berglo, so FES prožili s tipko v ročaju bergle.

V obdobju 1983-2000 je 57 bolnikov s parezo spodnjih udov ljubljanskega Inštituta za rehabilitacijo prejelo peronealne stimulatorje za domačo uporabo. Med njimi je bilo 35 oseb s tetraplegijo/tetraparezo in 22 s paraparezo. Bolniki so

izpolnili vprašalnik, ki se je nanašal na pogostost uporabe stimulatorja in vpliv stimulacije na kakovost njihovega življenja. Dvaintrideset bolnikov je uporabljalo stimulator med hojo, ostali pa so ga uporabili samo za krepitev mišic; 24 bolnikov je hodilo ob uporabi FES samo doma, 9 bolnikov pa se je podalo tudi v bližnjo okolico (4).



**Slika 1:** Odločitveno drevo, ki napoveduje zmožnost hoje pri bolnikih z delno poškodbo hrbtenjače.

## URJENJE HOJE S FES PRI BOLNIKIHZ NEPOPOLNO POŠKODBO HRBTENJAČE

V osrednjem delu prispevka podajamo rezultate raziskav, ki so bile v zadnjem desetletju opravljene v različnih centrih po svetu in so relevantni za z dokazi podprto rehabilitacijo. Omejili se bomo na urjenje hoje s FES pri bolnikih z nepopolno poškodbo hrbtenjače. Pregled uporabe FES pri drugih vrstah bolnikov ter pri zgornjih udih opisuje odličen članek Shefflerja in Chaeja (5).

Vrsta pomembnih raziskav je bila opravljena v Kanadi. Testiranje, ki je zajelo več kanadskih centrov, je bilo opravljeno pri 40 osebah, od tega jih je bilo 31 z nepopolno poškodbo hrbtenjače in 9 z možgansko okvaro (6). Raziskava je trajala eno leto. Vse osebe so ob začetku programa obvladale samostojno stojo in so vsaj tri mesece že hodile s FES. Ob začetku programa jih je 13 uporabljalo hoduljo, 12 bergle, 12 palice, trije pa so lahko hodili brez opornih pripomočkov. Pri večini je bila uporabljena peronealna stimulacija, pri nekaterih bolnikih pa je bila dodana stimulacija ekstenzornih in flektornih mišic kolena ali ekstenzornih mišic kolka. Na razdalji 5 m so merili hitrost in periodo hoje ter dolžino koraka. V času urjenja hoje s FES se je hitrost hoje povečala skoraj za 70 % v skupini oseb s počasno hojo (povprečna hitrost 0,12 m/s) in za 20 % v skupini hitrejših hodcev (povprečna hitrost 1,26 m/s). Triindvajset oseb z nepopolno poškodbo hrbtenjače je nadaljevalo z uporabo FES po zaključenem testiranju. Obsežna raziskava je dala tudi zamisel za proženje peronealnega stimulatorja s senzorjem, ki meri nagib goleni glede na smer gravitacije.

Tudi Ladouceur in Barbeau (7) sta opazovala predvsem maksimalno hitrost hoje bolnikov z nepopolno poškodbo hrbtenjače, medtem ko so hodili z uporabo FES ali brez nje. V študijo sta vključila 14 kroničnih bolnikov. Uporabila sta peronealno stimulacijo v fazi zamaha in stimulacijo ekstenzornih mišic kolena med oporo. Po enem letu uporabe FES na domu se je maksimalna hitrost hoje oseb ob uporabi FES povečala v povprečju za 0,26 m/s. Za približno enako vrednost (0,25 m/s) se je povečala tudi hitrost njihove hoje brez FES. Podoben uspeh so ugotovili pri bolnikih, ki so hodili zunaj doma, in pri tistih, ki so hodili le doma. Ker so bili v raziskavo vključeni kronični bolniki, avtorji vse izboljšanje pripisujejo uporabi FES pri urjenju, ki je povzročilo pozitivne terapevtske učinke, bodisi v perifernem ali osrednjem živčnem sistemu.

Kanadski raziskovalci so opravili tudi študijo, v kateri so primerjali vplive FES in gleženjske ortoze na fazo zamaha, hitrost in vzdržljivost hoje (8). V raziskavo so vključili 19 bolnikov z nepopolno poškodbo hrbtenjače. Ugodni učinki so se pokazali tako pri hoji s FES kakor tudi pri hoji z mehansko ortoza. Pomembno povečanje hitrosti hoje za 10 % so izmerili pri primerjavi med hojo s FES in hojo brez pripomočka. Največje povečanje za 18 % pa so dosegli pri sočasni uporabi FES in ortoze. Tako pri uporabi FES kakor tudi ortoze se je pomembno povečala tudi razdalja, ki so jo bili bolniki sposobni prehoditi v šestih minutah. Najbolj učinkovit dvig noge med fazo zamaha so ugotovili med hojo s FES, kar je bila tudi edina pomembna razlika med obema vrstama rehabilitacijskih pripomočkov.

Učinkovito okolje za urjenje hoje je tekoči trak, ki ga običajno uporabljamo skupaj s sistemom za podporo teže telesa. S hkratno uporabo FES fizioterapevta osvobodimo naporne pomoči bolniku pri dvigovanju ohromele noge v zamah. V študijo ameriških raziskovalcev je bilo vključenih 19 bolnikov, ki so bili vsaj eno leto po nepopolni poškodbi hrbtenjače (9). Bolniki so uporabljali peronealno FES, ki je vzbujala fleksijski odziv. Urjenje hoje je potekalo uro in pol na dan, tri dni v tednu, v obdobju treh mesecev. Kot najpomembnejši evalvacijski parameter so raziskovalci izbrali hitrost običajne hoje po ravnem, torej brez tekočega traku, podpore teže telesa in peronealne FES. Izmerili so pomembno povečanje hitrosti hoje od 0,12 m/s na 0,21 m/s. Pri nekaterih bolnikih so merili hojo še v obdobju dveh mesecev do enega leta po urjenju. Izmerili so enake ali v nekaj primerih celo boljše rezultate. Avtorji pripisujejo izboljšanje vzbujanju spinalnih nevronske mreže in modulaciji generatorja za gibanje z aferentno FES.

Posebej zanimiv je članek, ki opisuje primerjavo štirih pristopov k urjenju hoje (10). V prvem načinu je bil uporabljen tekoči trak, sistem za podporo teže telesa in pomoč fizioterapevta bolniku pri dvigovanju noge v zamah. Pri drugem načinu je peronealna FES nadomestila ročno pomoč fizioterapevta. V tretjem načinu urjenja so tekoči trak zamenjali s hojo po ravnih tleh, tako da so ohranili podporo teže

telesa in peronealno stimulacijo. V zadnjem načinu pa je bilo uporabljeno robotsko urjenje skupaj s tekočim trakom in podporo teže telesa. 27 kroničnih bolnikov z nepopolno poškodbo hrbtenjače je bilo naključno uvrščenih v eno od štirih skupin. Trajanje urjenja je bilo pri vseh skupinah eno uro na dan. Urjenje hoje je potekalo petkrat na teden v obdobju dvanajstih tednov. Pri vseh oblikah urjenja hoje so ugotovili izboljšanje. Razlike med skupinami niso bile statistično značilne. Vseeno pa so izmerili največje izboljšanje pri hoji bolnikov s peronealno FES tako na tekočem traku kot tudi na ravnih tleh. Največje izboljšanje so izmerili pri tistih kroničnih bolnikih, pri katerih je bila hoja na začetku najmanj funkcionalna. Pri tistih s počasno hojo so ugotovili 85 odstotno povečanje hitrosti hoje, pri hitrejših hodcih pa komaj 9 odstotno. Noben od bolnikov ni dosegel hitrosti funkcionalne hoje 0,9 m/s in tako nihče ni mogel opustiti uporabe invalidskega vozička. Avtorji zaključijo članek z ugotovitvijo, da je kombinirana uporaba sistema za podporo teže bolnikovega telesa in peronealne FES cenen in učinkovit pristop k urjenju hoje.

## ZAKLJUČEK

Uporaba električnih tokov ima v rehabilitacijski medicini več kot stoletno zgodovino. Lahko trdimo, da je z raziskovalnega vidika FES v preteklosti imela številne vzpone in padce. Z vidika klinične uporabe pa lahko rečemo, da FES nikoli ni povsem izginila iz rehabilitacijskih centrov. V ne preveč oddaljeni preteklosti so bili električni stimulatorji poimenovani tudi »nevropoteze«. S tem so raziskovalci jasno nakazali namen uporabe v vsakdanjem življenju. Takšni električni stimulatorji pa bi seveda morali biti zaradi enostavnega apliciranja implantibilni. Implantirana FES udov je povezana s številnimi tehnološkimi in medicinskimi težavami, tako da je danes skorajda ne zasledimo niti v raziskovalnem niti v kliničnem okolju. Površinsko FES (12) pa uporabljajo v dokajšnji meri v rehabilitacijskih centrih po svetu. Večinoma jo aplicirajo pri akutnih bolnikih kmalu po poškodbi, tako da je v večini raziskav učinke FES težko ločiti od spontanizboljšanj. Prednost FES je njena cenenost, zato je smiselna uporaba električne stimulacije tudi na bolnikovem domu takoj zatem, ko je zapustil rehabilitacijski center. Na splošno lahko ugotovimo, da se je število raziskav FES v zadnjem desetletju znatno zmanjšalo v primerjavi z desetletjem poprej. Med njimi so le redke opravljene z zadovoljivo velikim številom oseb ali celo s primerjavo s kontrolno skupino. Raziskave, ki smo jih vključili v ta prispevek, lahko ocenimo kot srednje kakovostne. Menimo, da bodo prihodnje raziskave bistveno vplivale na zaupanje v uporabo FES pri urjenju hoje bolnikov z nepopolno poškodbo hrbtenjače. Takšne raziskave pa lahko pričakujemo s precejšnjo gotovostjo. Veliko člankov o FES je v preteklosti prihajalo iz tehniškega okolja. Poudarek je bil na novem tehnološkem dosežku in zato je bila študija narejena z manjšim številom bolnikov. FES se danes seli iz tehniških na fizioterapevtske fakultete.

Tako v bodočnosti lahko pričakujemo več dobro načrtovanih študij, opravljenih z večjim številom bolnikov v več rehabilitacijskih centrih.

## Literatura:

1. Kralj A, Bajd T. Functional electrical stimulation: standing and walking after spinal cord injury. Boca Raton: CRC Press, 1989.
2. Bajd T, Kralj A, Štefančič M, Lavrač N. Use of functional electrical stimulation in the lower extremities of incomplete spinal cord injured patients. *Artif Organs* 1999; 23: 403-9.
3. Benko H, Obreza P, Burger H. FES as an orthotic aid in patients with spinal injury. In: Marinček Č, Bühler C, Knops H, Andrich R, eds. Assistive technology-added value to the quality of life. Amsterdam: IOS Press, 2000: 518-21.
4. Sheffler LR, Chae J. Neuromuscular electrical stimulation in neurorehabilitation. *Muscle Nerve* 2007; 35(5): 562-90.
5. Wieler M, Stein RB, Ladouceur M, Whittaker M, Smith AW, Naaman S, et al. Multicenter evaluation of electrical stimulation systems for walking. *Arch Phys Med Rehabil* 1999; 80: 495-500.
6. Ladouceur M, Barbeau H. Functional electrical stimulation – assisted walking for persons with incomplete spinal injuries: longitudinal changes in maximal overground walking speed. *J Rehabil Med* 2000; 32: 28-36.
7. Kim CM, Janice J, Whittaker MW. Effects of a simple functional electric system and/or a hinged ankle-foot orthosis on walking in persons with incomplete spinal cord injury. *Arch Phys Med Rehabil* 2004; 85: 1718-23.
8. Field-Fote EC. Combined use of body weight support, functional electric stimulation, and treadmill training to improve walking ability in individuals with chronic incomplete spinal cord injury. *Arch Phys Med Rehabil* 2001; 82: 818-24.
9. Field-Fote EC, Lindley SD, Sherman AL. Locomotor training approaches for individuals with spinal cord injury: A preliminary report on walking-related outcomes. *J Neurol Phys Ther* 2005; 29: 127-37.
10. Bajd T. Surface electrostimulation electrodes. In: Akay M, ed. Wiley encyclopedia of biomedical engineering. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006: 3386-90.