

**MILAN ČABRIĆ**Filozofski fakultet  
OOUR Prirodoslovno-matematičke znanosti  
Sveučilište u Splitu**MILENKO OSTOJIĆ**

Institut „Mihailo Pupin“, Beograd

**EFEKAT FUNKCIONALNE ELEKTRIČNE  
STIMULACIJE SKELETNIH MIŠIĆA**

/ Funkcionalna elektrostimulacija / M. triceps surae / Mišićna sila / Antropometrija /

Funkcionalna električna stimulacija mišića potkolenice, sprovedena u toku 14 dana primenom naizmjenične struje visoke frekvencije, inicirala je povećanje maksimalne statičke sile od 16,2%. Povećanje sile pratilo je povećanje obima potkolenice od, u proseku, 0,79 cm i smanjenje debljine kožnog nabora od 1,88 mm.

**UVOD**

Primena električne struje u medicini, posebno u svrhu funkcionalne stimulacije, nije novijeg datuma. Prvi elektrostimulator, prema podacima koje navodi M. Rothmann<sup>1</sup>, datira još iz davne 1745. godine, a prva uputstva o stimulaciji skeletnih mišića štampana su 1780. godine<sup>2</sup>. Sa početkom 19. veka u praksu ulaze induktori jednosmerne struje, prvo galvanski, a zatim i faradejevi. Međutim, nemodifikovana jednosmerna struja ne može da izazove tzv. elektrotonus, jer, shodno zakonu Du Bois Reymonda, električni podražaj ne izaziva sama struja već dovoljno brza izmena njenog napona. Zbog toga su konstruisani aparati impulsnog tipa, koji se i danas koriste u gotovo svim ustanovama fizikalne medicine, zasnovani na brzom uključivanju i isključivanju električnog toka. Time se postiže brzo premeštanje jona i izmena u polarizaciji mišićne membrane, u čijoj osnovi se i nalazi mehanizam nastajanja mišićne kontrakcije. Ograničenja jednosmerne struje, o kojima je bilo reči, ne odnose se i na Tesline naizmjenične struje. Ovo posebno kada se radi o funkcionalnoj električnoj stimulaciji zdravog skeletnog mišića (sa očuvanom inervacijom).

Primenu naizmjeničnih struja u funkcionalnoj stimulaciji skeletnih mišića uveo je Djourno (10) krajem četrdesetih godina ovog veka, a njegovim stopama krenuli su Ikai et al. (17), Egorov i Georgijevski (11), Mrčka i Zrubek (14), Koc et al. (18), Koc (19 i 20), Goluch i Kozdron (13) i dr. Korišćene su naizmjenične (ponekad i jednosmerne) struje različitog oblika (sinusoidnog, pravougaonog, trouglastog i dr.), različite frekvencije, širine projekcije, amplitude, gustine, vremena projekcije, elektrode različitih vrsta i veličina, metod direktne i indirektno stimulacije (na mišić ili preko njegovog motoneurona)... Jedna od tih alternacija je i naš metod funkcionalne elektrostimulacije skeletnih mišića, koncipiran na originalnom elektrostimulatoru i primeni nove metodologije stimulacije.

Svrha našeg istraživanja bila je da se utvrde neki relevantni morfo-funkcionalni efekti elektrostimulacije, prvenstveno uticaj na mišićnu silu i masu, koji mogu imati praktičnu primenu u njenoj aplikaciji u trenažne i rehabilitacione svrhe.

**METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA**

U istraživanju je korišćen originalni elektrostimulator ESO1, nastao usavršavanjem elektrostimulatora koji su autori ovog članka konstruisali i izradili 1977. godine. Uređaj je razvijen kao profesionalni i laboratorijski elektrostimulator, sa širokim izborom parametara elektrostimulacije. Sve funkcije regulacije parametara se izvode elektronskim putem. Na čelnoj strani uređaja smešteno je pet kalibrisanih regulatora za izbor intenziteta stimulacije, širine impulsa, učestanosti ponavljanja, dužine i pauze stimulacije.

Korišćene su površinske elektrode dimenzija 4,5 x 5,5 cm<sup>-2</sup> (24,75 cm<sup>2</sup>).

Osnovni parametri stimulacije:

Korišćena je naizmjenična struja visoke frekvencije, pravougaonog oblika, sa širinom projekcije od 0,15 ms i gustinom električne struje od 1,21 do 1,82 mA cm<sup>-2</sup>.

Stimulisani su mišići zadnje lože potkolenice (m. gastrocnemius i m. soleus) desne noge. Maksimalno efektivno vreme elektrostimulacije u toku jednog dana iznosilo je 100 sek. Stimulacija je sprovedena svakodnevno u toku 14 dana.

Uzorak ispitanika je bio sastavljen od šest devojaka starih od 18–21 godinu. Ispitanice su bile aktivne sportistkinje ili studentkinje fizičkog vaspitanja.

Kako bi se mogle detektovati promene u sili, kao i stimulisati mišići u izometrijskim uslovima, konstruisan je specijalni fiksacioni uređaj (na slici 1). Papučica ove fiksacione naprave povezana je sa sondom dinamometra.

Svim ispitanicama je pre početka eksperimenta i dan nakon završetka izmerena maksimalna sila mišića opružaća stopala desne i leve noge (kontrolna noga), obim potkolenice i debljina duplikature kože (kožni nabor) u središnjem delu zadnje lože potkolenice.

<sup>1</sup> Rothmann, M. (1907): Über die Bedeutung der Elektrodiagnostik und Elektrotherapie in der modernen Medizin. Die Deutsche Klinik XI Band, Urban/Schwarzenberg, Berlin, 287–324.

<sup>2</sup> Cavallo, A. (1780): Essay of the theory and practice of medical electricity (prema M. Rothmannu).

## REZULTATI ISTRAŽIVANJA

U tabeli 1 i na slici 2 prikazane su brojčano i grafički dobijene vrednosti mišićne sile mišića opružaća skočnog zgloba, obima potkolenice i debljine kožnog nabora potkolenice pre i posle 14-dnevne funkcionalne elektrostimulacije.

Maksimalna statička sila mišića opružaća skočnog zgloba povećala se od  $1355,00 \pm 84,56$  na  $1575,00 \pm 8,86$  N (Newtona), što predstavlja povećanje od 16,2% (Razlika je značajna na nivou  $p < 0,01$ ).

Obim potkolenice iznosio je pre početka elektrostimulacije  $36,63 \pm 1,79$ , a posle 14 dana stimulacije  $37,42 \pm 1,94$  cm, što predstavlja prosečno povećanje od 0,79 cm.

Prosečna debljina kožnog nabora potkolenice iznosila je pre elektrostimulacije  $29,82 \pm 3,08$ , a nakon nje  $28,10 \pm 1,91$  mm, što predstavlja smanjenje od, u proseku, 1,88 mm.

Tabela 1

IZMERENE VREDNOSTI MIŠIĆNE SILE, OBIMA POTKOLENICE I DEBLJINE KOŽNOG NABORA POTKOLENICE KOD ISPITANICA PRE I NAKON 14-DNEVNE ELEKTROSTIMULACIJE

No	Mišićna sila (N)		Obim potkolenice (cm)		Debljina kožnog nabora potkolenice (mm)	
	Pre	Posle	Pre	Posle	Pre	Posle
1	1250	1520	37,8	38,6	29,2	28,1
2	1320	1580	34,3	35,0	28,8	27,6
3	1430	1610	38,5	39,5	32,7	31,0
4	1310	1580	34,5	35,0	25,8	25,1
5	1340	1540	37,7	38,5	29,0	27,9
6	1480	1620	37,0	37,9	34,4	28,9
X	1355,00	1575,00	36,63	37,42	29,82	28,10
δ	84,56	38,86	1,79	1,94	3,08	1,91
S <sub>x</sub>	48,82	22,44	1,03	1,12	1,78	1,10

## DISKUSIJA

Rezultati naših istraživanja uticaja funkcionalne električne stimulacije skeletnih mišića ukazuju na relativno veliku efikasnost ovog metoda u razvoju maksimalne mišićne sile. Ovo i pored toga što je period stimulacije bio dosta kratak (14 dana), a ispitanice trenirane osobe sa dosta visokim inicijalnim pokazateljima maksimalne izometrijske sile mišića opružaća skočnog zgloba. Povećanje mišićne sile pratilo je i relativno veliko povećanje obima mišića potkolenice, što govori u prilog nastajanja odgovarajuće radne hipertrofije mišića triceps surae.

Značajno povećanje mišićne sile dobili su Mrčka i Zrubek (14) u toku 17-dnevnog stimulisanja fleksora i ekstenzora nadlaktice (povećanje je iznosilo 10,69, odnosno 7,91 kp) jednosmernom strujom male frekvencije. Koc (20) je, primenom naizmenične struje dobio u toku 19-dnevne elektrostimulacije povećanje sile mišića pregibača zgloba lakta od 38,4%. Guluch i Kozdroń (13), primenom slične metodologije, dobili su povećanje sile

pregibača nadlaktice od 12,4%—18,9%. Značajna povećanja mišićne sile, primenom metoda funkcionalne elektrostimulacije, zabeležili su, takođe, Nowakowska (28), Breedeveeld (4) i Massey (23). Pette et al. (29) zabeležili su u toku dugotrajne stimulacije kod zečeva transformaciju vlakana brzog trzaja u vlakna sporog trzaja.

U toku stimulacije opservirali smo pojavu lokalne hiperemije kože, što se poklapa sa sličnim zapažanjima Egorova i Georgijevskog (11), kao i u eksperimentima na životinjama koje su sproveli Marshall i Tandon (22) i Hudlicka et al. (15).

Funkcionalna elektrostimulacija inicirala je i dosta značajno povećanje obima potkolenice (od 0,79 cm), pogotovo ako se taj podatak sagleda u kontekstu dobijenog smanjenja debljine kožnog nabora i činjenici da su u pitanju mišići treniranih osoba. U jednom ranijem istraživanju, čiji rezultati su u štampi, dobili smo, kod muških ispitanika stimulisanih 19 dana, povećanje površine poprečnog preseka mišićnih vlakana gastrocnemiusa (uz primenu biopsijske tehnike) od 23,6%. Slične rezultate dobio je i Reddanna et al. (30) kod životinja. Mi smo zabeležili i značajno povećanje zapremine mionukleusa (od 37,7%), što upućuje na nukleotipni efekat elektrostimulacije.

Ispitivanja Hudlicka et al. (15) i Marshall i Tandon (22) i dr. ukazuju da funkcionalna elektrostimulacija poboljšava cirkulaciju u mišićima, izaziva povećanje dijametra mišićnih arteriola i gustinu kapilarne mreže. Mi smo, takođe, dobili u ranijem radu povećanje gustine miokapilara u m. gastrocnemiusu od oko 10%.

Procedura elektrostimulacije dovela je do smanjenja debljine kožnog nabora, što su, uostalom, opservirali i drugi autori. Inače, sama stimulacija nije izazvala osećanje diskomfora kod ispitanica, niti je zabeležen slučaj iritacije kože ispod elektroda.

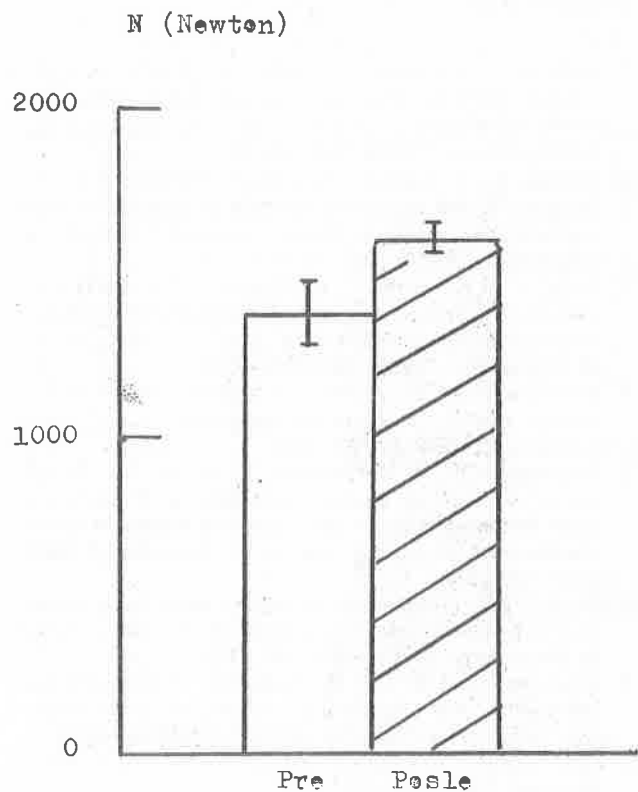
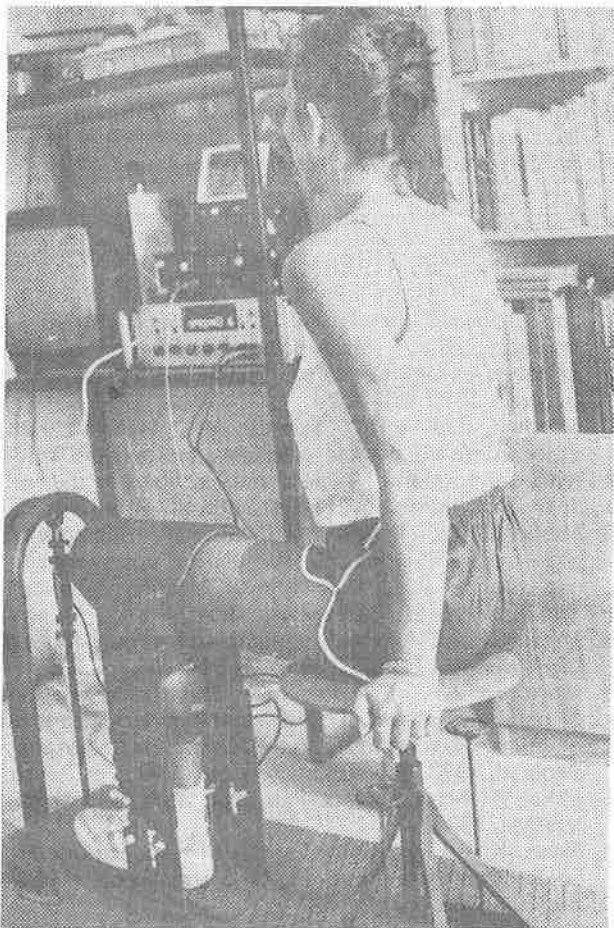
Na kraju treba reći da smo primetili, već nakon nekoliko dana od početka stimulacije, pojavu akomodacije na električne podražaje. Ovaj problem rešavan je povećanjem amplitude stimulacije. Međutim, u ranijim eksperimentima se pokazalo da ovo povećanje amplitude može da kompenzira pojavu akomodacije samo do izvesnog vremena. Kod nas je to kritično vreme iznosilo od 21—23 dana. Nakon tog vremena mišić je postao relativno rezistentan na električne podražaje. Međutim, posle pauze od nekoliko dana bilo je moguće nastaviti stimulaciju.

## ZAKLJUČAK

U toku 14 dana primenjena je funkcionalna elektrostimulacija mišića triceps surae kod šest devojak. Korišćene su naizmenične struje visoke frekvencije. Svim ispitanicama izmerena je, pre i posle eksperimentalnog perioda elektrostimulacije, maksimalna izometrijska sila mišića opružaća skočnog zgloba, obim potkolenice i debljina kožnog nabora potkolenice. Zabeleženo je prosečno povećanje maksimalne statičke sile od 16,2%, povećanje obima potkolenice za, u proseku, 0,79 cm i srednje smanjenje debljine kožnog nabora potkolenice od 1,88 mm.

## LITERATURA

1. Adams, L., H. Frankel, J. Garlick, A. Guz, K. Murphy, i S.J.G. Semple: The role of spinal cord transmission in the ventilatory response to exercise in man. *Journal of Physiology*, (1984) 355: 85–97.
2. Adams, L., J. Garlick, A. Guz, K. Murphy, i S.J.G. Semple: Is the voluntary control of exercise in man necessary for the ventilatory response? *Journal of Physiology*, (1984) 355: 71–83.
3. Borg, J., L. Grimby, i J. Hannerz: The fatigue of voluntary contraction and the peripheral electrical propagation of single motor units in man. *Journal of Physiology*, (1983) 340: 435–444.
4. Breederveld, R.S.: Electrical stimulation of motor nerves: results of an animal experiment. *Life Support Systems*, 2(1984) 3: 183–188.
5. Buchegger, A., P.M. Nemeth, D. Pette, i H. Reichmann: Effects of chronic stimulation on the metabolic heterogeneity of the fiber population in rabbit tibialis anterior muscle. *Journal of Physiology*, (1984) 350: 109–119.
6. Burke, R.E. Properties of motor units in a homogeneous red muscle (m. soleus) of the cat. *Journal of Physiology*, (1967) 193: 141–160.
7. Chandler, S.A.G. i E.M. Sedgwick: A proportional stimulator for functional electrical stimulation. (U: Advances in external control of human extremities) Jugoslav Community of Electronic Automation, Beograd, 1973, 547–553.
8. Čabrić, M.: Mogućnosti primene elektrostimulacije skeletnih mišića u sportskoj praksi. *Fizička kultura*, (1978) 3: 183–185.
9. Dimitrijević, M., F. Gračanin, i T. Prevec: Electronic control of paralysed extremities. *Biomedical Engineering*, (1968) 2: 8–14.
10. Djourno, A.: Excitation des muscles chez l'homme par des courants alternatif sinusoidaux de frequence moyenne. *C. R. Soc. Biol., Paris*, (1943) 143: 621–622.
11. Egorov, B.B. i V.S. Georgijevski: Značenje elektrostimulaciji mišića nižih konečnosti v povišenii ortostatičkej ustojčivosti. *Kosmič. biol. med.*, (1969) 6: 62–65.
12. Epstein, B. R. i K. R. Foster: Anisotropy in the dielectric properties of skeletal muscle. *Med. Biol. Eng. Comput.*, 21 (1983) 1: 51–55.
13. Guluch, A. i A. Kozdron: Proba zastesowania stimulacji elektrycznej w treningu sily. *Sport Wyczynowy*, (1977) 9: 17–19.
14. Hrčka, J. i A. Zrubek: A. (1970) Pokus o zvyšovanie svalovej sily elektrickým prúdom. *Teor. Prax. Tel. Vychovy*, (1970) 1: 23–25.
15. Hudlicka, O., M. Brown, M. Cotter, M. Smith i G. Vrbova: The effect of long-term stimulation of fast muscles on their blood flow, metabolism and ability to withstand fatigue. *Pflug. Arch. Eur. J. Physiol.*, 369 (1977) 2: 141–149.
16. Hultman, E. M. Sjöholm: Electromyogram, force and relaxation time during and after continuous electrical stimulation of human skeletal muscle in situ. *Journal of Physiology*, (1983) 339: 33–40.
17. Ikai, M., P. Yabe, i K. Ischii: Muskelkraft und muskulare Ermüpfung bei willkürlicher Anspannung und elektrischer Reizung des Muskels. *Sportarzt und Sportmedizin*, (1967) 5:
18. Koc, J.M., T. M. Absaljamov, i V.P. Zarin: Modifikacija tendometričeskogo metoda izmerenija sily sokraščeniya otdelnyh myšc čeloveka. *Fiziologija čeloveka*, 2 (1976) 6:
19. Koc, J.M.: Trenirovka myšečnoj sily metodom elektrostimuljacii. Soobščenie 1. Teoretičeskie predposylki. *Teorija i praktika fizičkej kulture*, (1971) 3: 64–67.
20. Koc, J.M.: Trenirovka myšečnoj sily metodom elektrostimuljacii. Soobščenie 2. Teorija i praktika fizičkej kulture, (1971) 4: 66–72.
21. Kralj, A., S. Grobelnik, S. i L. Vodovnik: Functional electrical stimulation of paraplegic patients – feasibility study. (U: Advances in external control of human extremities), *Yug. Comm. Electr. Automat.*, Beograd, 1973, 561–574.
22. Marshall, J.M. i H.C. Tandon, M.C. (1984) Direct observations of muscle arterioles and venules following contraction of skeletal muscle fibers in the rat. *Journal of Physiology*, (1984) 350: 447–459.
23. Massey, B.M.: The effect of involuntary training with high frequency electrical stimulation upon strength and muscle size. 11th Annual Meeting American Coll. Sports Med., Hollywood, 1964.
24. Merton, P.A.: Voluntary strength and fatigue. *Journal of Physiology*, (1954) 123: 553–564.
25. Mortimer, J.T. i P.M. Peckham: Electrical excitation of paralysed muscle. (U: Advances in external control of human extremities), *Yug. Comm. Electr. Autom.*, Beograd, 1973, 575–583.
26. Mika, T.: *Fizykoterapia*. Pan. Zak. Wyd. Lekarskich, Varšava, 1983.
27. Naess, K. i A. Mathisen: Fatigue of sustained tetanic contraction *Acta Physiologica Scandinavica*, (1955) 34: 351–366.
28. Nowakowska, A.: Influence of experimental training by electric current stimulation of skeletal muscle. *Acta Physiologica Polonica*, (1976) 12: 32–38.
29. Pette, D., M.E. Smith, H. W. Staudte, i G. Vrbova: Effects of long-term electrical stimulation on some contractile and metabolic characteristics of fast rabbit muscles. *Pflugers Arch. Eur. Journal of Physiol.*, 338 (1973) 3: 257–272.
30. Reddanna, P., C.V.N. Moorthy, i S. Govindappa: Pattern of skeletal muscle chemical composition during in vivo electrical stimulations. *Indian Journal of Physiology and Pharmacology*, 25 (1981) 1: 33–40.
31. Vrbova, G. i K. Ward: Observations on the effects of low frequency electrical stimulation of fast muscles of dystrophic mice. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, (1981) 44: 1002–1006.
32. Wuerker, R.B., A.M. McPhedran, i E.J. Henneman: (1965) Properties of motor units in a heterogeneous pale muscle (m. gastrocnemius) of the cat. *Journal of Neurophysiology*, (1965) 28: 85–99.



Milan Čabrić  
Department of Sciences and Mathematics  
University of Split

Milenko Ostojic  
„Mihajlo Pupin” Institute Belgrade

Original scientific paper  
UDC 796.012.11:612.7:796.02-055.2  
Received June 7, 1985

## EFFECTS OF FUNCTIONAL ELECTRIC STIMULATION ON SKELETAL MUSCLES

Functional electrostimulation / M. triceps surae / Muscular force / Anthropometry

During the period of two weeks, functional electrostimulation of muscle triceps surae was applied on 6 female subjects. Alternating current of high frequency was used. Before and after the experimental period of electrostimulation, the subjects were measured for maximum isometric force of the ankle extensor muscle circumference of the calf and thickness of skin fold of the calf. It was recorded that the average increase of maximum static force was 16,2%, increase in the circumference of the calf was, on the average, 0,79 cm and the average decrease of skin fold thickness on the calf was 1,88 cm.

Милан Чабрић  
Естествоно-математическое отделение Филозофского факультета, Сплит

Миленко Остоич  
НИИ «Михаило Пупин», Белград

## ЭФФЕКТ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТИМУЛЯЦИИ СКЕЛЕТНЫХ МЫШЕЦ

В течение 14 дней у шести девушек проводилось функциональное электростимулирование мышцы triceps surae. В эксперименте использован высокочастотный переменный ток. До и после экспериментального периода у всех испытуемых проведено измерение максимальной изометрической силы общего разгибателя лодыжки, объем голени и толщина кожной складки голени. Результаты показывают, что в конце экспериментального периода максимальная статическая сила больше на 16,2%, объем голени — на 0,79 см, а толщина кожной складки голени меньше на 1,88 мм.