

GRAFIČKI PRIKAZ ŽIVČANOMIŠIĆNE PODRAŽLJIVOSTI S
ČETVRTASTIM ELEKTRIČNIM IMPULSIMA
GRAPHIC PRESENTATION OF NEUROMUSCULAR EXCITABILITY
PROVOKED BY THE ELECTRIC
RECTANGULAR IMPULSES

Čedomir Ljubin*

Klinika za fizikalnu medicinu, rehabilitaciju i reumatologiju
Kliničke bolnice "Sestre milosrdnice", Zagreb

Sažetak

Grafički prikaz neuromuskularne podražljivosti električnim četvrtastim impulsima u obliku intenzitetnovremenske krivulje, u Hrvatskoj se od 1962. godine izvodi u elektrodijagnostičkom laboratoriju Klinike za fizikalnu medicinu, rehabilitaciju i reumatologiju Kliničke bolnice "Sestre milosrdnice". Za takav prikaz postoji nekoliko naziva: intenzitetnovremenska krivulja (I/t krivulja), elektrostatogram (ELS) ili jakosnovremenska krivulja (SD krivulja). Od 1990. u našem se elektrodijagnostičkom laboratoriju neuromuskularna podražljivost električnim četvrtastim impulsima, osim prikazivanja I/t krivuljom, prikazuje i intenzitetnovremenskim pravcem (I/t pravac). Prikazivanje neuromuskularne podražljivosti u obliku pravca, ima nekoliko važnih prednosti u odnosu na prikazivanje krivuljom. Prednosti su mogućnost određenja kuta, raspona i položaja pravca u koordinatnom sustavu, lakša usporedba motornih i senzornih pravaca i druge. Ti novi elementi svojstveni pravcu, omogućuju bolju dijagnostičku i prognostičku procjenu te neposredno i bolji terapijski pristup. Predlažemo, stoga, da se u budućoj elektrodijagnostičkoj obradi, uz dosadašnju I/t krivulju, upotrebljava i I/t pravac jer sa svojim parametrima pravac daje veće elektrodijagnostičke mogućnosti.

Ključne riječi

Intenzitetnovremenski pravac, intenzitetnovremenska krivulja, matematički model.

Summary

Since 1962. the graphic presentation of the neuromuscular excitability, provoked by electric rectangular impulses, in the form of the intensity-duration curve has been used in Croatia, in the Electrodiagnostic Laboratory of the Clinical Department of Physical Medicine, Rehabilitation and Rheumatology at "Sestre milosrdnice" University Hospital. This graphic presentation has had three alternative names: intensity-duration curve (I/t

*Prim. dr. sci. Čedomir Ljubin, šef elektrodijagnostičkog laboratorija Klinike za fizikalnu medicinu, rehabilitaciju i reumatologiju, Kliničke bolnice "Sestre milosrdnice", Vinogradska cesta 29, 10000 Zagreb.

curve), electrostatogram (ELS) and strength-duration curve (SD curve). Since 1990. in this electrodiagnostic laboratory the neuromuscular excitability provoked by electric rectangular impulses has been presented also in the form of line (I/t line), beside the presentation in the form of curve (I/t curve). Presentation of the neuromuscular excitability in the form of the line has several important benefits compared to the presentation in the form of the curve. These benefits are possibility of the precise determination of the angle, range and the position of the line in the coordinate system as well as the easier comparison of the "motor" lines and the "sensor" lines. The new parameters, characteristic for the line, provide more reliable diagnostic and prognostic evaluation as well as better therapeutic approach. On the basis of these facts we have proposed the use of the I/t line in the electrodiagnostic routine measurement, beside the I/t curve. Namely, parameters of the I/t line in comparison to the I/t curve provides broader electrodiagnostic possibilities.

Key words

Strength-duration line, strength-duration curve, mathematical definition.

Uvod

U klinici za fizikalnu medicinu, rehabilitaciju i reumatologiju Kliničke bolnice "Sestre milosrdnice" tradicionalno se upotrebljava intenzitetno-vremenska krivulja, skraćeno I/t krivulja ili/i intensity time curve ili/i electrostatogram, skraćeno ELS četvrtastim električnim impulsima, kao vrijedna elektrodiagnostička metoda. Neki strani autori rabe za isto ispitivanje i naziv strength duration curve, skraćeno SD curve. Neuromišićna podražljivost električnim četvrtastim impulsima ovisna je o parametrima četvrtastih impulsa, a to su trajanje četvrtastog impulsa t u milisekundama (t u ms) i jakost četvrtastog impulsa I u miliamperima (I u mA) Oni određuju prag motoričke ili osjetne podražljivosti. Neuromišićna podražljivost električnim četvrtastim impulsima prezentirana kao izmjerena korisna vremena, prikazuje se grafički kao krivulje u koordinatnom sustavu, slične hiperboli, ili eksponencijali ili kao pravci motoričke ili osjetne podražljivosti. Tokom tridesetpetogodišnjeg rada u našem elektrodiagnostičkom laboratoriju prikazivanja neuromišićne podražljivosti, priklonili smo se grafičkom prikazu, koji neuromišićnu podražljivost daje u obliku krivulje slične eksponencijali, a od 1990. godine neuromišićnu podražljivost, kao točan prikaz u našem grafičkom sustavu, prikazujemo kao pravac. Postoji također izvjesna ovisnost između grafičkog prikaza intenzitetno-vremenskih krivulja i matematičkih modela koje su postavili pojedini autori. Netočni matematički modeli imali su utjecaja i na netočno prikazivanje intenzitetnovremenskih krivulja četvrtastim impulsima. Radi toga se moramo načelno osvrnuti na neke stare oblike prikazivanja neuromišićne podražljivosti, kako matematičke, tako i grafičke. S druge strane, treba naglasiti da su autori koji su pokušali grafički ili matematički definirati neuromišićnu podražljivost, pridonijeli napretku znanosti. Sljedeći znanstvenici ne bi došli do današnjih saznanja da nisu uvažavali njihova istraživanja i mišljenja.

Matematički prikaz I/t krivulja četvrtastim impulsima

Među prvima koji su matematički pokušali definirati neuromišićnu podražljivost bili su Hoorweg i Weis početkom ovog stoljeća, a nešto kasnije Lopicque (1926 god.) kao hiperbolu (1). Spomenuti autori dali su sljedeću formulu ovisnosti između intenziteta I, četvrtastog impulsa i trajanja impulsa t u funkciji hiperbole:

$$I = a \left(1 + \frac{\tau}{t}\right) \quad \text{Formula 1}$$

gdje je I jakost struje u mA, a je reobaza, τ je kronaksija, a t je trajanje četvrtastog impulsa.

Nešto kasnije, tj. 1939. godine, Katz i suradnici (2) smatraju da krivulja podražljivosti ima više eksponencijalni tok te da se radi o eksponencijalnoj funkciji i predlažu svoj matematički model za I/t krivulju. On je dan sljedećom relacijom:

$$I = \frac{I_0}{(1 - e^{-tk})} \quad \text{Formula 2}$$

gdje je I jakost struje u mA, I_0 je reobaza, $e = 2,71$, t je trajanje četvrtastog impulsa, a k je konstanta.

Prema grafičkim crtežima Ljubin i Knešaurek (3) zaključuju da I/t krivulja po svom obliku ima elemenata i hiperbole, ali više eksponencijale. Na temelju dugogodišnjeg promatranja I/t krivulja, dolaze do grafičkog prikaza gdje su I/t krivulju prikazali kao pravac u log-log sustavu. (ln-ln prirodni logaritam). Njihov matematički oblik ovisnosti između intenziteta I i trajanja četvrtastog impulsa t u funkciji pravca glasi:

$$I = ct^{-f} + I_0 \quad \text{Formula 3}$$

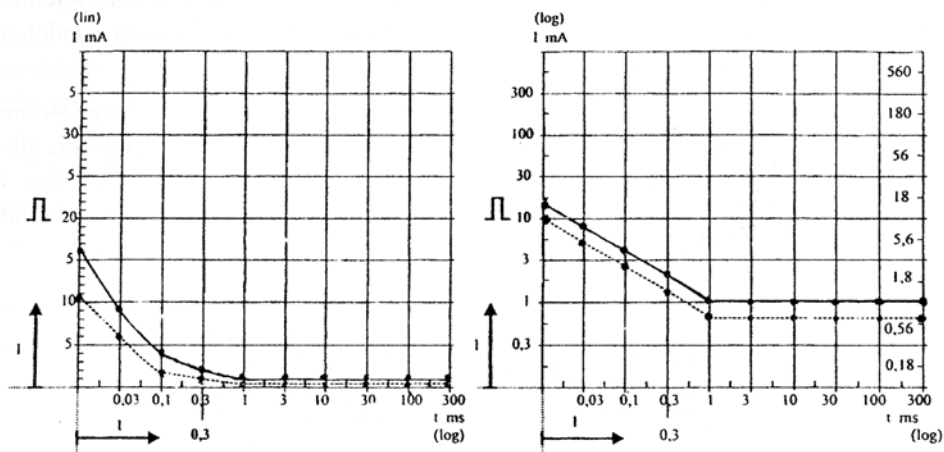
gdje je I jakost struje u mA, I_0 je reobaza, t je trajanje četvrtastog impulsa, c je konstanta, a f je nagib pravca.

Ocjenjujemo da je treća relacija najtočnija jer se njezina funkcija provjerila na zdravim i denerviranim mišićima, kako grafički ručnim crtanjem, tako i računarskim matematičkim i grafičkim prikazom (3,4,5).

Grafički prikaz živčanomišične podražljivosti s četvrtastim električnim impulsima i nove znanstvene spoznaje

Od samog početka rada našega elektrodiagnostičkog laboratorija, tj. od prosinca 1962. godine, u prikazivanju mrežica u koordinatnom sustavu uvijek se upotrebljavao linearno logaritamski odnos, s time da je osnovni matematički i grafički odnos mjerila bio od 10 jedinica, a u odnosu apscise prema ordinati, bio je uvijek stalan, i to 1:1. Grafički prikaz I/t krivulje opisala je R. Sabol i pokazala kako se od početka radilo u našem elektrodiagnostičkom laboratoriju (6). Na ordinati označavala se jakost četvrtastog impulsa u miliamperima (I u mA), a na apscisi trajanje četvrtastog impulsa u milisekundama (t u ms). Osnovno u našem gledištu, u odnosu prema nekim autorima, odnos je apscise prema ordinati u temeljnom mjerilu bio 1:1, kako u grafičkom, tako i matematičkom odnosu. Iz slike 1a i 1b vidi se da je raspon od 0,01 do 0,1 grafički prikazan istom dužinom kao i raspon od 0 do 10. Taj odnos u mjerilu uvijek se poštivao (raspon od 10). Tako je npr. grafički raspon jednak od 10 do 100 ms, kao na primjer i od 0,03 do 0,3 ms, a u odnosu na jakost struje u mA je jednake dužine npr. od 0 do 10 mA ili od 30 do 40 mA. Iz slike 1a i 1b vidi se da je raspon upotrijebljenog mjerila na ordinati bio jednak u odnosu na mjerilo na apscisi, što je prikazano strelicama koje su jednakih dužina. Ako smo na ordinati promijenili sustav, te prešli s linearnog mjerila na logaritamsko, uvijek se čuvao osnovni odnos 1:1, vidi sl. 1b. Da su se mnogi uvaženi autori držali tog osnovnog principa, vjerujemo da bi odavno bile riješene dileme oko oblika I/t krivulja. Ako se poštuje u mjerilu osnovni odnos apscise prema ordinati 1:1, i ako se linearno mjerilo zamijeni logaritamskim, krivulje sa slike 1a pretvaraju se u pravce, vidi sliku 1b. Taj postupak provodimo u našem laboratoriju na I/t krivuljama od 1990 godine. Iz slike 1b također je vidljivo da to pravilo vrijedi, ne samo za prag motoričke podražljivosti, nego i za prag osjetne podražljivosti. Osjetna i motorička podražljivost izmjerene su na istoj motoričkoj točki. Izmjerene vrijednosti motoričke i osjetne podražljivosti dane su tabelarno na tablici 1, a grafički su prikazane na slici 1a i 1b. Mjerenje je provedeno na m. abductor pollicis brevis jednog zdravog ispitanika (N.N., 59 godina). Ako se usporede rezultati koji su brojčano dani na tablici 1, te grafički na sl. 1a i 1b, odmah se uočava da osjetni i motorički pravci teku paralelno i imaju jednake kronaksije. Kronaksije iznose 0,3 ms. Nagib pravca (f) jednak je i zbog toga su pravci međusobno paralelni. Ta nas činjenica upućuje da osjetni i motorički sistem radi po sličnom logaritamskom kodu. Do nedavno su neki autori smatrali da puna linija motoričke krivulje, vidi sl. 1a, na neki način određuje tok osjetne krivulje, tj. da osjetna krivulja treba slijediti u svome toku motoričku krivulju. Iz naše slike je vidljivo da se motorička i osjetna krivulja nakon 1 milisekunde počinju razdvajati. Takvo su mišljenje neki autori imali zbog Katzova utjecaja (2), koji je smatrao da je

krivulja motoričke podražljivosti eksponencijala, a male razlike u njezinu toku prema osjetnoj krivulji, smatrali su kao mogući rasap rezultata u mjerenju.



Sl.1. *M. abductor pollicis brevis sin.* Puna linija: motorička podražljivost. Isprekidana linija: osjetna podražljivost mjerena na istoj motoričkoj točki, prikazane na dva načina a) kao krivulja i b) kao pravac. Kronaksija motoričke podražljivosti i osjetne podražljivosti su jednake i iznose 0,3 ms. Iste kronaksije nas upućuju da je motorički i osjetni sustav podložan sličnom logaritamskom sustavu. Odnos mjerila na slici a) lin-log je 1:1 na slici b) log-log također 1:1. Mjerenje izvršeno na zdravom ispitaniku. (S tablicom 1)

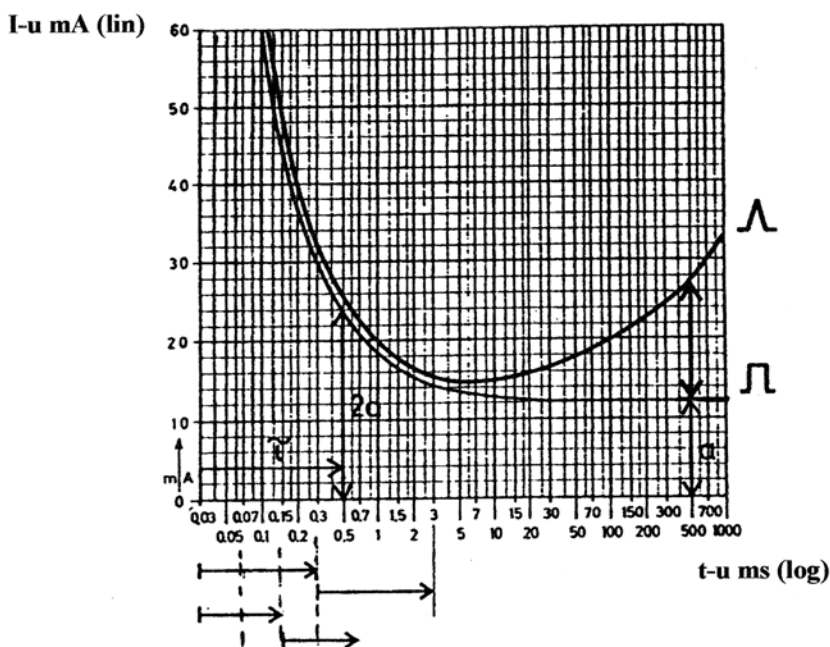
TABLICA 1. Motorička i osjetna podražljivost mjerena na elektromotornoj točki m.abductor pollicis brevis

Vrijeme u ms	□_ Jakost četvrtastog podražaja u mA	
	Motorička podražljivost	Osjetna podražljivost
300	1,0 -----	0,6 ———
100	1,0	0,6
30	1,0	0,6
10	1,0	0,6
3	1,0	0,6
1	1,0	0,6
0,3	2,0	1,2
0,1	4,0	2,0
0,03	9,6	6,4
0,01	16,0	10,4
Kronaksija	0,3 ms	0,3 ms

Mjerenje je izvršeno na zdravom ispitaniku

Međutim, oba međusobno paralelna pravca demantiraju takvo mišljenje. Kada bi osjetna krivulja po svome toku slijedila motoričku krivulju kod prebacivanja u log-log sustav, pravci ne bi bili paralelni, nego bi se križali u jednoj točki. To bi onda u stvarnosti dovelo do paradoksa jer bi se dobivao istodobno motorički i osjetni odgovor ili možda čak motorički prije osjetnoga.

Takvo stanje u fiziološkim okolnostima do sada nije opisano. S druge strane, manja odstupanja nagiba pravca mogla bi poslužiti kao relevantan fiziološki, ali i patološki parametar, koji bi u skladu s ostalim pokazateljima bio koristan u dijagnostici. Opisani fenomen moći će se točno valorizirati tek nakon daljnjih mjerenja i statističke obrade na većem uzorku.



Sl.2. Prikazuje na mrežici I/t krivulje dobivene trokutastim i četvrtastim impulsima. Upotrebljena mjerila su u sustavu lin-log, s time što je njihov odnos $2/3:3/3$, što je prikazano i označeno strelicama. Iz slike je vidljivo da strelice nisu jednakih dužina. (1:). Takvim načinom prikazivanja dobivene krivulje poprimaju tok koji je sličniji hiperboli.

Legenda: a-Reobaza, □-kronaksija

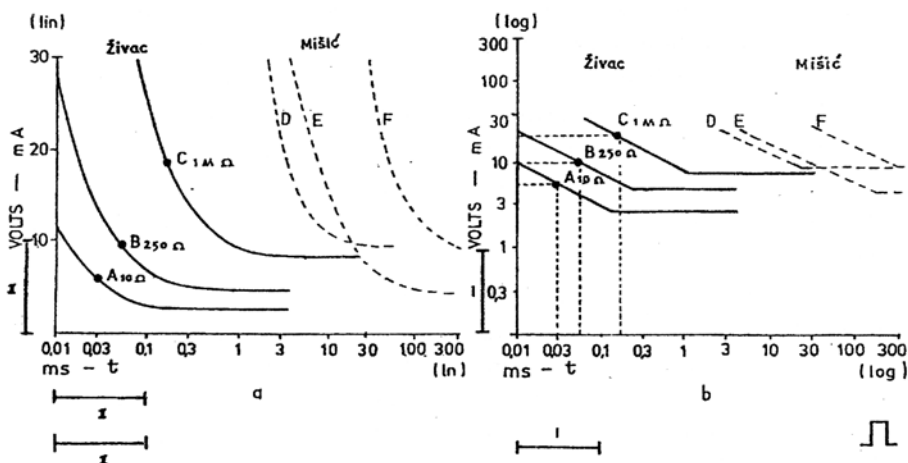
Na slici br. 2 (7) prikazan je tok dviju krivulja, i to motoričke krivulje dobivene četvrtastim impulsima i iznad nje motoričke krivulje dobivene trokutastim električnim impulsima. Krivulja dobivena trokutastim impulsima po svojem toku je nešto iznad krivulje dobivene električnim četvrtastim impulsima. One se međusobno slijede do oko pet milisekunda, kada se počinju razdvajati. Motorička

krivulja s četvrtastim impulsima, koji su dulji od pet milisekunda, dalje ima gotovo horizontalan tok, pa teče paralelno s apscisom. Naprotiv, krivulja trokutastih impulsa sve se više u blagom luku udaljava od apscise što su impulsi dulji u svom trajanju U svom prvom dijelu, gdje obje krivulje teku usporedno, krivulja motoričke podražljivosti četvrtastih impulsa s krivuljom trokutastih impulsa gotovo ima izgled idealne hiperbole (vidi sl. br.2.). Međutim mjerilo ordinate prema apscisi na slici 2 nije 1:1. Iz priložene slike se vidi da raspon na ordinati 0 - 10 nije jednak rasponu 0.03 - 0.3 na apscisi. Njihov temeljni odnos nije 1:1, što je na slici 2 označeno strelicama (dužinama). Vidljivo je da je vertikalna dužina manja za 1/3 od horizontalne. Tako odabrano mjerilo dovodi do toga da su krivulje, dobivene na takav način, oblikom sličnije hiperboli. Ako bi se pak odnos u mjerilu obrnuo, krivulje bi dobile tok koji bi prikazivao eksponencijalu. Mnogi autori, bilo strani ili domaći, u prikazivanju I/t krivulja upotrebljavaju razna mjerila i razne odnose. Tako npr. u knjizi Elektrodijagnostika i elektroterapija, F. Licul (8) na 102. str. prikazuje krivulje motoričke podržljivosti četvrtastim i trokutastim impulsima koje su slične krivuljama prikazanim na sl. br.2., gdje imamo lin-log sustav. Autor se, međutim, ne koristi lin-log sustavom, nego se koristi logaritamsko-logaritamskim odnosom i na apscisi i na ordinati. Njegove krivulje su gotovo idealne hiperbole. Međutim, temeljni odnos mjerila nije 1:1. Osnovno mjerilo na apscisi je za 1/3 manje nego na ordinati (raspon 0,05 - 0,5 ms manji je za oko 1/3 od raspona na ordinati 0 - 10 mA).

Drugi domaći autor u knjižici Fizikalna medicina (Zagreb, 1993. god. Z. Domljan i suradnici) na 64. str. prikazuje I/t krivulju motoričke podražljivosti četvrtastim impulsima isto kao hiperbolu (9). Prvi spomenuti domaći autor (8) upotrebljava log-log sustav, drugi lin-log, ali oba autora zato prilagođavaju mjerila apscise i ordinate, tako da dobivaju hiperbolu. Kod drugog autora odnos temeljnog mjerila je oko 2/3 u korist apscise, prema 1/3 na ordinati. Slike zadnja dva spomenuta autora (8, 9) nismo reproducirali jer su obe krivulje hiperbole i slične su prikazanoj hiperboli na slici br.2.

Posebno je pitanje prikazivanja odnosa četvrtastih impulsa prema trokutastima u krivuljama motoričke podražljivosti. Prema našim saznanjima odnos četvrtastih impulsa prema trokutastima, donekle je valjano prikazan na slici br. 2 jer je poznato pravilo da pogreška prestaje biti pogreškom ako se stalno ponavlja u jednakim uvjetima (7). Međutim, tok krivulje je iskrivljen zbog odstupanja od pravila jer se odnosi temeljnih mjerila nisu uvijek zadržali u odnosu 1:1. Prema tome, iz tako dobivenoga grafikona ne može se zaključiti o točnom toku krivulja, ali se mogu donijeti točni zaključci o njihovu međusobnom odnosu (10). Kao suprotnost slici 2, prikazujemo krivulju Stephensa (11) na slici 3a. Baš zato što Stephens daje važne podatke, kao npr. djelovanje unutrašnjeg otpora stimulatora i njegov utjecaj na I/t krivulju, zatim denervirani mišić D, E i F, te normalni mišić C ($1M\Omega$), sve njegove krivulje, ako ih se interpretira u log-log sustavu, dobivaju

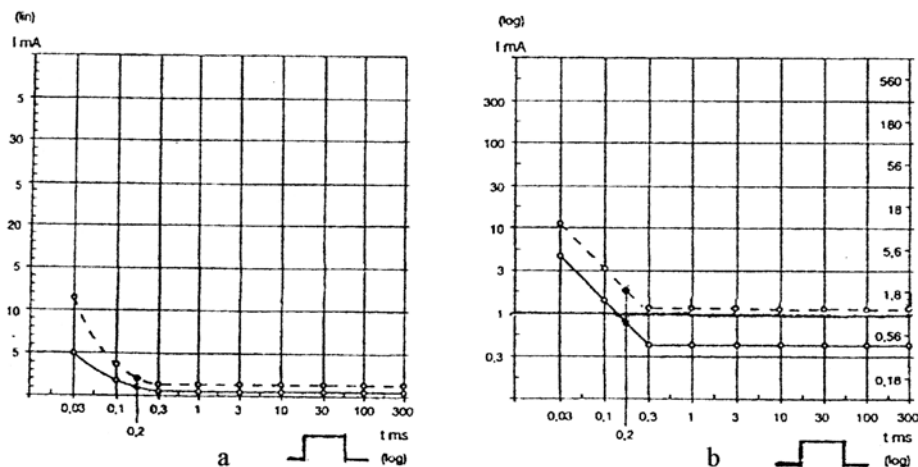
oblike pravaca jer je autor upotrebljavao odnos mjerila 1:1. To pretvaranje krivulja u pravce kod promjene sustava vidi se na slici 3b prema Ljubinu i Knešaureku (3). Na objema slikama, 3a i b, nacrtane su temeljne vrijednosti izvan samog koordinatnog sustava kao dužine koje su međusobno jednake te se mogu prema postojećoj skali izmjeriti i očitati. Dužine su jednake i raspon osnovnih vrijednosti je jednak, npr. 0-10 i 0,01-0,1 (raspon 10). Svi sljedeći grafikoni, motoričke ili osjetne podražljivosti dobiveni četvrtastim impulsima, nacrtani su na našim mrežicama i mjerilima iz kojih je vidljivo da se poštuje pravilo 1:1 temeljnih vrijednosti, bez obzira na sustav koji se upotrebljava (log-log ili lin-log). Zbog toga nećemo to više posebno naglašavati, niti uz nacrtane koordinatne sustave ucrtavati dužine ili strelice koje posebno te odnose ističu. (Sve su slike 1-7 s tabelama su originali, osim slike 3a).



Sl.3. a) Po Stephensu upotrebljeno je mjerilo 1:1 u sustavu lin-log. Na sl.3 b upotrebljen je sustav log-log, ali također u mjerilu 1:1 prema Ljubinu i Knešaureku.

Na slici 4, kojoj je priložena tablica izmjerenih vrijednosti dobivenih na elektromotornim točkama m. abductor digiti V. dextri et sinistri, prikazana je motorička podražljivost - isprekidana linija i osjetna podražljivost - puna linija. U primjeru iz tablice je vidljivo da su brojčano dobivene vrijednosti desne i lijeve strane jednake. Radi toga na slici 4 prikazane su samo dvije krivulje, odnosno dva pravca, od kojih iscrtkana linija prikazuje motoričku podražljivost, a puna linija osjetnu podražljivost. Sve dobivene vrijednosti, motoričke kao i osjetne podražljivosti s njihovim korisnim vremenima i reobazama, imaju iste kronaksije koje u ovom primjeru iznose 0,2 milisekunde (vidi tablicu i sliku br. 4). Osjetni i motorni pravac na grafičkom prikazu imaju jednaki nagib f. Krivulje su slične i imaju tok koji više teži eksponencijali nego hiperboli U drugim slučajevima kod

zdravih ispitanika, gdje smo našli razlike u motoričkim reobazama između lijeve i desne strane istoimenih mišića od oko 0,1 do 0,4 mA, formirale su se krivulje koje su imale različite zakrivljenosti. Krivulje su se počele razdvajati u rasponu od oko 1 milisekunde do oko 0,3 milisekunde. Kada su se te krivulje ucrtale u log-log sustav, dobili smo niz paralelnih pravaca koji su imali jednaki nagib f i iste kronaksije. Pravci su međusobno bili paralelni.



Sl. 4a i b. Krivulja i pravac osjetne podražljivosti - puna linija, motorička podražljivost - isprekidana linija. Osjetna i motorička kronaksija je jednaka i iznosi 0,2 ns. Vrijednost istih kronaksija nas upućuje da je osjetna i motorička podražljivost podložna istom logaritamskom odnosu. Ispitanik N.N. ima 60 god. (vidi pripadajuću tablicu).

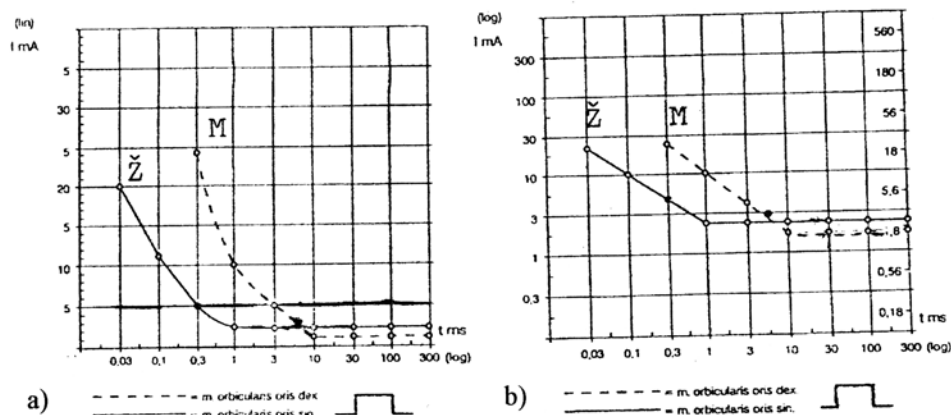
TABLICA 2. Osjetna podražljivost mjerena na elektromotornoj točki M. abductor dig. v. te motorička podražljivost

Vrijeme u ms	Jakost u miliamperima (mA)			
	Desno		Lijevo	
	Osjetna	Motorička	Osjetna	Motorička
300	0,4	1,2	0,4	1,2
100	0,4	1,2	0,4	1,2
30	0,4	1,2	0,4	1,2
10	0,4	1,2	0,4	1,2
3	0,4	1,2	0,4	1,2
1	0,4	1,2	0,4	1,2
0,3	0,4	1,2	0,4	1,2
0,1	1,6	3,2	1,6	3,2
0,03	4,8	12,0	4,8	12,0
Kronaksija	0,2 ms	0,2 ms	0,2 ms	0,2 ms

Ispitanik N.N., 60 god

Sve nas to upućuje da motorni sistem radi prema istom logaritamskom kodu u zdravih ispitanika. Ako usporedimo osjetni sustav s motornim, iste kronaksije nas, također, upućuju da oba sustava rade prema sličnom logaritamskom kodu u zdravih ispitanika (10).

Da bi se imalo konačno stajalište o opisanim pojavama, potrebna je solidna statistička analiza i grafička obrada istoimenih mišića lijeve i desne strane tijela kod većeg broja zdravih bolesnika.



Sl.5 a) i b) Intenzitetnovremenska krivulja i pravac.
Puna linija Ž. zdrav mišić, isprekidana linija M oštećen denerviran mišić*

TABLICA 3. Živčanomišićna podražljivost m. orbicularis oris dex. et sin.

Vrijeme u ms	Jakost u miliamperima (mA)	
	*Desno	Lijevo ——— —————
300	1,6	2,4
100	1,6	2,4
30	1,6	2,4
10	1,6	2,4
3	4,8	2,4
1	10,4	2,4
0,3	24,0	4,8
0,1	-	12,0
0,03	-	20,0
	kronaksija 6 ms	kronaksija 0,3 ms

Bolesnik K.L., 53 god. Dg. Paresis n. facialis dextri

Na slici 5 s pripadajućom tablicom dobivenih vrijednosti, odmah se uočava razlika između zdrave i oštećene strane u bolesnika s Dg. Paresis n. facialis lat.

dex. Na slici 5a i b oštećenu stranu imamo označenu iscrtkanom linijom i ona se može usporediti s punom linijom koja označava zdravu stranu istoimenoga mišića. Razlika se odmah uočava, kako u toku krivulja, tako i u toku pravaca. O problemima denerviranih mišića i toku njihovih krivulja imamo Stephensov prikaz na slici 3a, krivulje D, E i F. Ovdje ne bi ponavljali kako se denervirani mišić, odnosno njegova I/t krivulja pomiče u desnu stranu. Pri tome se produljuje kronaksija te korisna vremena, ali se također mijenja reobaza i prag podražaja je niži. (Vidi sliku 3a). Na slici 3b prikazani su pravci denerviranih mišića koji su, također, pomaknuti u desnu stranu koordinatnog sustava. Ovdje bi se osvrnuli na sam tok denervirane iscrtkane krivulje ako ju usporedimo s punom linijom istoimenoga zdravog mišića. Njihov tok na prikazanoj slici 5a nije jednak. Ako ih međusobno usporedimo, obje su rađene na m. orbicularis oris dextri (oštećen mišić) i m. orbicularis oris sinistri. Iz slike se vidi da je tok krivulje zdravog mišića položeniji dok je tok iscrtkane krivulje strmiji. Ako pogledamo tok obaju pravaca, vidimo da su donekle paralelni, ali je iscrtkani pravac dulji. Dakle, raspon iscrtkanog pravca i krivulje je od 1,6 mA do 24,0 mA, što iznosi 22,4 mA, dok je raspon pune linije kraći, od 2,4 mA do 20 mA, što iznosi 17,6 mA (zdrav mišić). Očito je raspon manji kod zdrava mišića u odnosu na denervirani mišić, a razlika između oštećenoga denerviranog mišića u odnosu na zdravi, u rasponu iznosi 4,8 mA. Međutim, taj odnos nije stalan. Tako npr. na slici br 7. imamo raspon koji je obrnut, a nalazimo ga u kroničnih oštećenja. Tom problemu trebala bi se pokloniti veća pozornost, a naša je pretpostavka da bi raspon, također, mogao biti jedan od vrijednih osnovnih parametara, kako u grafičkom prikazivanju, tako i u matematičkoj obradi. Iz prikazanih grafova se vidi da je razlika između zdravog mišića Ž i oštećenog M očita, i u položaju krivulja, i u položaju pravaca. Najveća razlika uočava se u kronaksijama koje su na našoj slici označene crnim točkama. U zdravim mišićima iznosi - 0,3 ms, a u oštećena istoimena mišića 6 - ms. Također, različita su sva korisna vremena i njihove reobaze. Punu krivulju na prikazanom grafu dobivenu na zdravom mišiću, možemo nazvati i krivuljom živca Ž jer se izravnim podraživanjem njegove elektromotorne točke, podražaj u stvari širi preko motoričkog živca i njegove motoričke ploče, dok kod denerviranog mišića izravno podražujemo mišićna vlakna. Zato iscrtkanu liniju možemo nazvati linijom mišića M. Denervacija je teža što se krivulja ili pravac pomiču više u desnu stranu. Ako klinički pratimo kakvu kontrakciju ima zdrav mišić, tada vidimo da je kontrakcija na električni podražaj brza (munjevita), dok je kod denervirana mišića spora (crvolikija), Elektromotorna točka pomiče se distalnije prema njegovu trbuhu. Na prvi pogled, budući da je motorički živac smještem anatomski bliže elektrodi, očekivali bismo da će reagirati na slabiji električni podražaj nego kada podražujemo denervirani mišić, koji je po anatomskom položaju smješten dublje pa očekujemo da bi morao reagirati tek na jači električni podražaj. Iz krivulja i pravca vidimo da je u stvarnosti obrnuto.

Ako detaljnije analiziramo oblik krivulja \dot{Z} i M , i međusobno ih usporedimo, u prvi nas trenutak iznenađuje da one nisu jednake po svom obliku. Oblici krivulja promatrani preko pauspapira, ne podudaraju se kada ih pomoću svjetla pokušavamo preklopiti jednu preko druge. Svaka od krivulja ima svoj oblik i svoju dužinu. Motorička ploča pojačava neuralni potencijal pomoću elektrokemijskih procesa, koji na taj način mogu podražiti mišićna vlakna. Pojačanje motoričke ploče u fiziologiji treba funkcionirati u linearnom odnosu. Po tome bi se očekivalo da je puna linija krivulje \dot{Z} jednaka po obliku krivulji M . Na slici 4a i tablici vidljivo je da im oblik nije isti. To nas navodi da obratimo pozornost na moguće uzroke:

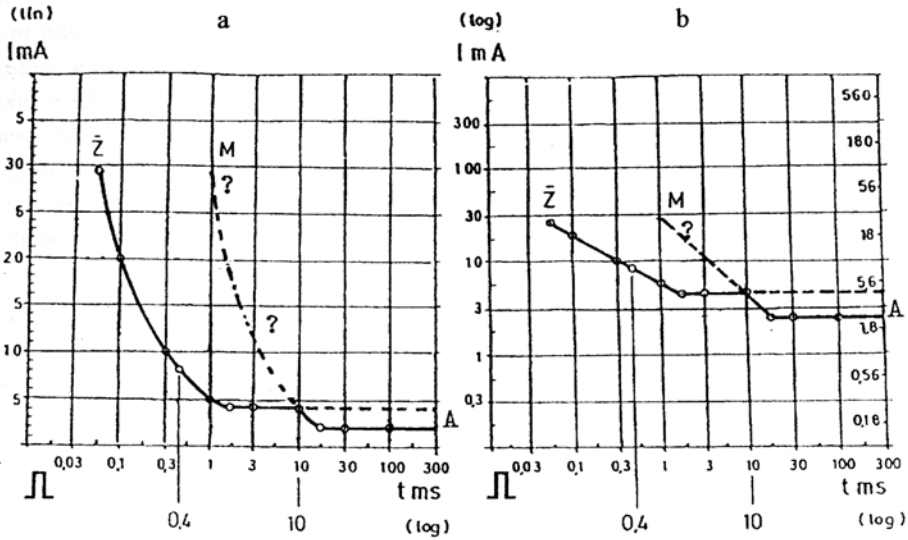
1. Krivulje bi mogle biti nejednake zbog nepreciznosti električnog stimulatora
1. Krivulje bi mogle biti nejednake zbog mogućih pogrešaka u toku mjerenja samog ispitivača, (pomaka elektrode s motorne točke ili pogrešnog očitavanja i drugo)
1. Krivulje bi mogle biti različite zbog neprilagođenosti mrežice, tj. sistema u crtanju grafova
1. Krivulje nisu jednake zbog drugačijeg metabolizma denerviranoga mišićnog vlakna, što je uzrokom patološkim elektrokemijskim procesima u denerviranom mišiću, a to opet rezultira drugačijom ekscitabilnošću na električni podražaj

Uspoređivanjem raznih stimulatora, upotrebljavanjem različitih tehnika u mjerenjima, kao i kontrolom dobivenih rezultata, mislimo da prva tri moguća uzroka, uz potrebnu pozornost, možemo potpuno kontrolirati. Četvrti uzrok potvrđuje se i već spomenutim parametrima koji su potpuno različiti. To su: kronaksije, reobaze i različita korisna vremena. Prikazivanje neuromišićne podražljivosti u log-log sustavu daje nam prikaz u obliku pravca \dot{Z} , zdrav mišić, i pravac M , crtan iscertkanom linijom, denervirani mišić. Ako oba pravca međusobno usporedimo, vidimo iz sl. 4b, grafikona i tablice da je denervirani pravac dulji, tj. da ima veći raspon (iscrtkani pravac je dulji).

Iz ranih istraživanja je poznato, da nakon denervacije, mišić postaje podražljiviji. Acetil-holin se s motoričke ploče proširi po cijelom mišićnom vlaknu. Mišić se može podražiti na drugim mjestima, a ne samo na elektromotornoj točki jednim minimalnim električnim podražajem. Sve to upućuje da je metabolizam denervirana mišića drugačiji od normalnog mišića. (21 dan nakon oštećenja - akutno oštećenje i kronično oštećenje nakon 6 mjeseci ili više).

Na dosadašnjim grafovima bile su prikazane krivulje i pravci zdravih i denerviranih mišića. Postoji mogućnost kod djelomičnog oštećenja, dakle parcijalno denerviranih, da krivulja ima dva ili više ispupčenja, a pravac nekoliko koljena koji su dobiveni s jedne elektromotorne točke parcijalno denervirana mišića. Na grafu 6 a i b prikazan je primjer parcijalne denervacije dobivene na istoj elektromotornoj točki m. interosseus dors. I. dex. Dg. Status post vulnus scissum antebrachii dex.

(Bolesnik Z.M., 40 god.). Ako uz lin-log sustav prikazemo na grafu i log-log sustav, dobivamo grafove na kojima se krivulje pretvaraju u pravce.



Sl.6. *M. interosseus dorsalis I. dex. Dg. Status post vulnus scissum antibrachii dex. Bolesnik Z. M., 40 god. Parcijalna denervacija sastoji se iz dvije krivulje slika a, krivulja Ž i krivulje M, ili dva pravca slika b, pravca Ž i pravca M.*

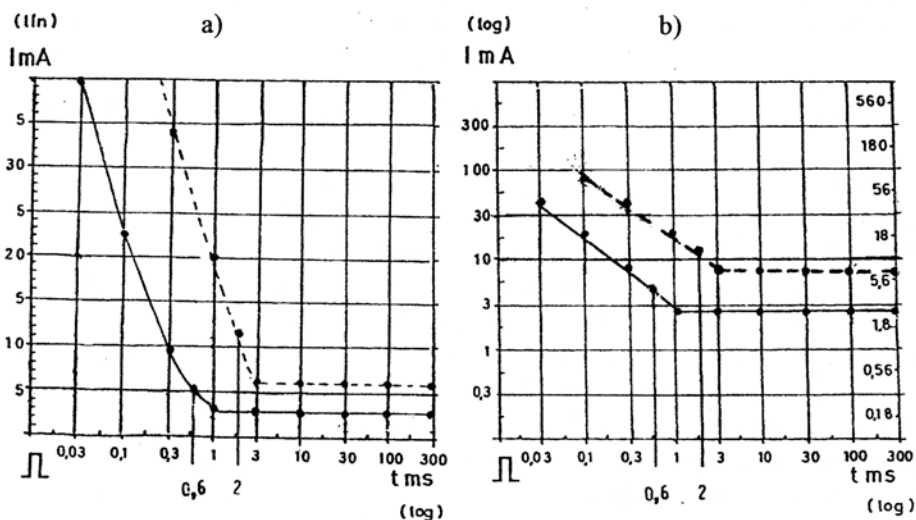
Legenda: slika a) Puna linija - krivulja A je krivulja motoričke podražljivosti i ima dva trbuha ispučenja. Na slici b, puna linija predstavlja pravac koji je lomljen te ima tri koljena.

Oblik krivulje A - puna linija i oblik izlomljenog pravca A koji ima više koljena, također puna linija, tumači se time što su pojedini aksoni propali, a drugi ostali sačuvani. Zbog toga na istoj elektromotornoj točki možemo dobiti jednu nepravilnu krivulju A, koja se zapravo sastoji od dviju krivulja, i to krivulje živca Ž i krivulje mišićnih vlakana M (denervirana krivulja - vidi sliku 6a). Budući da se njihov tok križa, dobivamo jednu zajedničku krivulju A sa dva trbuha, dakle nepravilnu po obliku. Na slici se također vidi da nakon pune linije Ž, slijedi njezin crtkani dio. Također, imamo krivulju M koja je sastavljena iz dva dijela, i to isprekidane linije i pune linije. Krivulja Ž i krivulja M se sastaju te tako nastaje krivulja A sa dva ispučenja ili dva trbuha. Pri tome krivulja Ž ima svoj tok sigurno određen jer se reobaza od 10 ms na više, npr. do 1000 ms, ne mijenja, što je grafički prikazno kao horizontalna linija u tom dijelu grafikona. Krivulja Ž ima tok zdravog mišića (Ž-živac). Krivulja M ima snižen prag podražljivosti i njezina točka kronaksije od 10 ms, upravo je točka gdje se križa s krivuljom Ž. Ostali uzlazni njezin dio (iscrtkana krivulja) može se samo pretpostaviti jer je prikriven kontrakcijama krivulje Ž. Ako takve krivulje prikazemo u obliku pravca, koji imaju svaki svoje koljeno kada prelaze u horizontalnu liniju, dobivamo pravac M i

pravac Ž. Pravac Ž i pravac M ustrojavaju izlomljeni pravac A. Pravac M je pravac mišićne podražljivosti, a pravac Ž živčane podražljivosti. Na taj način možemo pretpostaviti unaprijed gdje se nalaze liminalne točke mišićne, odnosno živčane podražljivosti. Prisjetimo li se da je pravac određen s dvije točke, što nam pruža mogućnost da, ako slijedimo tok pravca, možemo pretpostaviti unaprijed gdje se nalaze liminalne točke mišićne, odnosno živčane podražljivosti. Pogreške u takvoj procjeni će biti manje ako s više točaka odredimo tok pravca. Određivanje točaka korisnih vremena unaprijed, nije moguće pomoću krivulja, ali nam je moguće pomoću pravca. Poznato je da neki suvremeni, ali konzervativni autori, još uvijek smatraju da krivulje imaju eksponencijalni tok, dok drugi-konzervativniji smatraju da imaju tok hiperbole.

Iz slika 6a i b vidljivo je da kronksije krivulje i pravca Ž iznose 0,4 ms, a kronaksije krivulje i pravca M 10 ms. Parametri liminalne podražljivosti mogu se lakše odrediti s iscrtkanim pravcem nego s iscrtkanom krivuljom. Zbog toga znak upitnika na slici 6 pokazuje veću mogućnost pogreške s krivuljom (dva ?), nego s pravcem (jedan ?).

Prednosti grafičkog prikaza živčanomišićne podražljivosti u obliku pravca



Sl.7. a) i b) *M. tibialis dex. et sin.* Intenzitetno vremenska krivulja i pravac. Legenda: teško oštećen denerviran mišić desne potkoljenice isprekidana linija - - - - - Puna linija - — lakša oštećenja. Kronaksija desno 2 ms, lijevo 0,6 mc. Godinu dana nakon operativnog zahvata (ELS. br. 578/81) Klinički peronealni hod desno. (S tablicom 4).

TABLICA 4. Motorička podražljivost M. tibialis anterior dex. et sin.

Podražljivost četvrtastim impulsima	Jakost u miliamperima (mA)	
	Desno -----	Lijevo -----
Vrijeme u ms		
300	6	2,6
100	6	2,6
30	6	2,6
10	6	2,6
3	6	2,6
1	20	2,6
0,3	34	9,4
0,1	62	22,0
0,03	-	40,0
Kronaksija	2 ms	0,6 ms

Bolesnik K.S., 44 god. Dg. Status post laminectom. L₄-L₅ Paresis n. peronei lateris dextri.

Do sada smo na nekoliko slika usporedno prikazivali živčanomišićnu podražljivost kao krivulje i kao pravce. Ta usporedba je moguća na grafovima sl. 1a i b, sl. 3a i b, sl. 4a i b, sl. 5a i b, sl. 6a i b te na kraju na slici 7a i b. Uz sve te slike kod objašnjenja toka krivulja i pravaca, dani su i komentari s ocjenama korisnosti, kako krivulja, tako i pravaca. Ovdje ćemo se još posebno osvrnuti na neke osobitosti i prednosti grafičkog prikaza i živčanomišićne podražljivosti u obliku pravca. Grafički prikaz praga osjetne podražljivosti, uz motoričku podražljivost, prikazan je na dvije slike: 1a i b s pripadajućom tablicom i na sl. 4a i b, također s pripadajućom tablicom. Iz slika se vide zakonitosti odnosa između praga osjetne podražljivosti i praga motoričke podražljivosti. Možemo ustvrditi da se osjetna podražljivost radila rijetko u odnosu na česta mjerenja motoričke podražljivosti. Osnovni razlog tomu je što je za određivanja praga osjetne podražljivosti bila potrebna velika kooperativnost ispitanika. Naime, od ispitanika se zahtijeva da obavijesti ispitivača kada zadani električni podražaj osjeti. Ako ispitanik daje netočne odgovore, ne postoji mogućnost da se pomoću jednostavne i jeftine metode utvrdi ispitanikova nekooperativnost. Prikaz osjetne podražljivosti u obliku pravca (sl. 1b i sl. 4b) daje novu mogućnost ispitivaču da prateći pravac, nakon što ga je odredio s prve dvije točke unaprijed, zna gdje je sljedeća točka osjetne podražljivosti. To se ne može predvidjeti na grafikonu ako se upotrebljavaju krivulje za koje neki misle da prikazuju hiperbolu, a drugi eksponencijalu. Prema smjeru pravca u koordinatnom sustavu, ispitivač zna unaprijed gdje se moraju nalaziti ostale točke liminalne podražljivosti. Takav novi podatak daje ispitivaču bolju orijentaciju o kooperabilnosti ispitanika, što je bitno u osjetnoj podražljivosti, ali se,

također, može koristiti u nekim posebnim okolnostima te u određivanju motoričke podražljivosti. Teorijski, ako imamo određen pravac motoričke podražljivosti, a njega možemo dobiti bez suradnje ispitanika, dovoljno je za određivanje pravca osjetne podražljivosti da imamo točno izmjerenu samo jednu točku osjetne podražljivosti. Naime, ako pogledamo sl. 1b i sl. 4b, pravac osjetne podražljivosti možemo odrediti tako da povučemo paralelan pravac s motoričkim pravcem. To, dakako, vrijedi uz pretpostavku da su u ispitanika oba pravca paralelna. Također, želimo ukazati na prednosti paralelne usporedbe ako se krivulje prikazuju i u obliku pravaca. Postoji parametar koji se ne može promatrati na krivuljama, a svojstven je samo pravcu koji se grafički prikazuje u koordinatnom sustavu. To je nagib pravca označen sa simbolom f . Usporedba nagiba pravaca istoimenih mišića, kao i nagibi pravaca osjetnog sistema prema motornom, pruža mogućnost dodatne analize, što nam s krivuljama nije bilo uopće moguće. Na sl. 7a i b prikazane su krivulje i pravci u jednoga kroničnog bolesnika koji ima teško oštećenje donjega motornog neurona.

Bolesnik K. S., 44 god. Dg. Status post laminectomiam L₄-L₅, Paresis n. peronei dex. Ispitivanje je obavljeno godinu dana nakon operativnog zahvata. U pregledu tipičan peronealni hod desnom nogom. Sl. 7a i b prikazuje dobivene krivulje i pravce. (ELS br. 578/81). Ispitivani mišić m. tibialis anterior prikazan je kao I/t krivulja i kao I/t pravac na sl. 7a i b, s pripadajućom tablicom. Iz slike je vidljivo da je reobaza teže oštećena mišića veća, tj. prag podražljivosti je viši. Kronaksija desnog m. tibialis ant. iznosi 2 ms, lijevo 0,6 ms. Ako pogledamo odnos pravaca istoimenih mišića, vidimo da pravci ne teku paralelno. Raspon teško oštećena mišića (desno) s lakše oštećenim istoimenim mišićem (lijevo) različit je. Oba pravca teku pod drugim kutem u koordinatnom sustavu. Međusobnom usporedbom I/t pravaca vidi se da zbog različitoga kuta-nagiba pravci međusobno nisu paralelni. Kronično teško oštećeni mišić ima tok pravca koji je položeniji od I/t pravca, koji je strmiji u istoimena mišića (lijevo), gdje imamo lakše oštećenje. Ako sl. 7b usporedimo sa sl. 5b, vidimo da oštećeni mišić, koji je također prikazan iscrtkanom linijom, nema isti nagib kao na sl. 7b. Tok pravca je na sl. 5b okomitiji i raspon je veći ako se usporede zdravi i oštećeni mišić, dok je kod pravca na sl. 7b pravac položeniji i raspon je drugačiji u odnosu na istoimeni mišić. Zaključno bismo trebali reći da u kroničnih oštećenja reobaza raste, raspon postaje drugačiji i kut pravca položeniji. U svježih akutnih oštećenja reobaza pada, a prag podražaja je manji, pravac je okomitijeg toka i većeg raspona. Prema prijašnjim opisima grafova, vide se razlike u kronaksijama, korisnim vremenima i reobazama između zdravih i oštećenih-denerviranih mišića.

Diskusija

Nema nikakve sumnje da je prikazivanje neuromišićne podražljivosti u obliku I/t pravaca, matematički ili grafički, jedan novi momenat koji nam

produbljuje elektrodiagnostičku analizu I/t krivulje. To je pokazano na grafikonima od 1 do 7, gdje su dana objašnjenja. Po našem mišljenju, osim toga, nagib pravca daje osnove nekim hipotezama.

Postoji, naime, u grafičkom prikazu prednost pravca prema krivulji. Parametar koji se ne može promatrati na krivulji, a svojstven je samo pravcu koji se grafički prikazuje u koordinatnom sustavu, nagib je pravca označen sa simbolom f. Nagib pravca ili kut pravca određuje njegov položaj u koordinatnom sustavu pa prema tome pravac može biti položeniji ili strmiji.

Membranski potencijal je temelj svih električnih pojava polarizirane stanice. Ako pretpostavimo da je stanična membrana oštećena, razlika membranskog potencijala zbog povećane propustljivosti iona, koji su nosioci električnog naboja-potencijala, bit će mala, selektivnost membrane smanjena, razlika u naponu bit će manja između izvanjske strane membrane (+) i unutarnje strane membrane u mirovanju (-). Za vrijeme podražaja, tj. negativizacije na površini stanice i zatim ponovne repolarizacije, bit će prisutne električne promjene akcionih mišićnih potencijala (AMP). U miopatija registrirat ćemo u elektromiografskoj slici akcione mišićne potencijale kratke po trajanju i niske amplitude u odnosu na neuropatije, gdje ćemo registrirati akcione mišićne potencijale dulje po trajanju i povišene po amplitudi. Oštećene mišićne stanice imaju oštećenu mišićnu membranu, što znači da imaju promijenjenu selektivnost - propustljivost za različite ione. Selektivnost je zbog oštećenja same membrane promijenjena. Dakle, u normalnom mišićnom vlaknu selektivnost je velika, u oštećenom je smanjena. U normalnom mišićnom vlaknu, selektivnost propustljivih pojedinih iona je ograničena, i to samo za one nosioce naboja koji su po svojoj veličini takvi, da mogu biti propušteni kroz pore membrane. U oštećenom mišićnom vlaknu, odnosno njegovoj membrani, propustljivost je povećana, odnosno selektivnost je smanjena jer polupropusna membrana propušta nosioce naboja različitih veličina.

Kod podraživanja mišićnog vlakna, tj. njegove depolarizacije s četvrtastim električnim impulsima, raspon motorne podražljivosti je kod oštećenja membrane drugačiji, nego u normalne membrane pa je prema tome i podražljivost drugačija.

U prikazivanju neuromišićne podražljivosti pravcem, nagib pravca se, također, može mijenjati u neuropatijama i miopatijama gdje dolazi do promjena podražljivosti živčane ili mišićne stanice, tj. do stvaranja drugačijega membranskog potencijala. To ima svoj odraz na svim elektrodiagnostičkim parametrima, kao npr. na reobazi, kronaksiji, rasponu i dr. Zaključno bismo mogli kazati da je nagib pravca, također, jedan od parametara u procjeni neuromišićne podražljivosti i jedan od pokazatelja stanja stanične membrane. Ovakav pristup, koji se temelji na novom načinu prikazivanja neuromišićne podražljivosti kao I/t pravca, omogućuje nova istraživanja. Nagib pravca djelomično je obrađen u radovima Ljubina i Knešaureka (3,4,5), ali za konačnu ocjenu opisanih pojava, kao npr. raspona pravca, potrebna su mjerenja i analize na većem broju zdravih i bolesnih ispitanika.

Sve izneseno omogućava bolju i potpuniju analizu neuromuskularne podražljivosti i nove spoznaje. Stalan napredak znanosti te sve savršenija računala, koja nam odmah nakon upisanih podataka grafički prikažu I/t pravce ili krivulje, dodatno nam otvaraju nove mogućnosti u elektrodijagnostici niskofrekventnim strujama.

Zaključak

Grafičko prikazivanje neuromišićne podražljivosti električnim četvrtastim impulsima kao I/t pravac i kao I/t krivulja ima svoje opravdanje.

Prema prikazanim grafovima, kao i dugogodišnjem iskustvu sa I/t krivuljama, a od 1990. godine sa I/t pravcem, može se ustvrditi da je pretraga korisna, pouzdana i vrijedna dijagnostička metoda. Ta pretraga omogućuje i bolji terapijski pristup jer omogućava određivanje točnih parametara, a u svrhu provođenja fizikalne terapije s električnim četvrtastim impulsima. (Električna mišićna stimulacija, skraćeno EMS). Prednosti grafičkog prikazivanja neuromišićne podražljivosti četvrtastim električnim impulsima u obliku I/t pravca te u obliku I/t krivulje, zaključno se mogu sažeti u nekoliko točaka.

1. Grafičkim prikazivanjem I/t odnosa pravcem dobiva se veći broj informacija o stanju neuromišićnog sustava donjega motornog neurona, ali i osjetnoga donjega neurona, ako se taj odnos prikaže grafički s pravcem i krivuljom. (Pravac + krivulja).
2. Kod grafičkog prikazivanja motorne podražljivosti I/t odnosa s pravcem, pruža se mogućnost bolje analize i usporedbe lijeve i desne strane istoimenih mišića, kako u fiziologiji (kronaksije, reobaze, korisna vremena, nagib pravca i dr.), tako i u patologiji (degenerativna mišićna reakcija i dr.). (Pravac + pravac).
3. Prikazivanjem I/t odnosa pravcem pruža se bolja mogućnost usporedbe motornog pravca s osjetnim pravcem. (Motornog i osjetnog sustava) (Motorni pravac + osjetni pravac)
4. Pruža se mogućnost lakšeg prikazivanja i zatim usporedbe osjetnog pravca s osjetnim pravcem identičnih osjetno-motornih točaka lijeve i desne strane tijela. (Osjetni pravac + osjetni pravac)
5. Mogućnost prikazivanja i bolje usporedbe osjetnog pravca i osjetne krivulje s motornim pravcem i motornom krivuljom iste i suprotne strane tijela. (Motorni pravac i krivulja + osjetni pravac i krivulja)

Literatura

1. Hoorweg J L Weiss G. Matematische Darstellung, das Gesetz von Hoorweg und Weiss U: Hans J, und Schuhfried , Niederfrequente Strome zur Diagnostic und Therapie, Verlag Wilhelm Maudrich Wien 1974 .
2. Wynn Perry C B. Strength-Duration Curves U: Licht S. Electrodiagnosis and Electromyography. New Haven Elizabeth Licht 1961, 241-271.
3. Ljubin Č. Knešaurek K. Prikazivanje intenzitetno-vremenske krivulje u obliku pravca. An. Klin. bol. "Dr M. Stojanović" 29(3-4), 1990.
4. Ljubin Č. Živčanomišična podražljivost facijalnog živca u obliku pravca. Symp. otorhinolaryngol. Zagreb 1992, 27:63-69.
5. Ljubin Č. A modern representation of neuromuscular excitability in the form of intensity-duration curve or line. Electromyogr. clin. Neurophysiol. 1993,33,341-346.
6. Sabol R. Elektrostatogramska fenomenologija Elektrofiz. 1971,14-24.
7. Ljubin Č. Povijesni razvoj intenzitetno-vremenske krivulje I/t u klinici za Fizikalnu Medicinu Rehabilitaciju i Reumatologiju Med. fakulteta u Kliničkoj bolnici "Sestre Milosrdnice" Spomenica, Redak, Iločka 13, Split 1996,169-175.
8. Licul F. Elektrodiagnostika i elektromiografija, Školska Knjiga Zagreb 1981.
9. Domljan Z. i sur. Fizikalna Medicina Medicinski fakultet sveučilišta u Zagrebu 1993.
10. Ljubin Č. Određivanje akomodabilnosti U: Jajić I. i sur. Fizikalna Medicina, Medicinska Knjiga Zagreb, 1996.
11. Stephens W G S. (1971a) Factors influencing the determination of the rheobase of human muscle, Proc. roy. Soc. Edin. B, 71, 61-71.