5. Diagnostyka neurofizjologii klinicznej w ortopedii i rehabilitacji

(Diagnostics of clinical neurophysiology in orthopaedics and rehabilitation)

JULIUSZ HUBER

Słowa kluczowe

neurofizjologia kliniczna, diagnostyka funkcjonalna układów mięśniowego i nerwowego, elektromiografia, elektroneurografia, ruchowe potencjały wywołane, somatosensoryczne potencjały wywołane, neuromonitoring neurofizjologiczny

Definicja

W ortopedii i rehabilitacji badania neurofizjologii klinicznej wspomagają ocenę kliniczną czynności mięśni i przewodnictwa impulsów w nerwach oraz drogach eferentnych i aferentnych układu nerwowego ośrodkowego na różnych jego poziomach. Umożliwiają ukierunkowanie i dynamiczną ocenę wyników leczenia chirurgicznego lub farmakologicznego oraz zachowawczego (kinezyterapeutycznego i/lub fizykoterapeutycznego).

Czynność mięśni w warunkach relaksacji oraz podczas skurczu dowolnego ocenia się EMG, która metodycznie dzieli się na nEMG (ryc. 1A) oraz sEMG (ryc. 1B). sEMG przydatna jest do wstępnych badań przesiewowych przed aplikacją nEMG,, umożliwia najtrafniejszy wybór mięśnia z wykładnikami dysfunkcji MU.

W każdym zapisie EMG w warunkach skurczu maksymalnego trwającego 5 sekund ocenia się parametry amplitudy (w μV) i częstotliwości (w Hz). W rejestracjach tych wzrost częstotliwości pojedynczych (nEMG) czy sumarycznych (sEMG) MUAP powyżej 100 Hz przemawia za patologią pierwotnie mięśniową, natomiast spadek tego parametru w zakresie 60–10 Hz (ryc. 1Ac) opisuje uszkodzenie mięśnia o źródle neurogennym z różnym stopniem nasilenia.

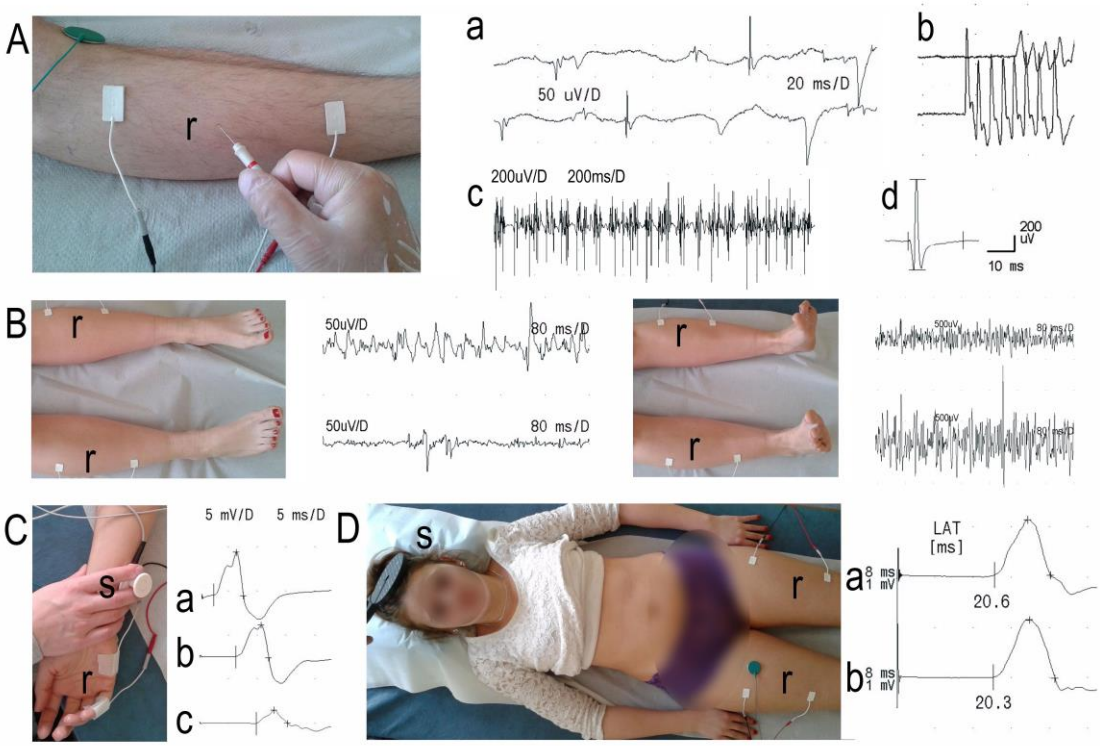
Ze względu na lateralizację funkcji ruchowej dopiero różnica w spadku amplitudy przy rejestracjach sEMG z jednoimiennych grup mięśniowych >20% określa zjawisko niedowładu (ryc. 1B, prawa strona).

— Podczas relaksacji mięśni w rejestracji nEMG obecność dodatnich potencjałów odnerwienia lub fibrylacji (ryc. 1Aa) potwierdza zmiany neurogenne w mięśniu, fascykulacji — źródła uszkodzenia na poziomie ciała komórki ruchowej, natomiast obserwacja ciągów miotonicznych lub pseudomiotonicznych — proces patologiczny pierwotnie mięśniowy. Obecność multipletów w rejestracjach nEMG (ryc. 1Ab) po wywołaniu niedokrwienia i hiperwentylacji, może sugerować następstwa tężyczki utajonej.

— W trakcie skurczu dowolnego, w rejestracjach nEMG z >20 pojedynczych MU, określenie w stosunku do normy tendencji wzrostu amplitudy, czasu trwania oraz pola powierzchni MUAP (ryc. 1Ad) potwierdza uszkodzenie neurogenne, natomiast ich spadek — uszkodzenie miogenne.

— Polifazowość potencjałów (>3) występuje w obu rodzajach uszkodzeń mięśni. sEMG ze średnią amplitudą potencjału spoczynkowego <25 μV definiuje prawidłowe napięcie mięśniowe z punktu widzenia badań neurofizjologii klinicznej (ryc. 1B, górna rejestracja po stronie lewej).

Wyniki badań ENG (ryc.1C) umożliwiają podział mono- lub polineuropatii na aksonalne (zwyrodnienie aksonów, spadek wyłącznie amplitudy fali M lub potencjałów SCV), demielinizacyjne (odcinkowa demielinizacja, wydłużenie wyłącznie latencji fali M lub potencjałów SCV), wskazują na blok przewodnictwa (ryc. 5.1Ca-c, w tzw. badaniu odcinkowym) w obrębie włókien ruchowych (badanie fal M i F), czuciowych (badanie SCV) lub o charakterze mieszanym. Precyzują również poziom uszkodzenia nerwu (proksymalny lub dystalny; korzenie rdzeniowe, okolica Erba, ramienia, przedramienia oraz nadgarstka) (tab. 1).



Legenda: s — miejsce stymulacji, r — miejsce rejestracji

Rycina 1. Fotografie ilustrujące podstawowe założenia metodyczne wybranych badań neurofizjologii klinicznej z przykładami rejestracji wyników: A — metodyka badania nEMG (a — przykład rejestracji dodatnich potencjałów odnerwienia i fibrylacji w trakcie relaksacji mięśnia; b — przykład rejestracji multipletów u chorej z podejrzeniem tężyczki utajonej; c — przykład rejestracji czynności jednostek ruchowych u chorego ze schorzeniem neurogennym w trakcie maksymalnego skurczu; d — oznaczenie parametrów amplitudy i czasu trwania w trakcie rejestracji pojedynczego MUAP); B — metodyka rejestracji sEMG w trakcie relaksacji mięśni oraz podczas ich maksymalnego skurczu u chorego z wykładnikami zwiększonego napięcia mięśniowego i dysfunkcji neurogennej po stronie prawej - górne rejestracje; C — metodyka badania ENG-fali M po naskórnej stymulacji elektrycznej nerwu łokciowego (a — na poziomie nadgarstka; b — poniżej rowka nerwu; c — powyżej rowka nerwu); D — metodyka rejestracji MEP (z mięśni prostych uda a — prawej i b — lewej strony po stymulacji przezczaszkowej kory ruchowej pojedynczym bodźcem magnetycznym).

— Badanie fali F w testach ENG umożliwia określenie zmian w przewodnictwie włókien ruchowych korzeni brzusznych na danym poziomie unerwiania somatotopicznego neuromeru rdzenia kręgowego. Ogólnie, kiedy w teście ENG wywołania każdorazowo 20 fal M za pomocą 20 bodźców elektrycznych częstość rejestrowanych fal F jest mniejsza niż 14 oraz wydłużenie interlatencji fal M–F przekracza dopuszczalną normę, sugeruje to poziom korzeniowy patologii przewodnictwa ruchowego (tab. 1).

— Badanie fali H w testach ENG umożliwia ocenę przewodnictwa nerwowego we wszystkich elementach monosynaptycznego łuku odruchowego.

— Badanie SEP polega na rejestracji uśrednionych potencjałów czuciowych w obwodowym (odpowiednik SNAP) i ośrodkowym układzie nerwowym (na poziomie rdzenia kręgowego i nadrdzeniowo). Wykonuje się je w przypadkach podejrzenia blokady przewodnictwa aferentnego lub oceny jego nasilenia od poziomu receptora aż do drugostronnej kory czuciowej.

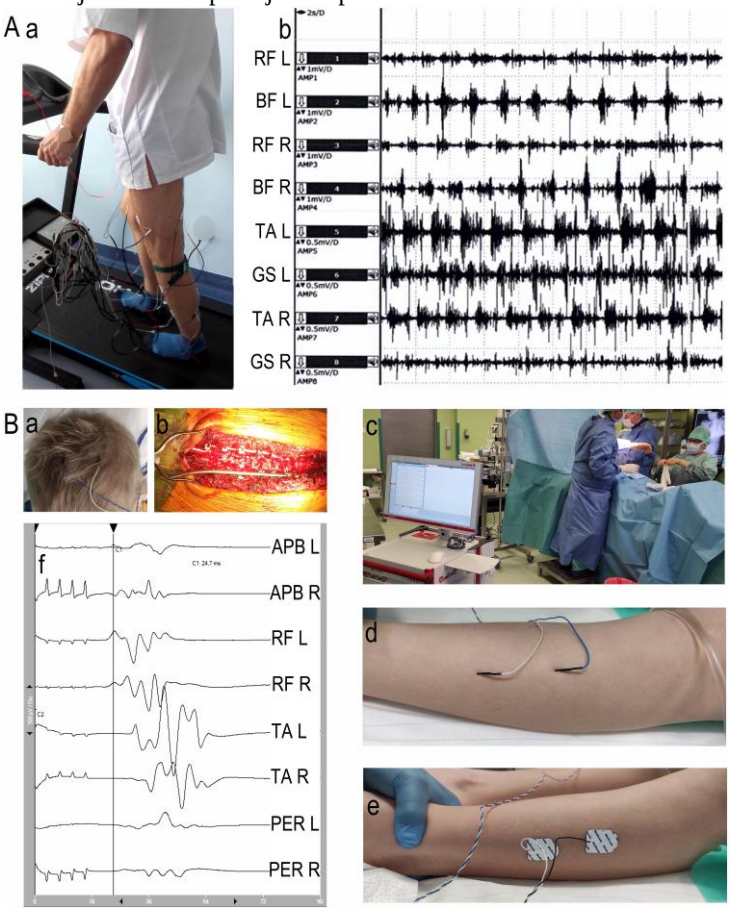
nEMG jest badaniem o niewielkiej wartości diagnostycznej u małych dzieci, u których preferuje się wykorzystanie badań sEMG oraz potencjałów wywołanych. Badanie SEP w diagnostyce chorych po częściowych urazach rdzenia kręgowego ma ograniczoną wartość z uwagi na aspekty metodyczne.

Przewodnictwo eferentne ośrodkowe i obwodowe monitoruje się coraz częściej z wykorzystaniem metody MEP, w której wzbudzenie impulsu nerwowego wywołuje się wiązką pola magnetycznego (ryc. 1Da, b).

Różnicowanie objawów zaburzeń transmisji nerwowo-mięśniowej (miastenia związana z blokiem postsynaptycznym lub zespół Lamberta–Eatona związany z blokiem presynaptycznym) umożliwia test stymulacji bodźcami elektrycznymi o dużej częstotliwości (w diagnostyce miastenii nazywany dekrementem).

Do oceny stopnia percepcji czucia powierzchniowego oraz przewodnictwa aferentnego od poziomu receptora do ośrodków kory mózgu wykorzystuje się również badanie IC-SD. Razem z metodą badania filamentami von Frey (FvF)

umożliwiają one precyzyjne różnicowanie przeczulicy, czucia prawidłowego oraz niedoczulicy.
Badania neurofizjologiczne przeprowadza się według ustalonych standardów, ale są one modyfikowane w odniesieniu do diagnozowanego zespołu chorobowego (tab. 1). Wyniki są porównywane z normami ustalonymi dla wszystkich opisywanych metod badawczych co 5 lat, w populacji zdrowych ochotników obu płci z uwzględnieniem przedziałów wiekowych. Zapis EMG „niedojrzały", rejestrowany podczas próby maksymalnego skurczu u dzieci do 14. roku życia, cechuje się zmiennością bardziej amplitudy aniżeli częstotliwości. Po 40. roku życia jednostki ruchowe podlegają naturalnemu procesowi starzenia z przesunięciem parametrów MUAP w kierunku charakterystycznym dla uszkodzenia neurogennego. Ze względu na tendencję do sedentarnego trybu życia obserwuje się inwolucję czynnościową mięśni, opisywana jest także tendencja zmienności samych chorób nerwowo-mięśniowych. Relacja pomiędzy kliniczną oceną siły mięśni w skali Lovett a parametrami częstotliwości (do 90 Hz) oraz amplitudy (do 800 μV) sEMG podczas narastającego skurczu ma charakter krzywej ekwipotencjalnej.
Badanie sEMG wzorca czynności naprzemiennej mięśni prostowników i zginaczy stawów kolanowego oraz skokowego jak i ramienia i/lub nadgarstka, określa nawet subkliniczne nieprawidłowości kontroli motorycznej ośrodków rdzeniowych przez ośrodki kory ruchowej u chorych po udarach (ryc. 2 A) lub u dzieci, u których wywołanie czynności dowolnej w mięśniach kończyn dolnych może być utrudnione.
Neuromonitoring neurofizjologiczny śródoperacyjnych rejestracji ruchowych potencjałów wywołanych (ryc.2B), w ortopedii stosowany jest głownie do monitoringu przewodnictwa eferentnego i aferentnego w trakcie operacji chirurgicznych na kręgosłupie, w trakcie mikrochirurgicznych rekonstrukcji w obwodowym układzie nerwowym, rzadziej w trakcie operacji endoprotezowania.



Legenda: L-lewa, R-prawa, APB—mięsień odwodziciel kciuka, RF-mięsień prosty uda, BF-mięsień dwugłowy uda, TA-mięsień piszczelowy przedni, GS-grupa mięśni tylnej goleni, PER-nerw strzałkowy

Rycina 2. Fotografie ilustrujące założenia metodyczne: A-badania polielektromiograficznego neurofizjologii klinicznej (a-elektrody powierzchniowe rejestrujące czynność grup mięśniowych działających antagonistycznie na stawie skokowym i kolanowym prawej i lewej strony) z przykładami rejestracji wyników (b); B—neuromonitoringu neurofizjologicznego śródoperacyjnych rejestracji ruchowych potencjałów wywołanych (MEP) po stymulacji przezczaszkowej (a—parą elektrod implantowanych podskórnie do czepca) za pomocą serii impulsów elektrycznych aktywujących ośrodki kory ruchowej w zakresie unerwienia mięśni kończyn górnych i dolnych obustronnie (b—podczas korekcji chirurgicznej skoliozy systemem implantów korekcyjnych, c—z zasadami odstępu aparatury rejestrującej od pola operacyjnego, d-f—z rejestracją z mięśni i/lub nerwów elektrodami igłowymi lub powierzchniowymi).

Tabela 5.1. Aplikacja niektórych metod badań neurofizjologii klinicznej w odniesieniu do najczęściej spotykanych schorzeń diagnozowanych w ortopedii i rehabilitacji (badania przed i/lub po leczeniu operacyjnym lub zachowawczym)

Rodzaj leczonego schorzenia	Najczęściej aplikowany test diagnostyczny
Neuropatie uciskowe nerwów kończyn górnych (zespół cieśni nadgarstka, zespół kanału Guyona, zespół rowka nerwu łokciowego, zespół cieśni nerwu promieniowego, przykurcz ischemiczny Volkmanna)	nEMG ENG: M, F, SCV KKG, d, j
Neuropatie uciskowe: -zespół uwięźnięcia nerwu nadłopatkowego -zespół górnego otworu klatki piersiowej	nEMG,, sEMG, próba niedokrwienna ENG: M, F KKG, p, o
Neuropatie uciskowe nerwów kończyn dolnych (neuropatia uciskowa nerwu udowego i udowo-goleniowego, zespół cieśni stępu, metatarsalgia Mortona)	nEMG ENG: M, F, SCV KKD, d, j
Uszkodzenia urazowe lub uciskowe włókien splotu ramiennego (urazy okolicy barku, zespół ciasnoty i uszkodzenie pierścienia rotatorów) i lędźwiowo-krzyżowego (zespół mięśnia gruszkowatego)	nEMG ENG: M, F KKG, p, j KKD, p, j
Następstwa urazów kręgosłupa szyjnego, piersiowego i lędźwiowo-krzyżowego Choroby krążka międzykręgowego – konflikt krążkowo- korzeniowy w kręgosłupie szyjnym i lędźwiowo-krzyżowym (rwa kulszowa)	nEMG, sEMG ENG: M, F, H, SCV MEP, SEP IOM KKG, p, d, j KKD, p, d, j
Zespoły bólowe z przeciążenia: -szyjny zespół bólowy kręgosłupa (bólowy zespół mięśniowo-powięziowy) -lędźwiowo-krzyżowy zespół bólowy kręgosłupa	sEMG ENG: M MEP KKG, p, d, o KKD, p, d, o
Weryfikacja przewodnictwa nerwowego w zabiegach mikrochirurgicznych rekonstrukcji nerwów i replantacji kończyn	nEMG ENG: M, SCV IOM d, j
Boczne idiopatyczne skrzywienie kręgosłupa	sEMG ENG: M, F MEP IOM Mięśnie przykręgosłupowe, o KKD, p, d, o
Choroby związane z uszkodzeniem komórek rogów przednich lub włókien istoty białej rdzenia kręgowego (zanik rdzeniowy mięśni - choroba Werdinga-Hoffmanna i Kugelberga-Welandera, stwardnienie zanikowe boczne)	nEMG ENG: M, F MEP p, d, o
Polineuropatie dziedziczone (strzałkowy zanik mięśni – choroba Charcot-Marie-Tooth), alkoholowa, mocznicowa, metaboliczne	nEMG ENG: M, F, SCV d, o

Choroby mięśni i nerwów w przebiegu schorzeń reumatycznych lub towarzyszących: -reumatoidalne zapalenie stawów -zapalenie stawów z zajęciem stawów kręgosłupa -zapalenie wielomięśniowe, wtrętowe zapalenie mięśni -zapalenie skórno-mięśniowe -polineuropatie w zapaleniu dużych, małych i średnich naczyń, polineuropatie w przebiegu cukrzycy -neuroborelioza -przewlekła zapalna poliradikulopatia demielinizacyjna -polimialgia reumatyczna	nEMG ENG: M, F, SCV KKG, p, d, o KKD, p, d, o
Miopatie (postępujące dystrofie mięśniowe, zespoły miotoniczne, miopatie zapalne, miopatie metaboliczne)	nEMG KKG, KKD, p, d, o
Choroby objawiające się męczliwością mięśni (miastenia, zespół Lamberta-Eatona)	ENG: M Dekrement p, d, o
Tężyczka utajona	nEMG KKG, p, d, o KKD, p, d, o
Dziecko z przepukliną oponowo-rdzeniową, zespół zakotwiczenia rdzenia	sEMG ENG: M, F, H MEP KKG, p, d, o KKD, p, d, o
Dysfunkcje ruchowe w przebiegu leczenia mózgowego porażenia dziecięcego	sEMG KKG, p, d, o KKD, p, d, o
Zespoły dystoniczne (kręcz szyi, kurcz pisarski)	sEMG KKG, p, d, o
Następstwa uszkodzenia ośrodków ruchowych i czuciowych nadrdzeniowych w przebiegu udarów: -krwotocznych (rzadziej) -niedokrwiennych (w tym mikroudarów, częściej)	sEMG ENG: M, F MEP, SEP KKG, p, d, o KKD, p, d, o

Legenda: KKG – kończyny górne, KKD – kończyny dolne, p - część proksymalna kończyny, d - część dystalna kończyny, j - badanie jednostronne po stronie objawowej, o - badanie obustronne, M - rejestracja fali M w badaniu ENG, F - rejestracja fali F w badaniu ENG, H - badanie odruchu H w testach ENG, MEP - ruchowe potencjały wywołane, nEMG - elektromiografia igłowa, SCV - badanie przewodnictwa włókien czuciowych obwodowo w testach ENG, sEMG - elektromiografia powierzchniowa, SEP - somatosensoryczne potencjały wywołane, IOM – neuromonitoring śródoperacyjny

Wykaz skrótów

CMAP — (ang. *compound muscle action potential*) złożony potencjał czynnościowy rejestrowany z mięśnia po stymulacji elektrycznej włókien ruchowych nerwu, synonim fali M

CNAP — (ang. *compound nerve action potential*) złożony potencjał czynnościowy rejestrowany znad nerwu na jego przebiegu po stymulacji elektrycznej włókien tego samego nerwu

dekrement — (ang. *decrement*) test wysokoczęstotliwościowej stymulacji elektrycznej włókien ruchowych nerwu w diagnostyce zmian przekaźnictwa neurotransmitera na poziomie synapsy nerwowo-mięśniowej

EMG — (ang. *electromyography*) elektromiografia, badanie czynności jednostek ruchowych wybranego mięśnia lub grup mięśniowych w trakcie skurczu dowolnego, maksymalnego skurczu trwającego 5 sekund lub podczas całkowitej relaksacji

ENG — (ang. *electroneurography*) elektroneurografia, badanie stymulacyjne bodźcami elektrycznymi przewodnictwa impulsów ruchowych i czuciowych nerwów

fala F — rejestracja potencjału z mięśnia wywołana stymulacją elektryczną nerwu, przewodzona antydromowo, a następnie zwrotnie na drodze ortodromowej od ciała motoneuronu do efektora

filamenty von Freya — metoda FvF — metoda dotykowego badania percepcji czucia powierzchniowego za pomocą skalibrowanych w średnicy, giętkich filamentów, umożliwiająca
diagnostykę przeczulicy lub niedoczulicy

IC-SD — (ang. *intensity of current vs. stimulus duration*) metoda badania krzywych pobudliwości czuciowej, polegająca na naskórnej

stymulacji elektrycznej receptora u badanej osoby
i określeniu wzajemnej relacji pomiędzy reobazą i chronaksją prostokątnego impulsu stymulującego, użyteczna w diagnostyce przeczulicy lub niedoczulicy

IOM — (ang. *intraoperative neuromonitoring*) metoda rejestracji przewodnictwa ruchowego i czuciowego, w tym w obrębie szlaków rdzeniowych z rejestracją kolejno z mięśni kończyn górnych i dolnych w następstwie elektrycznej stymulacji przezczaszkowej ośrodków kory mózgu, oraz przezczaszkowo z obszaru unerwienia czuciowego kory mózgu w następstwie stymulacji elektrycznej włókien czuciowych nerwów kończyn górnych i dolnych

MEP — (ang. *motor evoked potentials*) ruchowe potencjały wywołane indukowane polem magnetycznym w diagnostyce przewodnictwa eferentnego na poziomie nadrdzeniowym, rdzeniowym i/lub obwodowo

MU — (ang. *motor unit*) jednostka ruchowa

MUAP — (ang. *motor unit action potential*) potencjał czynnościowy jednostki ruchowej

nEMG — (ang. *needle electromyography, elementary electromyography*) badanie czynności pojedynczych jednostek ruchowych mięśnia za pomocą elektrody igłowej

odruch H — (ang. *H-reflex*) badanie odruchu H, synonim fali H — badanie monosynaptycznego połączenia pomiędzy włóknem czuciowym, reakcją neuronu ruchowego na pobudzenie
i rejestracją czynności efektora w następstwie stymulacji bodźcami elektrycznymi gałęzi nerwowej na obwodzie

odruch mrugania — (ang. *blink reflex*) metoda badania obustronnego skurczu mięśni okrężnych oczu po stymulacji elektrycznej w okolicy nad-
oczodołowej jednostronnie, diagnozująca przewodnictwo nerwów trójdzielnego i twarzowego oraz czynność ośrodków polineuronalnych pnia mózgu obustronnie

próba niedokrwienna — (ang. *ischemic test*) metoda badania sEMG w warunkach próby skurczu maksymalnego, przed i po 2 minutach testu uniesionych na głową kończyn górnych, w ramach diagnostyki zespołu górnego otworu klatki piersiowej

SCV — (ang. *sensory conduction velocity*) metoda badania przewodnictwa włókien czuciowych w układzie nerwowym obwodowym po stymulacji bodźcami elektrycznymi

sEMG — (ang. *surface electromyography*) elektromiografia powierzchniowa, badanie sumarycznej czynności jednostek ruchowych mięśnia lub grup mięśniowych za pomocą elektrod powierzchniowych

SEP — (ang. *somatosensory evoked potentials*) somatosensoryczne potencjały wywołane, metoda badania przewodnictwa aferentnego na różnych jego poziomach po pobudzeniu bodźcami elektrycznymi obwodowo

SNAP — (ang. *sensory nerve action potential*) czuciowy potencjał czynnościowy rejestrowany z nerwu, synonim czuciowego potencjału wywołanego rejestrowanego w badaniu SCV

Piśmiennictwo.

Zalecana literatura rozszerzająca

1. Lisiński P., Huber J., *Evolution of muscles dysfunction from myofascial pain syndrome through cervical disc-root conflict to degenerative spine disease*, Spine, 2017, 42(3), 151-159.
2. Wiertel-Krawczuk A., Huber J., *Standard neurophysiological studies and motor evoked potentials in evaluation of traumatic brachial plexus injuries - A brief review of the literature*, Neurol. Neurochir. Pol., 2018, 52(5), 549-554.
3. Huber J., Lisiński P., *Early results of supervised versus unsupervised rehabilitation of patients with cervical pain*, Int. J. Artif. Organs, 2019, 42(12), 695-703.
4. Huber J., *Badania neurofizjologiczne* [w:] *Interna Szczeklika*, Medycyna Praktyczna, Kraków 2020.
5. Garasz A. i wsp., *Weryfikacja nieinwazyjności i precyzyjności rejestracji powierzchniowych vs. igłowych ruchowych potencjałów wywołanych podczas neuromonitoringu u pacjentek w trakcie chirurgicznej korekcji młodzieńczej skoliozy idiopatycznej*, Prakt. Ortop. Rehabil., 2021, 2, 26-30.
6. Huber J. i wsp., *The role of peripheral nerve electrotherapy in functional recovery of muscle motor units in patients after incomplete spinal cord injury*, Appl. Sci., 2021, 11(20), 9764.
7. Wincek A. i wsp., *The long-term effect of treatment using the transcranial magnetic stimulation rTMS in patients after incomplete cervical or thoracic spinal cord injury*, J. Clin. Med., 2021, 10 (13), 2975.
8. Huber J. i wsp., *Post-stroke treatment with neuromuscular functional electrostimulation of antagonistic muscles and kinesiotherapy evaluated with electromyography and clinical studies in a two-month follow-up*, Int. J. Environ. Res. Public Health, 2022, 19(2), 964.