

Magnetofosfeny – historia i współczesne implikacje

Streszczenie. W artykule przedstawiono historię badań zjawiska magnetofosfenów, tj. występowania wraz z świetlnych w oku generowanych przez pole elektromagnetyczną z dominującą składową magnetyczną. Przedstawiono też współczesne implikacje tego zjawiska, zarówno w sensie praktycznym (tworzenie norm), jak i teoretycznym (nowa koncepcja pioruna kulistego)

Abstract. In the paper the history of magnetophosphenes, i.e. the sensation in the eyes generated by electromagnetic field with the magnetizing field component dominating are presented. The contemporary implications either in the practical sense (the standardization procedure) and the theoretical sense (new concept of the ball lightning are shown). (**Magnetophosphenes – history and contemporary implications**)

Słowa kluczowe: pole magnetyczne, magnetofosfeny, tworzenie norm, piorun kulisty

Keywords: magnetic field, magnetophosphenes, normalization, ball lightning

Wstęp

Wykorzystanie pola elektromagnetycznego w medycynie sięga czasów starożytnych. Już 600 lat p.n.e. Grecy, a później Chińczycy wykorzystywali magnetyczne właściwości niektórych minerałów, a Hipokrates próbował podobno leczyć ludzi magnezami. Jednak prawdziwe i efektywne eksperymenty dotyczące stymulacji magnetycznej ludzkich tkanek i nerwów rozpoczęły się dopiero w I połowie XIX w. po odkryciu przez Michaela Faradaya w 1831 zjawiska indukcji elektromagnetycznej. Możliwość indukowania w organizmie ludzkim prądu elektrycznego bez potrzeby przykładania elektrod i wytracania energii w warstwach przejściowych stwarzała zupełnie nowe możliwości w stymulacji różnych organów w ciele człowieka. Dotyczy to przede wszystkim niższych częstotliwości (Extremally Low Frequency - ELF). Przy takim ograniczeniu częstotliwości mamy do czynienia wyłącznie ze stymulacją komórek, a nie z podgrzewaniem tkanek, co występuje przy wysokich częstotliwościach. Organizm ludzki może być stymulowany w sposób świadomy w celach terapeutycznych i diagnostycznych, stymulacja może też mieć charakter niepożądany, kiedy efektem oddziaływania pola elektromagnetycznego są pewne dysfunkcje organizmu. Jedną z takich dysfunkcji mogą być magnetofosfeny.

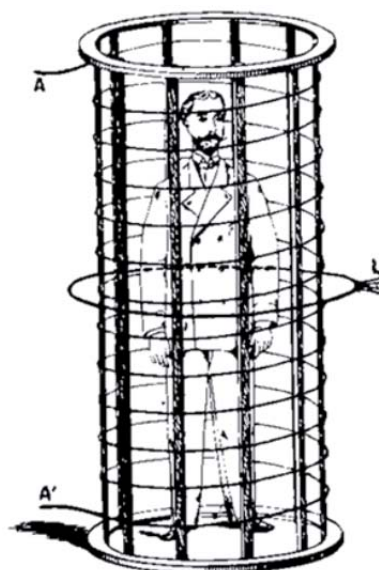
Historia odkrycia magnetofosfenów

Zjawisko magnetofosfenów (gr. *magnet* – przyciągać; *phos* – światło; *phainein* – pokazywać) zostało odkryte na przełomie XIX i XX wieku przez dwóch uczonych: francuskiego lekarza i fizjologa Jean Jacques d'Arsonvala i brytyjskiego inżyniera Silvanus P. Thompsona. Sylwetki obu uczonych i ich wkład w medycynę wykorzystującą zjawiska elektromagnetyczne zostały przedstawione w [1,2].

D'Arsonval przedstawił swoje odkrycie w artykule opublikowanym w 1896 roku [3]. Jego doświadczenie oparte zostało o cewkę, zasilaną napięciem 110 V, przez którą przepuszczany był prąd o częstotliwości 42 Hz i natężeniu 30 A. Późniejsze wyliczenia pozwalają oszacować, iż indukcja pola magnetycznego w cewce d'Arsonvala mogła wynosić ponad 7 mT (rys. 1).

Cewka zbudowana była z cienkościennych mosiężnych przewodów rurowych. Budowa cewki i strona techniczna doświadczenia opisane są w sposób dość oszczędny – prawdopodobnie d'Arsonval jako lekarz niespecjalnie zainteresowany był aspektami technicznymi eksperymentu. Wyniki swoich obserwacji opisał następująco: ...Gdy ktoś umieszcza głowę w cewce, występują fosfeny i zawroty

głowy a w pewnych przypadkach omdlenie... Zmienne pole magnetyczne powoduje zmiany w sposobie kurczenia się mięśni i powoduje u istot żywych, inne efekty, które są łatwe do pokazania i nad którymi obecnie pracuję". D'Arsonval uważał, że efekt fosfenowy spowodowany jest stymulacją siatkówki lub kory wzrokowej lub obu tych elementów. Wspomniane w jego artykule przeciwdziałanie mięśniowe wskazuje też na stymulację mięśni głowy lub kory ruchowej lub obu tych części ciała.



Rys. 1 Cewka d'Arsonvala

Silvanus P. Thompson, nieświadomy odkrycia dokonanego przez francuskiego lekarza, przeprowadził podobne doświadczenie, zaprezentowane w artykule opublikowanym w 1910 roku [4]. S.P. Thompson, będąc inżynierem, przedstawił wiele więcej szczegółów technicznych swojego doświadczenia. Jego cewka składała się z 32 zwojów, nawiniętych drutem miedzianym o przekroju 130 mm². Zewnętrzna i wewnętrzna średnica cewki wynosiły odpowiednio 23 cm i 20 cm. Cewka zasilana była prądem o natężeniu 500 A z częstotliwością 50 Hz. Indukcja magnetyczna w osi cewki wynosiła 100 mT (rys.2).

Badaną osobę z zamkniętymi oczami umieszczano w ciemnym pokoju i na głowę nakładano jej wyżej opisaną cewkę. Jak opisuje pomysłodawca doświadczenia, badany

osobnik zauważał: ...*słabo widoczne migotanie, daltonizm lub widzenie o lekko niebieskawym zabarwieniu, jaśniejsze w polu peryferyjnym*. W jednym z artykułów powstałych po doświadczeniu Thompsona sugerowano, że efekty wizualne u badanych osobników wynikały z głośnego szumu emitowanego przez zasilający cewkę transformator [5].



Rys. 2 Silvanus P. Thompson w trakcie eksperymentu

W celu confirmacji bądź falsyfikacji tej hipotezy, jej autor Knight Dunlap postanowił powtórzyć badania swego poprzednika. Jego pierwsza cewka miała 27 zwojów, a każdy zwoj składał się ze splecionych 37 miedzianych nitów o sumarycznej powierzchni przekroju 126 mm^2). Przekrój poprzeczny cewki miał kształt elipsy o promieniach 23 i 27 cm. W doświadczeniu podstawowym do stymulacji Dunlap stosował prąd 200 A (ok. 5400 amperozwojów) i częstotliwości 60 Hz; wykorzystywał także kombinacje – 440 A i 60 Hz oraz 480 A i 25 Hz [5]. Pomimo tego, że cewka Dunlapa generowała pole magnetyczne słabsze od pola magnetycznego cewki Thompsona, zarówno Dunlap, jak i jego współpracownicy, doświadczili wrażeń wzrokowych w trakcie stymulacji. Eksperyment pokazał wyraźnie, iż wrażenia wzrokowe, fosfeny, powstają pod wpływem stymulacji magnetycznej. W dalszych badaniach Dunlap wykazał, iż intensywność wrażeń wzrokowych zależała od natężenia pola magnetycznego oraz częstotliwości stymulacji.

W tym samym czasie Magnussen i Stevens [6] przeprowadzili badania z dużą cewką umieszczoną nad głową osoby badanej (rys.3). Wykonano eksperyment z ekspozycją głowy na pole magnetostatyczne, w którym, jak można było oczekiwać, nie zarejestrowano żadnych wrażeń wizualnych. Inny eksperyment, polegający na włączaniu i wyłączaniu cewki zasilanej prądem stałym, dał oczekiwane wyniki: w stanach przejściowych pojawiały się fosfeny, trochę różniące się od tych, powstających przy ekspozycji na pole magnetyczne o częstotliwości różnej od zera. Ci sami badacze przebadali również zasilanie cewek prądem zmiennym. Przez cewkę przepuszczany był prąd od 180 do 480 A i o częstotliwości 20-90 Hz. Przeprowadzili oni szereg eksperymentów, mających wykazać wpływ częstotliwości i natężenia pola magnetycznego na intensywność doznań wizualnych. Badania doprowadziły ich do następujących konkluzji: optymalną częstotliwością dla generowania magnetofosfenów jest zakres 20-30 Hz, a w okolicy 90 Hz zjawisko fosfenów słabnie, nawet przy podnoszeniu indukcji magnetycznej.

Badania magnetofosfenów wstrzymano na kilka dziesięcioleci i odrodziły się w latach siedemdziesiątych XX wieku przy okazji wprowadzania technik elektromagnetycznych w medycynie.



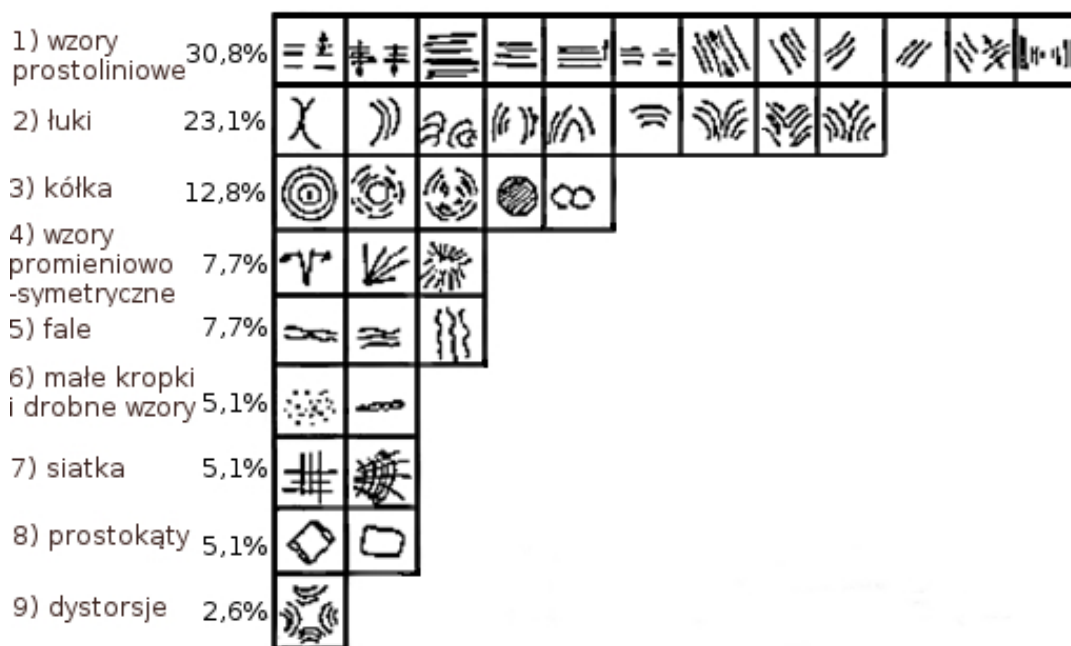
Rys. 3 Eksperyment Magnussena i Stevensa

Współczesne badania magnetofosfenów

Do badań nad stymulacją magnetyczną powrócono po około 3 dekadach. Walsh [7] oraz Barlow, Kohn i Walsh [8] podjęli ponownie temat wywoływania efektów wzrokowych za pomocą pola magnetycznego. Wykorzystywali przy tym pole elektromagnetyczne ze składową magnetyczną równą ok. 90 mT Walsh posiłkował się cewką z rdzeniem stalowym i umieszczał ją w pobliżu gałki ocznej. Cewka była zasilana zmiennym prądem o częstotliwości 5-90 Hz. Intensywność fosfenów była związana bardziej z częstotliwością stymulacji niż samym natężeniem pola. Barlow i in. stosowali cewkę stymulacyjną (średnica wewnętrzna 10,5 cm, średnica zewnętrzna 20,3 cm, długość 7,3 cm) z rdzeniem stalowym, zasilaną prądem o częstotliwości 10-40 Hz. Cewka była umieszczana w okolicy skroniowej, a wraz ze zwiększającym się natężeniem prądu zasilającego, fosfeny pojawiały się w coraz większym obszarze pola widzenia. W obu badaniach wrażenia wzrokowe zwiększały się w trakcie dowolnego poruszania gałkami ocznymi.

Dokładną budowę stosowanego przez siebie do badań nad magnetofosfenami stymulatora magnetycznego – zaprezentował w 1968 r. Seidel et al. [9,10]. Przybliżone wyliczenia zdają się sugerować, iż stymulator ten pozwalał na osiągnięcie pola magnetycznego rzędu 1 T. Badania prowadzone przez Seidela na trzydziestu ochotnikach dały pojęcie o rzeczywistych wrażeniach wzrokowych, odbieranych przez podmioty badawcze. Raportowane przez badanych obrazy wzrokowe pokazane są na rys. 4.

Godne odnotowania są również badania wykonywane przez grupę badawczą Lövsunda [11]. Badacze ci skonstruowali specjalny elektromagnes. Uzwojenie składało się z 115 zwojów drutu miedzianego nawiniętych na rdzeń o kształcie litery U. Elektromagnes zasilany był prądem sinusoidalnym o częstotliwości do 50 Hz. Szczelina rdzenia odpowiadała szerokością gałce ocznej i udawało się uzyskać w niej indukcję pola magnetycznego do 40 mT. Cytowana praca i inne prace wykonane przez Lövsunda i współpracowników były przez ponad dwadzieścia lat uznane za fundamentalne w dziedzinie badań magnetofosfenów. W wyniku tych prac ugruntowała się wiedza co do parametrów pola elektromagnetycznego, indukującego maksymalny efekt fosfenowy, jak też co do natury zjawiska – zdecydowanie wskazano na stymulujące siatkówkę oka prądy wirowe, jako przyczynę fosfenów.



Rys. 4 Wrażenia wzrokowe podane przez badanych – z lewej strony podany jest udział procentowy poszczególnych obrazków [10]

Uznanie prac Lövsunda za fundamentalne nie zahamowało innych badań, które były w różnych miejscach prowadzone. W wielu pracach wskazywano na różne źródła środowiskowe, mogące indukować magnetofosfeny. Badania wykazały, iż magnetofosfeny mogą ujawnić się w trakcie badania MRI. W tym wypadku wrażenia te powstają w trakcie stosunkowo szybkiego poruszania głową lub gałkami ocznymi. Wrażenia wzrokowe typu fosfenów powstawać mogą również pod wpływem pola elektromagnetycznego generowanego przez energetyczne linie przesyłowe. Późniejsze badania wykazały, iż również przezczaszkowa stymulacja magnetyczna TMS jest w stanie wywołać efekty wzrokowe o typie fosfenów (por. [12]).

Dyskusja dotycząca współczesnych badań

Wyjaśnienie efektu magnetofosfowego jest przedmiotem badań lekarzy, fizyków i badaczy bioelektromagnetyzmu. Istnieją różne hipotezy w większości prowadzące do uznania prądów wirowych, indukowanych w elementach siatkówce, za przyczynę zjawiska. Takie wyjaśnienie, dzięki swojej ogólności i oczywistości, niczego nie wnosi do wyjaśnienia rzeczywistej natury zjawiska, tzn. nie wskazuje na to, jakie komórki siatkówki i dlaczego są pobudzane przez pole elektromagnetyczne do efektów świetlnych. Powstają ostatnio duże projekty badawcze, w trakcie realizacji których naukowcy dążą do uzyskania odpowiedzi na zadane pytanie. Do realizacji tych celów przewiduje się badania w znacznie większym zakresie częstotliwości (do 300 Hz) oraz znacznie silniejszym polu magnetycznym (do 80 mT) [13].

Badania zjawiska magnetofosfowego jest szczególnie ważne od momentu, kiedy ICNIRP wprowadził to zjawisko jako podstawę do określania limitów dla pola magnetycznego niskiej częstotliwości. Jak podają autorzy raportu ICNIRP [14] "... graniczny poziom natężenia pola elektrycznego indukowanego w siatkówce został oszacowany pomiędzy 50 a 100 mV/m przy 20 Hz, rosnąc przy niższych i wyższych częstotliwościach, aczkolwiek istnieje istotna niepewność co do tych wartości..." [14].

Dalej z raportu ICNIRPu wynika, że: "...uniknięcie zjawiska fosfenów na siatkówce powinno stanowić ochronę przed możliwymi efektami na funkcje mózgu. Progi fosfenowe są minimalne przy 20 Hz i szybko rosną przy wyższych i niższych częstotliwościach, przecinając się z ograniczeniami dla stymulacji peryferyjnego i centralnego systemu nerwowego, gdzie powinny zostać wprowadzone ograniczenia dla stymulacji peryferyjnego układu nerwowego. Dla pracowników, którzy nie są przygotowani i być może nieświadomi a przebywają w niekontrolowanej ekspozycji, ograniczenia podstawowe (basic restrictions) powinny być takie jak ograniczenia dla magnetofosfenów... a dla populacji generalnej powinien być zastosowany współczynnik redukcji 5."

Przyjęte przez ICNIRP wartości zostały zweryfikowane w procesie symulacji komputerowej [15]. Obliczenia prowadzone przy użyciu metody elementów skończonych potwierdziły w dużej mierze analizę przeprowadzoną w raporcie ICNIRPu na podstawie subiektywnych badań.

Również następny dokument ICNIRP [16,17], dotyczący ograniczeń pola elektrycznego i magnetycznego o częstotliwości poniżej 1Hz włącza zjawisko magnetofosfenów jako element oceny. W tym przypadku zjawisko magnetofosfenów wywoływane jest prądem wirowym generowanych z ruchu obiektu w silnym polu magnetycznym, np. w urządzeniach do magnetycznego obrazowania rezonansowego - MRI.

Ciekawym wykorzystaniem zjawiska magnetofosfenów jest włączenie go w próbę wytłumaczenia fenomenu pioruna kulistego [18]. Okazuje się, że parametry pioruna liniowego są zbliżone do tych jakie potrzebne są do uzyskania efektu magnetofosfenów. Natężenie pola magnetycznego powstającego wokół pioruna prowadzącego prąd 50 kA w odległości 10 metrów od wyładowania wynosi 1600 A/m (2 mT). Jest to wielkość dużo niższa o tej, która jest stosowana w zastosowaniach medycznych, ale jest to wartość, która jest zgodna z wielkościami podawanymi dla uzyskania efektu magnetofosfowego. Typowe wyładowanie piorunowe trwa kilkadziesiąt mikrosekund i odbywa się co 50 ms. Parametry te porównywalne są z częstotliwością stosowaną w stymulacji magnetycznej mózgu (1-100 Hz). Liczba

wyładowań następczych może przekraczać 20, a zatem całkowity czas wielokrotnego wyładowania wynosi 1-2 sekundy. Jest to czas porównywalny z czasem ekspozycji w przypadku przeczaszkowej stymulacji mózgu.

Na podstawie takiej spekulacji intelektualnej autorzy [7] stawiają śmiałą hipotezę, że piorun kulisty może być spostrzegany przez jego świadków wskutek oddziaływań magnetofosfenowych. Piszą oni: "...wnioskujemy, że duży zbiór obserwacji piorunów kulistych może być zinterpretowany jako efekt magnetofosfenowy stymulowany przeczaszkowo przez ciąg liniowych wyładowań atmosferycznych". Obrazy pioruna kulistego raportowane przez świadków są bardzo różne: kula, owale, półkule, pałeczki, elipsoidy, itp. Jeśli wrócić do badań Seidela (rys.4) to wrażenia wizualne osób, mających objawy magnetofosfenowe, są całkiem podobne. Warto wziąć pod uwagę ten fakt przy analizie przedstawionej wyżej hipotezy. A przyjęcie tej hipotezy przeniosłoby piorun kulisty ze sfery realnego bytu w obszar powidoków (!).

W wyjaśnianiu zjawiska magnetofosfenów można odejść od paradygmatu prądów wirowych i popatrzeć na to zjawisko magnetofosfenów w kontekście błysków światła w oku (fotopsje), pojawiających się na skutek pewnych zaburzeń w obszarze gałki ocznej.

Wnioski

Zjawisko magnetofosfenów, przez wiele lat uważane za ciekawostkę, zaczyna odgrywać w ostatnich latach dużą rolę stanowiąc ważny element w procesie standaryzacji i tworzenia ograniczeń dla pola elektromagnetycznego. Zjawisko magnetofosfenów może być również ciekawym elementem badawczym, jako że wciąż nieznaną są przyczyny generujące efekty wizualne. Oczywiście jest, że badania przyczyn efektu magnetofosfenowego należy prowadzić w ścisłej współpracy ze środowiskiem medycznym, a przede wszystkim ze specjalistami okulistami

Autorzy: prof. dr hab. inż. Andrzej Krawczyk, Politechnika Częstochowska ul. Armii Krajowej 17 42-200 Częstochowa, e-mail: ankra.new@gmail.com;

dr inż. Ewa Korzeniewska, Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, e-mail: ewa.korzeniewska@p.lodz.pl;

dr inż. Ewa Łada-Tondyra, Politechnika Częstochowska ul. Armii Krajowej 17 42-200 Częstochowa, e-mail: e.lada-tondyra@el.pcz.czyst.pl

LITERATURA

- [1] Geddes L.A., The history of magnetophosphenes, IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, No. 4/2008, pp. 101-102,
- [2] Krawczyk A., Łada-Tondyra E., Pole elektromagnetyczne w medycynie – historia pierwszych eksperymentów, Bezpieczeństwo Pracy. No. 1/2011, ss. 24-26
- [3] d'Arsonval A., Dispositifs pour la mesure des courants alternatifs de toutes frequences, Compt. Rendus Soc. Biol, 1986, pp. 450-451
- [4] Thompson S.P., A physiological effect of an alternating magnetic field, Proc. Roy. Soc. Londyn, vol. B82, 1910, pp. 369-399
- [5] Dunlop K., Visual sensations from the alternating magnetic field, Science, vol.33, 1911, pp. 68-71
- [6] Magnusson C.E., Stevens H.C., Visual sensations caused by the changes in the strength of a magnetic field, Am. J. Physiol., vol. 29, 1911, pp. 124-136
- [7] Walsh P., Magnetic stimulation of the human retina, Federation Proceedings, vol.5, 1948, 109-110
- [8] Barlow H.B., Kohn H.J., Wals P., Visual sensations aroused by magnetic field, Am. J. Physiol., vol. 148, 1947, 372-375
- [9] Seidel D.: Der Existenzbereich elektrisch und magnetisch-induktiv angeregter subjectiver Lichterscheinungen (Phosphene) in Abhängigkeit von äußeren Reizparametern (Schluß). Elektromedizin, 1968b, 13 (5), 208-211.
- [10] Seidel D., Knoll M, Eichmeier J. Anregung von subjektiven Lichterscheinungen (Phosphenen) bei Menschen durch magnetische Sinusfelder. Pflügers Archiv 1968 , 299, 11-18.
- [11] Lövsund P., Öberg P.A., Nilsson S.E.G., Reuter T., Magnetophosphenes – a quantitative analysis of thresholds.. Med. & Biol. Eng. 1980, 18, 325-334.
- [12] Zyss T, Technika przeczaszkowej stymulacji magnetycznej: zagadnienia aparaturowe, Seria Wydawnicza BIBLIOTEKA ELMIKO, Kraków 2009
- [13] Shirin Davarpanah Jazi et al., Magnetophosphene perception threshold increases as a function of time spent in the dark in humans exposed to extremely low frequency magnetic fields, Book of Abstracts of the Joint Annual Meeting of the Bioelectromagnetic Society and the European BioElectromagnetic Association, BioEM 2017, 5-9 June, 2017, Hangzhou, China
- [14] Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz), Health Physics, vol.99, 2010, 818-836,
- [15] Laakso I., Hirata A. Computational analysis of thresholds for magnetophosphenes. Physics in Medicine & Biology, vol. 57, 2012, No. 19
- [16] Guidelines for Limiting Exposure to Electric Fields Induced by Movement of the Human Body in a Static Magnetic Field and by Time-Varying Magnetic Fields Below 1 Hz, Health Physics, vol. 106, 2014, 418-425
- [17] Krawczyk A., Łada-Tondyra E., The Evolution of Electromagnetic Field Standards– case study of ICNIRP's Standards, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), No. 12b/2011, pp. 89-91
- [18] Peer J., Kendl A., Transcranial stimulability of phosphenes by long lightning electromagnetic pulses, Physics Letters A, vol. 374, 2010, 4797-99