

Marek Zmysłony

EFEKTY BIOLOGICZNE I RYZYKO ZDROWOTNE SIECIOWYCH PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH (Z WYŁĄCZENIEM NOWOTWORÓW)*

BIOLOGICAL EFFECTS AND HEALTH RISK OF POWER FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS
(NEOPLASMS EXCLUDED)

Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera, Łódź

Zakład Zagrożeń Fizycznych, Pracownia Zagrożeń Elektromagnetycznych

Uniwersytet Medyczny, Łódź

Wydział Nauk o Zdrowiu, Oddział Zdrowia Rodzinnego

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono przegląd literatury dotyczącej mechanizmów działania i efektów biologicznych — w szczególności zdrowotnych (z wyłączeniem efektów nowotworowych) — działania słabych, występujących w środowisku pól elektromagnetycznych (PEM) o częstotliwości sieciowej, tj. 50/60 Hz. Na tej podstawie stwierdzono, że daleko nam jeszcze do zrozumienia biofizycznych podstaw ewentualnego ich działania na człowieka. Mechanizmy dobrze znane mają znaczenie dla PEM sieciowych o wartościach znacznie przekraczających te, które występują w środowisku komunalnym, a nawet w środowisku pracy. Z kolei w chwili obecnej nie ma wystarczających dowodów eksperymentalnych na uznanie za dowiedzione istotnego biologicznego znaczenia mechanizmów hipotetycznych zachodzących dla PEM dużo słabszych. Nawet jeżeli ich zachodzenie potwierdzi się, to wciąż otwarte pozostaje pytanie, czy efekty biologiczne będące skutkiem działania sieciowych PEM spowodują negatywne skutki zdrowotne. Badania epidemiologiczne dotychczas skupiają się przede wszystkim na działaniu kancerogennym sieciowych PEM, dużo mniej dotyczy ich wpływu na ryzyko zachorowania na choroby neurodegeneratywne, na funkcjonowanie układu krążenia i funkcje rozrodcze człowieka. Jak dotychczas żaden z powyższych efektów zdrowotnych nie został wystarczająco potwierdzony. Przyczyną są zapewne niedostatki metodologiczne badań, a przede wszystkim błędy przy diagnozowaniu, wątpliwości przy ocenie ekspozycji czy etiologii choroby (wpływ innych czynników środowiskowych na badane skutki zdrowotne). Z tego powodu potrzebne są dalsze intensywne prace eliminujące te mankamenty. Med. Pr. 2008;59(5):421–428

Słowa kluczowe: sieciowe pola elektromagnetyczne, mechanizmy działania, efekty zdrowotne

ABSTRACT

The literature review concerning the mechanisms of biological effects in general and health effects in particular (excluding neoplasms), the effects occurring in the environment of weak electromagnetic fields (EMF) with power frequency of 50/60 Hz is presented. Based on this review, it can be stated that we are still far from understanding of the biophysic background of potential effects of EMF on human subjects. The well known mechanisms of interaction play an important role for power frequency electromagnetic fields with values considerably exceeding those occurring in the municipal environment and even those observed in the work environment. On the other hand, there is no sufficient experimental evidence that hypothetical interaction mechanisms of much weaker EMFs can be regarded as those with proven biological significance. Even if their occurrence is proven, an open question still remains whether biological effects resulting from the activity of power frequency electromagnetic fields generate adverse health effects. Epidemiological studies, carried out to date, mainly focus on carcinogenic effect of EMF, and pay less attention to possible risk of neurodegenerative diseases or cardiovascular and reproduction disorders. So far none of the above mentioned health effects has been adequately evidenced. It is most likely that some inadequacy in research methodology, and first of all diagnostic errors, uncertainties in exposure assessments or etiology of a given disease (the influence of other environmental factors on the studied health effects) are the major reasons for the present state of affairs. Therefore, further intensive studies are needed to eliminate the existing drawbacks. Med Pr 2008;59(5):421–428

Key words: power frequency electromagnetic fields, mechanisms of interaction, health effects

Adres autora: Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera, Zakład Zagrożeń Fizycznych, Pracownia Zagrożeń Elektromagnetycznych, św. Teresy 8, 91-348 Łódź, e-mail: zmyslmar@imp.lodz.pl

Nadesłano: 15 września 2008

Zatwierdzono: 1 października 2008

* Praca wykonana w ramach zadania finansowanego z dotacji na działalność naukową nr IMP 18.1 pt. „Skojarzone działanie pól elektromagnetycznych i hałasu na procesy oksydacyjne zachodzące w narządzie słuchu”. Kierownik: dr hab. Marek Zmysłony. Została również wygłoszona na XXII Szkole Jesiennej Polskiego Towarzystwa Badań Radiacyjnych im. M. Skłodowskiej-Curie pt. „Pola elektromagnetyczne (PEM) w środowisku — aspekty zdrowotne, ekologiczne i pomiarowe”, która odbyła się w dniach 20–24 października br. w Zakopanem.

MECHANIZMY DZIAŁANIA PEM I ICH EFEKTY BIOLOGICZNE

Przed omówieniem zagadnień związanych z efektami biologicznymi i ryzykiem zdrowotnym PEM sieciowych należy nieco uwagi poświęcić mechanizmom biofizycznym, które mogłyby do nich prowadzić. Z analizy zależności między składowymi PEM sieciowych wynika, że są one w zasadzie niezależne od siebie i ich mechanizmy działania powinny być rozpatrywane osobno. O ile w początkowym okresie badań bioelektromagnetycznych szczególną uwagę zwracano na składową elektryczną, o tyle obecnie większość badaczy uważa, że nie stanowi ona specjalnego zagrożenia dla zdrowia osób ekspozowanych (zwłaszcza ekspozowanych na pola o takich wartościach, jakie występują w środowisku komunalnym). Wynika to z tego, że siły elektryczne działające na cząsteczki biologiczne są znikomo małe ze względu na bardzo duże tłumienie pola elektrycznego przez ciało człowieka, np. pole zewnętrzne o częstotliwości 60 Hz jest tłumione około 10^6 razy (1). Szacuje się, że ekspozycja na zewnętrzne pole elektryczne o częstotliwości 60 Hz i natężeniu 1 kV/m powoduje powstanie w organach wewnętrznych pola o wartości 1–3 mV/m (2). Wewnątrz błon pole jest większe (ze względu na własności dielektryczne błon komórkowych, między ich powierzchnią zewnętrzną a wewnętrzną występuje znaczna różnica potencjału), np. pole elektryczne o natężeniu 1 mV/m działające na komórkę o średnicy 20 μm powoduje powstanie wewnątrz jej błony o grubości 6 nm pola o natężeniu około 2,5 V/m (3). Również rozważania dotyczące możliwości wywoływania przez wolnozmiennne pola elektryczne szkodliwych efektów zdrowotnych poprzez indukowane w tkankach dodatkowego potencjału na błonach komórkowych doprowadziły do wniosku, że w praktyce pola te nie mogą zagrażać zdrowiu człowieka. Analiza danych doświadczalnych na temat wartości progowych pola, powodujących stymulację komórek pobudliwych dokonana przez Bernhardta (4) wykazała, że dla pól o częstotliwości 60 Hz są one wyższe od około 10^3 kV/m, a więc wartości niespotykanych w praktyce higienicznej.

Według obecnego stanu wiedzy, składowa magnetyczna może działać na obiekty biologiczne poprzez siłę Lorentza oraz poprzez działanie pól na stany spinowe elektronów. Dotychczas uważano, że zjawiska związane z działaniem siły Lorentza na cząsteczki biologiczne mogą mieć znaczenie dopiero dla pól o wartościach kilku–kilkunastu tesli. Ostatnio jednak pojawiła się hipoteza, sformułowana przez Blanka i Goodman (5), o wpływie pól magnetycznych na transfer elektronów

w łańcuchach DNA (6,7), co zaburza transkrypcję. Znacznie mniejsze wartości indukcji (od kilkudziesięciu mikrotlesli) wymagane są do spowodowania wpływu pola magnetycznego na stany spinowe elektronów. Przypuszcza się, że zjawisko to może wpływać na reakcje biochemiczne przebiegające tworzeniem par rodników jako produktów przejściowych.

Kiedy na skutek rozerwania wiązania chemicznego powstaje para rodników*, reakcja może przebiegać dwoma torami: (1) rekombinacji rodników lub (2) rozdzielania pary. W tym drugim przypadku powstają wolne rodniki mogące oddziaływać z molekułami ośrodka, w którym dyfundują. Wybór jednej z tych dróg zależy od wzajemnej orientacji niesparowanych spinów rodników. Zewnętrzne pole magnetyczne może tę wzajemną orientację zmieniać. Do procesów biochemicznych zachodzących z udziałem par rodników należą m.in. procesy oksydacyjne, takie jak peroksydacja lipidów i białek czy oksydacyjne uszkodzanie DNA (a także ich procesy naprawcze).

Jak dotychczas wykazano wpływ pól magnetycznych o stosunkowo niskich indukcjach (od kilkudziesięciu mikrotlesli) na proces peroksydacji lipidów w sztucznych błonach fosfolipidowych czy naturalnych błonach mikrosomalnych (8–10). Szczególne zainteresowanie budzą badania genotoksycznego działania sieciowych PEM (uszkodzeń DNA). Na podstawie kilkudziesięciu prac na ten temat trudno sformułować ostateczne wnioski — liczba doniesień potwierdzających wpływ jest prawie taka sama, jak mu zaprzeczających. W tym przypadku szczególnie interesujące są prace Laia i Singh (11–13), którzy stwierdzili, że 2-godzinna ekspozycja szczurów na pola magnetyczne 60 Hz o indukcji magnetycznej 0,1, 0,25 i 0,5 mT powodowała wzrost liczby uszkodzeń pojedynczych nici DNA, natomiast o indukcji 0,25 i 0,5 mT — podwójnych nici DNA w komórkach mózgu (uszkodzenia DNA były badane testem kometyowym) (11). Postawili oni hipotezę, że może być to spowodowane wpływem PEM na enzymatyczne procesy naprawcze (w trakcie ich zachodzenia tworzone są jako produkty przejściowe pary rodników) (13).

Wydaje się, że wśród prac dotyczących genotoksycznego działania PEM sieciowych zwrócić należy uwagę na te dotyczące jednoczesnej ekspozycji na PEM oraz czynników fizycznych i chemicznych powodujących powstawanie par rodników. Gdyby teoria wpływu pola magnetycznego na pary była prawdziwa, powinno obserwować się w takich warunkach istotną zmianę

* Rodnik to atom lub grupa atomów połączonych wiązaniami chemicznymi, zawierający jeden lub dwa elektrony niesparowane.

liczby uszkodzeń DNA. Także i w tym przypadku obserwacje są jednak niejednoznaczne. Dla przykładu Cantoni i wsp. (14) nie stwierdzili wpływu sieciowego pola magnetycznego o indukcji 0,2 μT – 0,2 mT na naprawę uszkodzeń pojedynczych nici DNA (SSB) w kulturach komórkowych ssaków poddanych działaniu sulfonianu metylometanowego, chromianu lub promieniowania UV o długości 250 nm, a Frazier i wsp. (15) — wpływu pola o indukcji 1 mT na naprawy SSB w izolowanych ludzkich limfocytach eksponowanych na promieniowanie ^{60}Co o dawce 60 Gy. Z kolei Moretti i wsp. (16) wykazali, że sieciowe pole magnetyczne o indukcji 1 mT nie wpływa na aktywność genotoksyczną benzenu i katecholu w koloniach komórkowych Jurkat, natomiast ma wpływ na aktywność genotoksyczną hydroguinonu.

Podobne wyniki, tzn. różny wpływ pól sieciowych na działanie genotoksyczne różnych ksenobiotyków (N-metylo-N'-nitro-N-nitrozoguanidyna oraz 1-tlenek 4-nitrochinoliny) przedstawiono w pracy Villariniego i wsp. (17). Robinson i wsp. (18) pokazali natomiast, że pole sieciowe o indukcji 0,15 mT wpływa na tempo napraw uszkodzeń DNA wywołanych przez ciepło w liniach komórkowych HL-60 i HL-60R, ale nie na tempo napraw w liniach komórkowych Raji.

W badaniach prowadzonych w Instytucie Medycyny Pracy w Łodzi pokazaliśmy, że sieciowe pole magnetyczne o indukcji 40 μT (rms) powoduje wzrost liczby SSB w wyizolowanych limfocytach szczurzych poddanych działaniu UVA (19), a o indukcji 7 mT — wzrost liczby SSB w takich limfocytach poddanych działaniu jonów żelaza (20). Należy zwrócić uwagę na to, że żelazo jest uważane za bardzo znaczące przy działaniu pola magnetycznego. Inicjuje bowiem reakcje Fentona, w której tworzone są pary rodników i w ten sposób inicjuje procesy peroksydacji, a także katalizuje przekształcanie nadtlenku wodoru powstającego w procesach oddychania w mitochondriach w bardzo reaktywne wolne rodniki hydroksylowe mogące uszkadzać cząsteczki biologiczne, np. DNA czy białka. Ich uszkodzenie może prowadzić do śmierci komórki:

Stwierdzono, że czynniki fizyczne lub chemiczne prowadzące do nadprodukcji wolnych rodników oraz powodujące uszkodzenia DNA i białek mogą wpływać na mechanizmy kontrolujące apoptozę i w ten sposób stymulować lub chronić komórkę przed śmiercią (21,22). Szereg badań potwierdza, że na apoptozę ma wpływ m.in. sieciowe pole magnetyczne (23–25).

Z tego, co napisano wyżej wynika, że znaczenie biologiczne mogą mieć sieciowe PEM o wartościach kilku kV/m i co najmniej kilku mikrotlesli. Niektórzy

autorzy uważają jednak, że również PEM dużo słabsze (zwłaszcza magnetyczne o wartościach mniejszych od 1 μT) mogą wpływać na procesy biologiczne. Dotyczy to przede wszystkim stymulowania produkcji białek w niektórych komórkach (26). Obok innych funkcji, białka pełnią znaczącą rolę w procesach chroniących przed działaniem różnych czynników zewnętrznych. Już dawno wykazano, że pod wpływem ostrego wzrostu temperatury („szoku cieplnego”) syntetyzowane są różne białka (około 20), nazywane „białkami szoku cieplnego”. Około 10 lat temu stwierdzono, że białka te są również syntetyzowane na skutek zadziałania na komórki pól sieciowych (27), przy czym mechanizm aktywacji genów jest inny niż w przypadku działania ciepła (28). Autorzy oceniają, że wartości progowe tego efektu są niższe niż 0,8 μT . Z uznaniem tych danych za w pełni wiarygodne należy się jednak wstrzymać do czasu ich potwierdzenia przez inne niezależne zespoły badawcze (zwróćmy uwagę, że dane na temat syntetyzowania białek stresu cieplnego przez PEM obserwuje grupa z Godman, Blankiem i Linem (26–28)).

Podsumowując dotychczasowe rozważania, można stwierdzić, że postulowane są dwie grupy mechanizmów — mające niezłe poparcie eksperymentalne (np. działanie na rodniki), które zachodzą dla sieciowych pól magnetycznych o wartościach indukcji kilkadziesiąt mikrotlesli, i czysto hipotetyczne (np. wpływ PEM na transfer elektronów w łańcuchach DNA), które według autorów mogą zachodzić dla pól dużo słabszych (rzędu dziesiątych części mikrotlesli).

EFEKTY ZDROWOTNE DZIAŁANIA PEM

Z dokonanego wyżej przeglądu hipotetycznych mechanizmów działania słabych sieciowych PEM wynika, że daleko nam jeszcze do zrozumienia biofizycznych podstaw ich ewentualnego działania na człowieka. Nawet jeżeli znaczenie tych mechanizmów się potwierdzi, to wciąż otwarte pozostaje pytanie, czy efekty biologiczne będące skutkiem działania PEM spowodują negatywne skutki zdrowotne. Z tego powodu tak ważne są badania kliniczne i epidemiologiczne. W odniesieniu do zdrowotnych efektów działania sieciowych PEM uwaga jest w tej chwili skupiona głównie na ich działaniu nowotworowym*. Istnieje jednak cały szereg danych wskazu-

* Temu problemowi (i innym dotyczącym różnym aspektom ochrony przed PEM) poświęcone były wykłady wygłoszone na XXII Szkole Jesiennej Polskiego Towarzystwa Badań Radiacyjnych im. M. Skłodowskiej-Curie pt. „Pola elektromagnetyczne (PEM) w środowisku — aspekty zdrowotne, ekologiczne i pomiarowe”. Część z nich zostanie opublikowana w kolejnych numerach Medycyny Pracy.

jących na możliwość negatywnego wpływu ekspozycji na takie pola na funkcje rozrodcze i zwiększenie ryzyka zachorowania na choroby neurodegeneratywne, a zwłaszcza na stwardnienie boczne zanikowe i chorobę Alzheimera.

Stwardnienie boczne zanikowe i choroba Alzheimera

Po raz pierwszy zwiększone ryzyko zachorowania na stwardnienie boczne zanikowe (Amyotrophic Lateral Sclerosis — ALS) wśród osób ekspozowanych na zwiększony poziom sieciowych PEM zaobserwowali Deapen i Henderson (29) u pracowników zawodów elektrycznych. Od tego czasu pojawiło się około 10 prac epidemiologicznych dotyczących tego zagadnienia (ich przeglądu dokonali Li i Sung (30)), a autorzy większości z nich potwierdzają obserwacje Deapena i Hendersona (29). Ryzyko to jest przy tym w niektórych grupach zawodowych stosunkowo wysokie, np. według Savitza i wsp. (31) OR dla operatorów stacji elektroenergetycznych wynosiło 4,8. Savitz i wsp. (32) stwierdzili również wzrost ryzyka zachorowania na ALS u pracowników zatrudnionych w zawodach elektrycznych 20 lat i dłużej. Na obecnym etapie badań wyciąganie ostatecznych wniosków jest jednak zdecydowanie przedwczesne, ponieważ:

1. W większości prac ocena ekspozycji następuje na podstawie nazwy zawodu — przyjmuje się, że „zawody elektryczne” związane są z większą ekspozycją na sieciowe PEM niż inne, których przedstawiciele są zaliczani do grupy kontrolnej. Wykazano jednak, że pracownicy zawodów „nieelektrycznych” są czasami ekspozowani na stosunkowo duże poziomy PEM. Dla przykładu Semple i Charrie (33) stwierdzili, że niekiedy maksymalny dzienny poziom ekspozycji urzędników może osiągać nawet 10 μ T.
2. W większości dotychczas wykonanych badań nie wykluczono możliwości innej niż PEM przyczyny obserwowanego efektu. Na przykład Deapen i Henderson (29) czy Johansen i Olsen (34) wiązali wzrost ryzyka zachorowania na ALS raczej z częstszym występowaniem w grupie pracowników zawodów elektrycznych porażen prądem elektrycznym. Również Gunnarsson i wsp. (35) wykazali wzrost ryzyka zachorowania na ALS u osób pracujących z elektrycznością (OR = 6,7) i brak tego efektu w zależności od wielkości PEM. Pod uwagę należy wziąć także możliwość szkodliwego działania takich czynników, jak ekspozycja na metale ciężkie czy rozpuszczalniki, która jest związana z wieloma tymi zawodami (ich wpływ na ryzyko zachorowania na ALS wykazali m.in. Gunnarsson i wsp. (35)).

3. Występują poważne problemy z diagnozowaniem ALS (i jeszcze większe z chorobą Alzheimera) do celów badań epidemiologicznych. Szczególnie dotyczy to badań opartych o rejestry zgonów, które często zawierają diagnozy lekarzy niebędących specjalistami. Dotyczy to np. prac Savitza i wsp. (31,32), Gunnarssona i wsp. (36) czy Johansena i Olsena (34).

Dokładnie takie same zastrzeżenia można mieć do badań epidemiologicznych dotyczących choroby Alzheimera (Alzheimer Disease — AD). Z tego powodu z dużą ostrożnością należy podchodzić do prac wskazujących na wzrost ryzyka zachorowania na AD u osób zawodowo ekspozowanych na sieciowe pola magnetyczne. Należą do nich przede wszystkim prace Sobela, Davani-poura i wsp. (37,38,39), a także Harmanciego i wsp. (40) oraz Savitza i wsp. (31). Ponadto w kilku pracach wyniki są niejednoznaczne — np. Qiu i wsp. (41) zaobserwowali wzrost ryzyka zachorowania na AD u mężczyzn, których główna praca była związana z ekspozycją na PEM (OR = 2,3; 95% CI: 1,0–5,1), natomiast wzrostu takiego ryzyka nie obserwowano u kobiet (podobna sytuacja występowała w przypadku analizy w oparciu o średnią życiową dawkę sieciowego pola magnetycznego). Są też prace, np. Gravesa i wsp. (42), w których efektu zwiększenia ryzyka nie obserwowano wcale.

Zwolennicy hipotezy o związku ekspozycji na PEM sieciowe z chorobą Alzheimera zwracają uwagę na to, że jest wiele prac wykazujących na ochronne działanie melatoniny przeciwko AD (43), a jednocześnie są takie, które wskazują na obniżanie jej produkcji w wyniku ekspozycji na sieciowe pola magnetyczne zarówno na skutek ekspozycji zawodowej (44), jak i komunalnej (45).

Podsumowując powyższe informacje, można stwierdzić, że istnieją dane wskazujące na możliwość istnienia związku między wzrostem ryzyka zachorowania na ALS i AD a ekspozycją zawodową na sieciowe PEM (zwłaszcza w przypadku ALS), przy czym próg działania określany jest na około 1 μ T (46). Formułowanie jednak ostatecznych wniosków jest przedwczesne ze względu na istotne braki metodologiczne i interpretacyjne dotychczas wykonanych badań. Należy również zwrócić uwagę na brak badań ekspozycji komunalnej.

Wpływ na funkcje rozrodcze

Wpływ PEM na funkcje reprodukcyjne człowieka budzi duże zainteresowanie od lat, m.in. ze względu na wyniki badań na zwierzętach, np. Delgado i wsp. (47). We wcześniejszych badaniach stwierdzono zaburzenia płodności wśród mężczyzn ekspozowanych na sieciowe PEM i obniżenie stosunku płci u ich potomstwa (48,49). Nordstrom i wsp.

(49) stwierdzili również, że ciążę u partnerek mężczyzn pracujących w stacjach elektroenergetycznych 400 kV trzykrotnie częściej kończyły się urodzeniem dziecka z wrodzoną wadą rozwojową w porównaniu z grupą porównawczą, którą stanowiły partnerki mężczyzn zatrudnionych przy innych urządzeniach elektrycznych. Z kolei Wertheimer i Leeper (50) stwierdzili, że używanie przez ciężarne kobiety koców elektrycznych i podgrzewanych elektrycznie łóżek może zaburzać rozwój płodów. Nowsze badania nie potwierdzają tej obserwacji (51,52). Niektórzy autorzy obserwują natomiast związek między całkowitą „domową” ekspozycją na sieciowe pole magnetyczne a liczbą poronień — według Lee i wsp. (53) wzrost ryzyka występuje dla sieciowego pola magnetycznego o maksymalnej indukcji w ciągu dnia większej od 2,3 μT , a według Li i wsp. (54) dla pola o maksymalnej wartości w ciągu dnia powyżej 1,6 μT . Badania dotyczące ekspozycji zawodowej (średnia ważona w ciągu zmiany roboczej powyżej 0,5 μT) nie wskazują na jej negatywny wpływ na liczbę poronień.

Podsumowując, można stwierdzić, że na podstawie badań epidemiologicznych nie można jednoznacznie wypowiedzieć się na temat wpływu sieciowych PEM na funkcje rozrodcze człowieka. Konieczna jest większa liczba badań — zwłaszcza dla PEM o indukcjach przekraczających 1 μT .

Wpływ na układ krążenia

Układ krążenia i współpracujący z nim układ nerwowy (regulacja neurovegetatywna) ze względu na ich typowo „elektryczny” charakter od samego początku badań nad bioelektromagnetyzmem były uważane za szczególnie wrażliwe na działanie zewnętrznych PEM. W latach 60. ukazało się w ZSRR szereg prac potwierdzających tę hipotezę, np. Asanova i Rakov (55) czy Sazanova (56), w których stwierdzono zaburzenia rytmu i ciśnienia tętniczego krwi. W krajach zachodnich z reguły takiego efektu nie obserwowano, o czym pisali np. Broadbent i wsp. (57) czy Knave i wsp. (48). W 1998 roku ukazała się jednak praca Sastre i wsp. (58), w której raportowali oni wpływ ekspozycji na sieciowe PEM na zaburzenia rytmu. W wielu pracach (np. Greenland i wsp. (59)) wykazano, że zaburzenia takie mogą prowadzić do ostrych incydentów sercowych, więc podjęto prace nad zbadaniem wpływu ekspozycji sieciowych pól magnetycznych na umieralność z powodu chorób serca.

Taki związek wykazali Savitz i wsp. (60). Zaobserwowali oni zwiększoną umieralność pracowników zawodów elektrycznych na ostre zapalenie mięśnia sercowego i z powodu arytmii (nie wykazano związku

z umieralnością na przewlekłe choroby serca). Inni autorzy w zdecydowanej większości nie potwierdzili jednak tych obserwacji (61–63). Jedynie Hakansson i wsp. (64) zaobserwowali nieistotny statystycznie wzrost ryzyka zgonów z przyczyny ostrych zapaleń mięśnia sercowego.

Jak wynika z powyższego, w chwili obecnej związek między ekspozycją na sieciowe PEM a chorobami serca jest wątpliwy. Tym bardziej, że badania nad tym zagadnieniem są obarczone podobnymi wadami, jak opisane wyżej badania wpływu PEM na ryzyko zachorowania na choroby neurodegeneratywne (błędy przy diagnozowaniu przyczyny zgonu, wątpliwości przy ocenie ekspozycji czy etiologii choroby).

PODSUMOWANIE

Na podstawie przeglądu mechanizmów działania słabych sieciowych PEM można stwierdzić, że daleko nam jeszcze do zrozumienia biofizycznych podstaw ewentualnego ich działania na człowieka. Mechanizmy dobrze znane mają znaczenie dla PEM sieciowych o wartościach znacznie przekraczających te, które występują w środowisku komunalnym, a nawet w środowisku pracy (dotyczy to nawet szeroko dyskutowanego wpływu pól magnetycznych na rodniki). Z kolei w chwili obecnej nie ma wystarczających dowodów eksperymentalnych na uznanie za dowiedzione istotnego biologicznego znaczenia mechanizmów zachodzących dla dużo słabszych PEM sieciowych (takich, jak np. transfer elektronów w łańcuchach DNA). Nawet jeżeli ich obecność się potwierdzi, to wciąż otwarte pozostaje pytanie, czy efekty biologiczne będące skutkiem działania sieciowych PEM spowodują negatywne skutki zdrowotne.

Badania epidemiologiczne dotychczas skupiają się przede wszystkim na działaniu kancerogennym sieciowych PEM, dużo mniej dotyczy ich wpływu na ryzyko zachorowania na choroby neurodegeneratywne, na funkcjonowanie układu krążenia i funkcje rozrodcze człowieka. Dotychczas żaden z powyższych efektów zdrowotnych nie został wystarczająco potwierdzony (istnieją zarówno badania potwierdzające, jak i negujące możliwość ich występowania). Przyczyną są zapewne niedostatki metodologiczne badań, a przede wszystkim błędy przy diagnozowaniu (zwłaszcza gdy badania oparte są o rejestr zgonów), wątpliwości przy ocenie ekspozycji czy etiologii choroby (wpływ innych czynników środowiskowych na badane skutki zdrowotne). Z tego powodu potrzebne są dalsze intensywne prace eliminujące te mankamenty.

PIŚMIENNICTWO

1. Kaune W.T., Phillips R.D.: Comparison of the coupling of grounded humans, swine, and rats to vertical 60-Hz electric fields. *Bioelectromagnetics* 1980;1:117–130
2. Dawson T.W., Caputa K., Stuchly M.: High-resolution organ dosimetry for human exposure to low frequency electric fields. *IEEE Trans. Power Deliv.* 1998;13(2):366–373
3. Portier C.J., Wolfe M.S. [red.]: Assessment of health effects from exposure to power-line frequency electric and magnetic fields. Working Group Report. National Institute of Environmental Health Sciences, Bethesda (USA) 1998, ss. 244–255
4. Bernhardt J.H.: The establishment of frequency dependent limits for electric and magnetic fields and evaluation of indirect effects. *Radiat. Environ. Biophys.* 1988;27:1–27
5. Blank M., Goodman R.: Electromagnetic initiation of transcription at specific DNA sites. *J. Cell. Biochem.* 2002;81:689–692
6. Wan C., Fiebig T., Schiemann O., Barton J.K., Zewail A.H.: Femtosecond direct observation of charge transfer between bases in DNA. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2000;97:14052–14055
7. Porath D., Bezryadin A., de Vries S., Dekker C.: Direct measurements of electrical transport through DNA molecules. *Nature* 2000;403:635–638
8. Aristarkhov V.M., Klimenko L.L., Deev A.I., Ivanecka E.V.: Effects of constant magnetic field on peroxide oxidation of lipid in phospholipid membranes. *Biofizika* 1983;5:800–806
9. Lalo U.V., Pankratov Y.O., Mikhailik O.M.: Steady magnetic fields effects on lipid peroxidation kinetics. *Redox Rep.* 1994;1:71–75
10. Chignell C.F., Sik R.H.: The effect of static magnetic fields on the photohemolysis in human erythrocytes by ketoprofen. *Photochem. Photobiol.* 1998;67(5):591–595
11. Lai H., Singh N.P.: Acute exposure to a 60-Hz magnetic field increases DNA strand breaks in rat brain cells. *Bioelectromagnetics* 1997;18:156–165
12. Lai H., Singh N.P.: Melatonin and N-tert-butyl- α -phenylnitron blocked 60-Hz magnetic field-induced DNA single and double strand breaks in rat brain cells. *J. Pineal Res.* 1997;22:152–162
13. Singh N.P., Lai H.: 60 Hz magnetic field exposure induces DNA crosslinks in rat brain cells. *Mutat. Res.* 1998;400:313–320
14. Cantoni O., Sestili P., Fiorani M., Dacha M.: Effect of 50 Hz sinusoidal electric and/or magnetic fields on the rate of repair of DNA single strand breaks in cultured mammalian cells exposed to three different carcinogens: methylmethane sulphonate, chromate and 254 nm UV radiation. *Biochem. Mol. Biol. Int.* 1996;38(3):527–533
15. Frazier M.E., Reese J.A., Morris J.E., Jostes R.F., Miller D.L.: Exposure of mammalian cells to 60-Hz magnetic or electric fields: analysis of DNA repair of induced, single strand breaks. *Bioelectromagnetics* 1990;11(3):229–234
16. Moretti M., Villarini M., Simonucci S., Fatigoni C., Scasellati-Sforzolini G., Monarca S. i wsp.: Effects of co-exposure to extremely low frequency (ELF) magnetic fields and benzene or benzene metabolites determined *in vitro* by the alkaline comet assay. *Toxicol Lett.* 2005;157(2):119–128
17. Villarini M., Moretti M., Scasellati-Sforzolini G., Boccioli B., Pasquini R.: Effects of co-exposure to extremely low frequency (50 Hz) magnetic fields and xenobiotics determined *in vitro* by the alkaline comet assay. *Sci. Total. Environ.* 2006;36(1–3):208–219
18. Robinson J.G., Pendleton A.R., Monson K.O., Murray B.K., O'Neill K.L.: Decreased DNA repair rates and protection from heat induced apoptosis mediated by electromagnetic field exposure. *Bioelectromagnetics* 2002;23(2):106–112
19. Zmysłony M., Palus J., Dziubałtowska E., Politański P., Mamrot P., Rajkowska E. i wsp.: Effects of *in vitro* exposure to power frequency magnetic fields on UV-induced DNA damage of rat lymphocytes. *Bioelectromagnetics* 2004;25(7):560–562
20. Zmysłony M., Palus J., Jajte J., Dziubałtowska E., Rajkowska E.: DNA damage in rat lymphocytes treated *in vitro* with iron cations and exposed to 7 mT magnetic fields (static or 50 Hz). *Mutat. Res.* 2000;453:89–96
21. Jajte J., Grzegorzczak J., Zmysłony M., Rajkowska E.: Effect of 7 mT static magnetic field and iron ions on rat lymphocytes: apoptosis, necrosis and free radical processes. *Bioelectrochemistry* 2002;57:107–111
22. Kerr J.F.R., Wyllie A.H., Currie A.R.: Apoptosis: a basic biological phenomenon with wide-ranging implications in tissue kinetics. *Br. J. Cancer* 1972;26:239–257
23. Ding G.R., Nakahara T., Hirose H., Koyama S., Takashima Y., Miyakoshi J.: Extremely low frequency magnetic fields and the promotion of H₂O₂-induced cell death in HL-60 cells. *Int. J. Radiat. Biol.* 2004;80(4):317–24
24. Semko M., Kriehuber R., Weiss D.G., Luben R.A.: Effects of 50 Hz EMF exposure on micronucleus formation and apoptosis in transformed and nontransformed human cell lines. *Bioelectromagnetics* 1998;19(2):85–91
25. Verheyen G.R., Pauwels G., Verschaeve L., Schoeters G.: Effect of coexposure to 50 Hz magnetic fields and an aeneugen on human lymphocytes, determined by the cytokinesis block micronucleus assay. *Bioelectromagnetics* 2003;24(3): 160–164
26. Blank M., Soo L., Lin H., Henderson A.S., Goodman R.: Changes in transcription in HL-60 cells following exposure to AC electric fields. *Bioelectrochem. Bioenerg.* 1992;28:301–309
27. Lin H., Opler M., Head M., Blank M., Goodman R.: Electromagnetic field exposure induces rapid transitory heat shock factor activation in humans cells. *J. Cell. Biochem.* 1997;66:482–488
28. Goodman R., Blank M.: Insights into electromagnetic interaction mechanisms. *J. Cell. Physiol.* 2002;192:16–22
29. Deapen D.M., Henderson B.E.: A case-control study of amyotrophic lateral sclerosis. *Am. J. Epidemiol.* 1986;123:790–799

30. Li C.Y., Sung F.C.: Association between occupational exposure to power frequency electromagnetic fields and Amyotrophic Lateral Sclerosis. *Am. J. Ind. Med.* 2003;43: 212–220
31. Savitz D.A., Loomis D.P., Tse C.K.J.: Electrical occupations and neurodegenerative disease: Analysis of U.S. mortality data. *Arch. Environ. Health* 1998;53:71–74
32. Savitz D.A., Checkoway H., Loomis D.P.: Magnetic field exposure and neurodegenerative disease mortality among electric utility workers. *Epidemiology* 1998;9:398–404
33. Semple S., Charrie J.W.: Factor influencing personal magnetic field exposure: Preliminary results for utility and office workers. *Ann. Occup. Hyg.* 1998;42:167–171
34. Johansen C., Olsen J.H.: Mortality from amyotrophic lateral sclerosis, other chronic disorders, and electric shocks among utility among utility workers. *Am. J. Epidemiol.* 1998;48:362–368
35. Gunnarsson L.G., Bodin L., Söderfeldt D., Axelson O.: A case-control study of motor neurone disease: Its relation to heritability, and occupational exposures, particularly to solvents. *Br. J. Ind. Med.* 1992;49(11):791–798
36. Gunnarsson L.G., Lindberg G., Söderfeldt D., Axelson O.: Amyotrophic lateral sclerosis in Sweden in relation to occupation. *Acta Neurol. Scand.* 1991;83:394–398
37. Sobel E., Davanipour Z., Sulkava R., Erkinjuntti T., Eikstrom J., Henderson V.W. i wsp.: Occupations with exposure to electromagnetic fields: a possible risk factor Alzheimer's disease. *Am. J. Epidemiol.* 1995;142:515–524
38. Sobel E., Dunn M., Davanipour Z., Qian Z., Chui H.C.: Elevated risk of Alzheimer disease among workers with likely electromagnetic field exposure. *Neurology* 1996;47: 1477–1481
39. Davanipour Z., Tseng C.-C., Lee P.-J., Sobel E.: A case-control study of occupational magnetic field exposure and Alzheimer's disease: results from the California Alzheimer's Disease Diagnosis and Treatment Centers. *BMC Neurol.* 2007;7:13–22
40. Harmanci H., Emre M., Gurvit H., Bilgic B., Hanagasi H., Gurol E. i wsp.: Risk factors for Alzheimer disease: a population-based case-control study in Istanbul, Turkey. *Alzheimer Dis. Assoc. Disord.* 2003;17:139–145
41. Qiu C., Fratiglioni L., Karp A., Windbland B., Bellander T.: Occupational exposure to electromagnetic fields and risk of Alzheimer disease. *Epidemiology* 2004;15:687–694
42. Graves A.B., Rosner D., Echeverria D., Mortimer J.A., Larson E.B.: Occupational exposure to electromagnetic fields and Alzheimer disease. *Alzheimer Dis. Assoc. Disord.* 1999;13:165–170
43. Srinivasan V., Pandi-Perumal S., Cardinali D., Poegler B., Hardeland R.: Melatonin in Alzheimer's disease and other neurodegenerative disorders. *Behav. Brain Funct.* 2006;2:15–37
44. Burch J.B., Reif J.S., Noonan C.W., Yost M.G.: Melatonin metabolite levels in workers exposed to 60 Hz magnetic fields: work in substations and with 3-phase conductors. *J. Occup. Environ. Med.* 2000;42:136–142
45. Davis S., Kaune W.T., Mirick D.K., Chen C., Stevens R.G.: Residential magnetic fields, light-at-night, and nocturnal urinary of 6-sulfaoxymelatonin concentration in women. *Am. J. Epidemiol.* 2001;154:591–600
46. Davanipour Z., Sobel E.: Evidence for effects on melatonin: Alzheimer disease and breast cancer. Report of Bio-Initiative Working Group, 2007 [cytowany 30 października 2008 r.]. Adres: <http://www.bioinitiative.org/report/docs/report.pdf>
47. Delgado J.M.R., Leal J., Monteagudo J.L., Gracia M.G.: Embryological changes induced by weak, extremely-low frequency electromagnetic fields. *J. Anat.* 1982;134: 187–220
48. Knave B., Gamberale F., Brike E., Iregren A., Kolmodin-Hedman B., Wenneberg A.: Long-term exposure to electric fields: a cross-sectional epidemiologic investigation of occupationally exposed workers in high voltage substations. *Scand. J. Work Environ. Health* 1979;5:115–125
49. Nordstrom S., Birke E., Gustavsson L.: Reproductive hazards among workers at high voltage substations. *Bioelectromagnetics* 1983;4:91–102
50. Wertheimer N., Leeper E.: Possible effects of electric blankets and heated waterbeds on fetal development. *Bioelectromagnetics* 1986;7:13–22
51. Belanger K., Leaderer B., Hallenbrand K., Holford T.R., McSharry J.: Spontaneous abortion and exposure to electric blankets and heated water beds. *Epidemiology* 1998;9:36–42
52. Bracken M.B., Belanger K., Hellenbrand K., Długosz L., Holford T.R.: Exposure to electromagnetic fields during pregnancy with emphasis on electrically heated beds: association with birthweight and intrauterine growth retardation. *Epidemiology* 1995;6:263–270
53. Lee G.M., Neutra R.R., Hristova L., Yost M., Hiat R.A.: A nested case-control study of residential and personal magnetic field measures and miscarriages. *Epidemiology* 2002;13:21–31
54. Li D.K., Odouli R., Wi S., Janevic T., Goldith I.: A population-based prospective cohort study of personal exposure to magnetic fields during pregnancy and the risk of miscarriage. *Epidemiology* 2002;13:9–20
55. Asanova T.P., Rakov A.T.: The state of health of persons working in electric fields of outdoor 400 and 500 kV switch-yards. *Gig. Tr. Prof. Zabol.* 1966;10:50–52
56. Sazanova T.E.: Physiological and hygienic assessment of labor conditions at 400–500 kV outdoor switch-yards. *Gig. Tr. Prof. Zabol.* 1965;9:34–39
57. Broadbent D.E., Broadbent M.H., Male J.C., Jones M.R.: Health of workers exposed to electric fields. *Br. J. Ind. Med.* 1985;42:75–84
58. Sastre A., Cook M.R., Graham C.: Nocturnal exposure to intermittent 60 Hz magnetic fields alters human cardiac rhythm. *Bioelectromagnetics* 1998;2:98–106
59. Greenland P., Daviglius M.L., Dyer A.R., Liu K., Huang C.F., Goldberger J.J. i wsp.: Resting heart rate is a risk

- factor for cardiovascular and noncardiovascular mortality. *Am. J. Epidemiol.* 1999;9:853–862
60. Savitz D.A., Liao D., Sastre A., Kleckner R.C., Kavet R.: Magnetic field exposure and cardiovascular disease mortality among electric utility workers. *Am. J. Epidemiol.* 1999;149:135–142
61. Sahl J., Mezei G., Kavet R., McMilan A., Silvers A. i wsp. Occupational magnetic field exposure and cardiovascular mortality in a cohort of electric of electric utility workers. *Am. J. Epidemiol.* 2002;156:913–918
62. Sorahan T., Nichols L.: Mortality from cardiovascular disease in relation to magnetic field exposure: findings from a study of UK electricity generation and transmission workers, 1973–1997. *Am. J. Ind. Med.* 2004;45:93–102
63. Johansen C., Feychting M., Moller M., Arnsbo P., Ahlbom A., Olsen J.H.: Risk of severe cardiac arrhythmia in male utility workers: a nationwide Danish cohort study. *Am. J. Epidemiol.* 2002;156:857–861
64. Hakansson N., Gustavsson P., Sastre A., Floderus B.: Occupational exposure to extremely low frequency magnetic fields and mortality from cardiovascular disease. *Am. J. Epidemiol.* 2003;158:534–542