

BIOLOGICKÉ ÚČINKY ELEKTROMAGNETICKÝCH POLÍ

Richard Drahoš, Roman Drahoš

ÚVOD

Ľudský organizmus je charakterizovaný ako komplexné a premenlivé prostredie zložené z vodných roztokov elektrolytov, koloidov a buniek, pričom ľudské orgány (tkanivá) sú suspenziou buniek v elektrolytoch. V ľudskom tele sa nachádza približne 25 miliárd nervových buniek s celovou dĺžkou približne 500 000 kilometrov. Mozog so svojimi 10 miliardami nervových buniek tvorí tisíce prepojených komunikačných kanálov, pričom prenos prebieha elektrochemickými procesmi na veľmi nízkom energetickom rozsahu.

Na základe doterajších poznatkov interakcia EM poľa s ľudským organizmom spôsobuje:

- netepelné účinky - ovplyvňuje koloidné štruktúry bunkového obsahu a menia sa elektrické vlastnosti buniek,
- tepelné účinky - prejavuje sa otepľovaním tkanív pri veľkých výkonových hustotách polí.

Netepelné účinky súvisia s elektrickými vlastnosťami biologických systémov, čo sa pri dlhodobom pôsobení môže prejavovať telesnou slabosťou, pocitom vyčerpanosti, zvýšenou únavou, zhoršením pamäte, poruchami spánku a bolesťami hlavy.

Tepelné účinky súvisia s absorpciou energie, čo spôsobuje nárast teploty lokálnej časti tela, pričom signifikantný nárast teploty sa zistí najskôr po šiestich minútach expozície. V publikovaných podkladoch sa ako následok tepelných účinkov najčastejšie uvádza poškodenie vnútorného ucha, zakalenie očnej šošovky a poškodenie rohovky ako následok oteplenia očí.

Biologické účinky statického elektrického a magnetického poľa

Ľudské telo z elektrostatického hľadiska predstavuje elektródu kondenzátora s kapacitou oproti zemi. Veľkosť kapacity závisí od rozmerov a materiálu obuvi, od polohy tela v priestore a vzdialenosti od iných uzemnených predmetov a pohybuje sa v rozmedzí 50 až 250 pF. Elektrický náboj nahromadený na povrchu tela môže rádovo dosiahnuť hodnotu 10^{-6} C a energiu 0,1 J.

Vnútro ľudského tela je pred statickým elektrickým poľom chránené svojim povrchom. Statické elektrické pole indukuje elektrický náboj na exponovanej osobe, čo sa môže prejavovať napr. postavením chĺpkov na povrchu kože. Okrem toho môže elektrický „nabitá“ osoba dotykom s kovovým predmetom vyvolať preskok náboja (elektrický úder). Elektrický náboj je schopný dráždiť nervové centrá s individuálnou citlivosťou a pri dotyku s objektom, ktorý má veľkú hodnotu náboja Q môže dôjsť aj k smrteľnému úrazu.

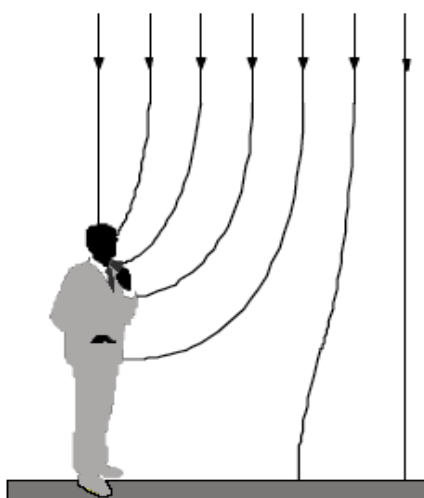
Účinky statických elektrických polí sú až do hodnoty 20 kV.m^{-1} považované za neškodné a ďalšie priame vplyvy na ľudský organizmus nie sú známe. Medzi nepriamy vplyv na ľudský organizmus je možné zahrnúť nebezpečenstvo vyplývajúce z mimovoľnej reakcie človeka na prejavy elektrostatického náboja (zľaknutie sa, bolesť, mimovoľný pohyb), čím môže dôjsť k ohrozeniu bezpečnosti.

Na rozdiel od elektrických polí, statické magnetické polia môžu voľne prenikať biologickým tkanivami a bezprostredne vzájomne reagovať s pohybujúcimi iónmi (nábojmi) a spôsobiť vznik prúdov v tkanivách a tým aj elektrických polí v tkanivách.

Biologické účinky ELF poľa

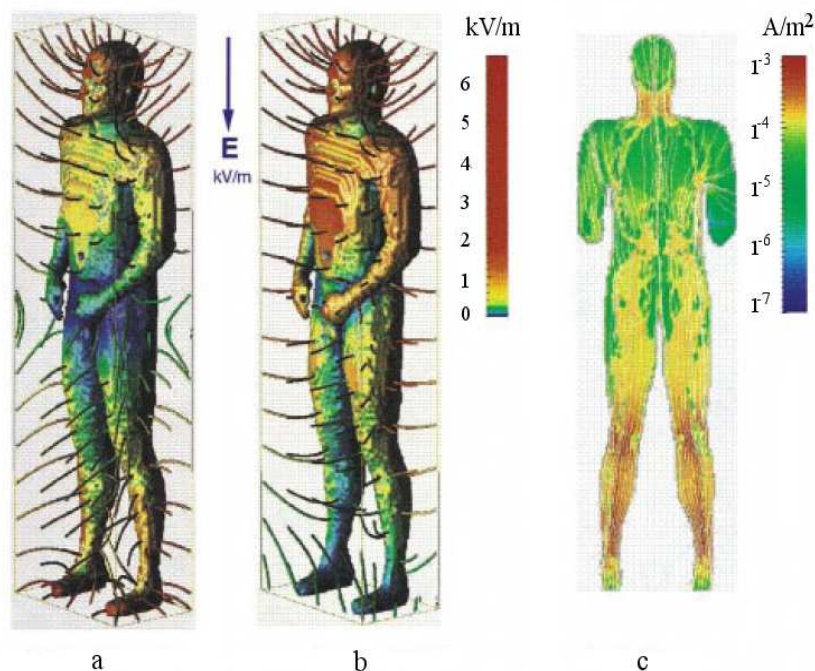
Hlavným mechanizmom biologického účinku elektrických a magnetických polí s extrémne nízkou frekvenciou ELF do 60 Hz (Extremely Low Frequency) je indukcia (vyvolanie) prúdovej hustoty v tkanive.

Prítomnosť biologického objektu ovplyvňuje (narúša) vonkajšie elektrické pole (obr. 1) a podobne ako pri statickom poli sa indukujú povrchové náboje. Pretože konduktivita (vodivosť) tkaniva pri nízkych frekvenciách je malá, **indukované vnútorné elektrické pole** je približne 10^5 až 10^8 krát slabšie ako vonkajšie elektrické pole.



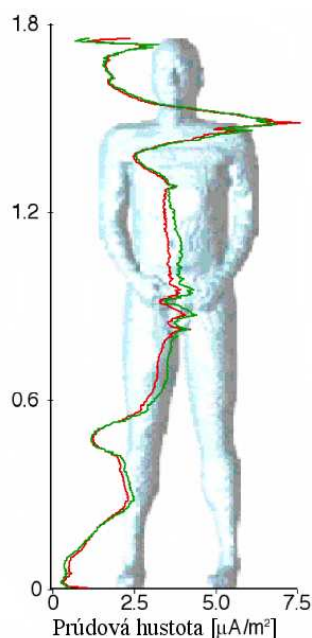
Obr. 1 Narušenie vonkajšieho elektrického poľa človekom

Na obrázku 2 je znázornené rozloženie povrchového náboja na povrchu ľudského tela a priestorové rozloženie indukovaných prúdov (indukovanej prúdovej hustoty) zapríčinených vonkajším elektrickým poľom s intenzitou 1 kV.m^{-1} na frekvencii 60 Hz.



Obr. 2 Ľudské telo vystavené uniformnému elektrickému poľu 1 kV/m na frekvencii 60 Hz. Rozloženie povrchového náboja v prípade a) osoby vo voľnom priestore b) osoby stojacej na uzemnenej podložke. c) Rozloženie prúdovej hustoty v ľudskom tele

Siločiary magnetického poľa v podstate nie sú rušené prítomnosťou biologického objektu, pretože permeabilita biologických tkanív sa prakticky rovná permeabilite vákuu. Na obrázku 3 je znázornené priestorové rozloženie indukovaných prúdov (indukovanej prúdovej hustoty) zapríčinennej vonkajším magnetickým poľom s indukciou 1 μT na frekvencii 60 Hz.



Obr. 3 Rozloženie prúdovej hustoty

Rozloženie indukovanej prúdovej hustoty vplyvom elektrického a magnetického poľa súvisí s rozdielnymi elektrickými vlastnosťami rôznych častí tkaniva organizmu.

Fyzikálnym mechanizmom pôsobenia ELF polí na bunkovej (celulárnej) úrovni je elektrická stimulácia excitabilných buniek tkanív, ako sú nervy, svaly a srdce. K stimulácii dochádza, ak prechádzajúci indukovaný prúd tkanivom spôsobí, že zmena napätia cez bunkovú membránu prekročí prahovú hodnotu V_m (typická prahová hodnota je okolo 20 mV. Keď je prah prekročený, dochádza k depolarizácii membrány a šíreniu akčného potenciálu (vzruchu, impulzu). Minimálna hodnota intenzity pôsobiaceho poľa, ktorá spôsobuje depolarizáciu závisí od typu, rozmeru a tvaru bunky, ako aj od frekvencie a dĺžky trvania pôsobiaceho poľa. Efekt elektrickej stimulácie spôsobuje na:

- molekulárnej úrovni, otváranie iónových kanálov (napätím riadená molekula proteínu kanála v bunkovej membráne),
- bunkovej úrovni, akčný potenciál (depolarizácia),
- na systémovej úrovni, stiahnutie (kŕč) svalu alebo srdca, fibrilácia a nepravidelný srdcový rytmus.

Biologické účinky vysokofrekvenčného EM poľa

Pre EM polia približne nad 100 kHz sú už elektrické stimulačné účinky polí zanedbateľné a prevládajú tepelné účinky. Pri posudzovaní tepelných účinkov nestačí poznať veľkosť výkonovej hustoty **vonkajšieho** EM poľa, ale je potrebné určiť veľkosť absorpcie EM energie v tele človeka. Rýchlosť absorpcie energie v tkanive sa vyjadruje veličinou - **merný absorbovaný výkon SAR** (Specific Absorption Rate), ktorý je definovaný ako prírastok energie W_e za čas dt v objeme tkaniva dV s hmotnosťou dm

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW_e}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{\rho} \frac{dW_e}{dV} \right)$$

a jednotkou veličiny SAR je $W \cdot kg^{-1}$.

Ak je známa hodnota intenzity elektrického poľa E v určitom bode exponovaného biologického objektu (**vnútorné elektrické pole**), potom sa hodnota veličiny SAR vypočíta podľa vzťahu

$$SAR = \frac{\sigma E_i^2}{\rho}$$

kde

E_i je efektívna hodnota indukovaného vnútorného elektrického poľa vo $V \cdot m^{-1}$,

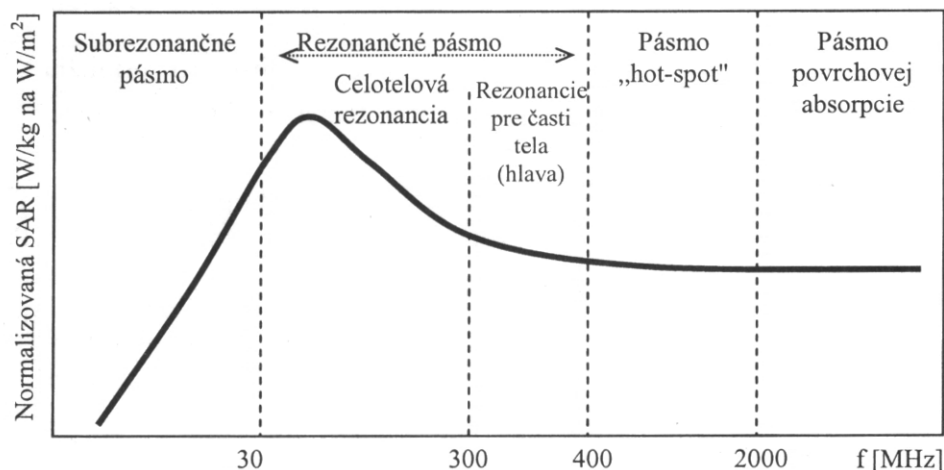
σ je merná hmotnosť tkaniva v $kg \cdot m^{-3}$,

ρ je merná elektrická vodivosť (konduktivita) tkaniva v $S \cdot m^{-1}$.

V určitom bode exponovaného biologického objektu, SAR a prúdová hustota J sú vzájomne viazané vzťahom

$$SAR = \frac{J^2}{\sigma \rho}$$

Na základe absorpčných vlastností ľudského tela, účinky súvisiace s expozíciou (ožiarením) EM poliami sa môžu rozdeliť do frekvenčných oblastí znázornených na obrázku 4.



Obr. 4 Frekvenčné oblasti charakterizujúce účinky EM polí [2]

- **Sub-rezonančné pásmo** s frekvenciou menej ako 30 MHz, kde prevláda povrchová absorpcia pre trup, nie však pre krk a končatiny. V oblasti krku a končatín (členky, kolená, zápästie, lakty) môžu nastať značne vyššie absorpcie ako je celotelový priemer. V tomto pásme absorpcia energie prudko rastie.
- **Rezonančné pásmo** pre celé telo, od 30 MHz až do 300 MHz. V tomto pásme absorpcia (celotelový priemer SAR) nadobúda maximum. Vysoké lokálne hodnoty SAR sa vyskytujú na miestach ako zápästia a členky.
- **Pásmo „hot spot“** približne od 400 MHz až do 2 (3) GHz, ktoré je charakterizované veľmi nerovnomerným rozložením absorpcie v tele (dané nehomogénnosťou ľudského tela). Vyskytujú sa značné lokálne absorpcie v určitých miestach a veľkosť „horúcich miest“ je v rozsahu od niekoľkých centimetrov pre 915 MHz až po 1 cm pre 3 GHz. Absorpcia energie klesá so stúpajúcou frekvenciou.
- **Pásmo povrchovej absorpcie**, vyššie ako 2 (3) GHz, kde je absorpcia (zvýšenie teploty) lokalizované a obmedzené na povrch tela.

Z uvedeného vzťahu vyplýva, že ide o bodovú veličinu a priemerná hodnota absorpcie SAR_{evg} sa stanoví

$$SAR_{\text{evg}} = \frac{1}{V} \int_V SAR dV$$

kde V je objem tkaniva, cez ktorý sa stanoví priemer, v prípade celotelového SAR je V objem celého tela a v prípade priemerného SAR hlavy je V objem hlavy.

Počiatkový nárast teploty dT , kedy sa môžu zanedbať tepelné straty organizmu (vedením, prúdením a sálaním) je priamoúmerný veľkosti SAR

$$\frac{dT}{dt} = \frac{SAR}{c_T}$$

kde c_T je špecifická tepelná kapacita tkaniva v $\text{J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$.

Absorpcia EM energie do určitých hodnôt SAR napr. 4 W.kg^{-1} nemusí v ľudskom tele nevyhnutne viesť k úmernému nárastu teploty a to z dôvodu termoregulácie (zvýšenie prúdenia krvi, ochladzovanie odparovaním potu a pod.) ako aj odvádzaním tepla (vedením) k susedným chladnejším oblastiam.

Koncepcia ochrany pred účinkami elektromagnetických polí

Ochrana pred účinkami EM polí, zavedená v krajinách západnej a strednej Európy, bola vytvorená Medzinárodnou komisiou pre ochranu pred neionizujúcim žiarením (ICNIRP), ktorá je partnerom WHO v medzinárodnom projekte venovanom vplyvu EM polí na človeka.

Koncepcia ICNIRP je založená na hodnotení a obmedzení netepelných a tepelných účinkov EM polí na ľudský organizmus, tzn. hodnotení obmedzenia indukovanej prúdovej hustoty v tele a tepelného ohrevu tkanív pri expozícií EM poľu. Tieto obmedzenia sa týkajú veličín – **indukovanej prúdovej hustoty J , merného absorbovaného výkonu SAR a hustoty výkonu (žiarivého toku) S** v podobe **limitných** hodnôt (základných limitov).

Z týchto veličín a ich limitných hodnôt sa odvodili merateľné veličiny expozície a ich **akčné** hodnoty (referenčné úrovne). Merateľné veličiny ako **intenzita elektrického poľa E , magnetická indukcia B** alebo **intenzita magnetického poľa H** opisujú vonkajšie EM polia, sú udávané v efektívnych hodnotách a platia pre pole neporušené prítomnosťou osôb v posudzovanom mieste.

Význam akčných hodnôt veličín expozície

Akčné hodnoty priamo merateľných veličín boli stanovené z limitných hodnôt veličín expozície pri zohľadnení vysokého koeficientu bezpečnosti. Akčné hodnoty pre polia s frekvenciou:

- do 1 Hz platia pre **intenzitu magnetického poľa H a magnetickú indukciu B** ,
- nad 1 Hz do 10 MHz platia pre **intenzitu elektrického poľa E , magnetickú indukciu B** (intenzitu magnetického poľa H),
- nad 10 MHz do 300 GHz platia pre **intenzitu elektrického poľa E , magnetickú indukciu B** (intenzitu magnetického poľa H) a **hustotu toku výkonu ekvivalentnej rovinatej vlny S_{eq}** .

Ak je ľudský organizmus vystavený EM poliam nad 100 kHz, k nárastu teploty tkanív nedochádza okamžite z dôvodu termoregulačných mechanizmov a odvádzaním tepla do susedných chladnejších oblastí. K nárastu teploty tkanív dochádza až po určitom čase, ktorý závisí od frekvencie EM polí. Tento čas bol experimentálne určený a sa nazýva **časom priemerovania (stredovania) T_{st}** .

V závislosti na frekvencii EM polí sa časové priemery veličín expozície E_{st} , B_{st} a $S_{eq,st}$ stanovujú takto:

- pre polia s frekvenciou do 1 kHz sa časové stredovanie neuplatňuje, resp. nie je prípustné.
- pre polia s frekvenciou v intervale od 1 kHz do 100 kHz podľa vzťahov

$$E_{st} = \frac{1}{T_{st}} \int_t^{t+T} E_{ef}(t) dt \quad B_{st} = \frac{1}{T_{st}} \int_t^{t+T} B_{ef}(t) dt$$

kde T_{st} je čas stredovania **1 sekunda**.

- pre polia s frekvenciou v intervale od 100 kHz do 10 GHz podľa vzťahov

$$E_{st} = \sqrt{\frac{1}{T_{st}} \int_t^{t+T} E_{ef}^2(t) dt} \quad B_{st} = \sqrt{\frac{1}{T_{st}} \int_t^{t+T} B_{ef}^2(t) dt} \quad S_{eq,st} = \sqrt{\frac{1}{T_{st}} \int_t^{t+T} S_{eq,ef}^2(t) dt}$$

kde T_{st} je čas stredovania **6 minút**.

- pre polia s frekvenciou v intervale od 10 GHz do 300 GHz podľa horeuvedených vzťahov, pričom čas stredovania $T_{st} = 68/f^{1,05}$, kde f je frekvencia v GHz a čas stredovania T_{st} v minútach.

Záver

Súčasná právna ochrana zdravia obyvateľstva v životnom prostredí [3] a zamestnancov pri práci [4] pred účinkami EM polí vychádza z doterajších poznatkov o vplyve týchto polí (žiarenia) na ľudský organizmus. WHO na základe preukázateľných nových poznatkov o negatívnych účinkoch EM polí priebežne informuje kompetentné štátne orgány a formou odporúčaní upresňuje limitné prípadne akčné hodnoty veličín expozície.

Použitá literatúra

- [1] König, H.-Erlander, P.: Elektromagnetické polia kolem nás. Nakladatel'stvo HEL Ostrava 2001
- [2] Cocherová, E.-Štofánik, V.: Numerické metódy riešenia bioelektromagnetických polí. STU Bratislava 2010
- [3] Vyhláška MZ SR č. 534/2007 Z.z. o podrobnostiach o požiadavkách na zdroje elektromagnetického žiarenia a limity expozície obyvateľov elektromagnetickému žiareniu v životnom prostredí
- [4] Nariadenie vlády SR č. 329 2006 Z.z. o minimálnych zdravotných a bezpečnostných požiadavkách na ochranu zamestnancov pred rizikami súvisiacimi s expozíciou elektromagnetickému poľu v znení nariadenia vlády SR č. 217/2008 Z.z.

Adresa autorov:

Richard Drahoš: D2R engineering, s.r.o., Na letisko 42, 058 01 Poprad, Slovensko,
e-mail: richard.drahos@d2r.sk

Roman Drahoš: D2R engineering, s.r.o., Na letisko 42, 058 01 Poprad, Slovensko,
e-mail: roman.drahos@d2r.sk