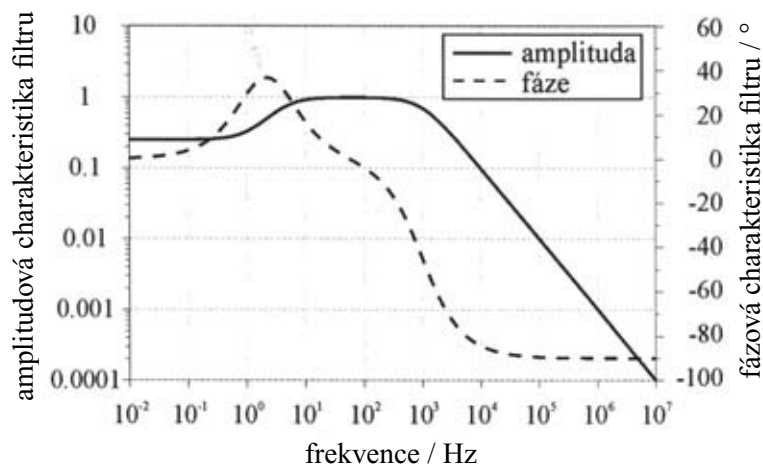


## Příloha č. 1

Při hodnocení expozice nízkofrekvenčnímu elektromagnetickému poli (0 Hz – 10 MHz) je určující veličinou modifikovaná proudová hustota  $J_{\text{mod}}$  indukovaná v tělesné tkáni. Jak je uvedeno v nařízení vlády, je modifikovaná proudová hustota určena indukovanou proudovou hustotou  $J$ , která projde filtrem s frekvenční odezvou

$$H(\omega) = \frac{\beta + j\omega}{4\beta + j\omega} \cdot \frac{\alpha}{\alpha + j\omega}, \quad (1)$$

kde  $\omega = 2\pi f$ ,  $\alpha = 2000\pi \text{ s}^{-1}$ ,  $\beta = 7 \text{ s}^{-1}$ . Frekvenční charakteristika filtru (1) je znázorněna na obr. 1.



Obr. 1 Frekvenční charakteristika filtru určujícího modifikovanou proudovou hustotu

### 1. Určení proudové hustoty

Pro určení modifikované proudové hustoty je nejprve třeba určit vlastní proudovou hustotu. Proudovou hustotu indukovanou v tělesné tkáni není možné přímo měřit a její hodnotu je třeba určit výpočtem. V případě expozice magnetickému poli s magnetickou indukcí  $B$  je možné proudovou hustotu vždy vyjádřit ve tvaru

$$J_B = \sigma K_B \frac{dB}{dt}, \quad (2)$$

kde  $\sigma \approx 0,2 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$  je průměrná elektrická vodivost tkáně,  $dB/dt$  je časová změna magnetické indukce a  $K_B$  je koeficient zohledňující pozici v těle, kde indukovanou proudovou hustotu hledáme. Analogicky s (2) lze vyjádřit indukovanou proudovou hustotu  $i$  v případě indukce elektrickým polem. V takovém případě platí

$$J_E = \varepsilon_0 K_E \frac{dE}{dt}, \quad (3)$$

kde  $\varepsilon_0 \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$  je permitivita vakua,  $dE/dt$  je časová změna intenzity elektrického pole a  $K_E$  je koeficient zohledňující pozici v těle, kde indukovanou proudovou hustotu hledáme. Ačkoli jsou jak proudová hustota, tak intenzita elektrického pole a magnetická indukce vektorové veličiny, jsou v rovnicích (2) a (3) vyjádřeny skalárně. Vektorová orientace může být v obecném případě velmi složitá a závisí na konkrétním rozložení elektrického a magnetického pole. Z pohledu vlastního působení proudové hustoty na organismus však není skutečná vektorová orientace proudové hustoty podstatná. Vektorová orientace je pouze důležitá, pokud chceme určit, jakým způsobem se skládají účinky elektrického pole (3) a magnetického pole (2). Vzhledem k tomu, že se v reálné expoziční situaci může exponovaná osoba pohybovat a není možné zachytit všechny možné případy, je při souběžné expozici elektrickému a magnetickému poli nutné oba příspěvky zvlášť porovnat s nejvyšší přípustnou hodnotou a výslednou expozici vyjádřit prostým

součtem obou expozičních, čímž je uvážena hygienicky nejhorší možná situace. Bez ztráty obecnosti tedy lze tedy psát

$$\mathbf{J}_B = \sigma K_B \frac{d\mathbf{B}}{dt} \quad (4)$$

a

$$\mathbf{J}_E = \varepsilon_0 K_E \frac{d\mathbf{E}}{dt}, \quad (5)$$

přičemž pro účely hygienického hodnocení se bez ohledu na orientaci proudu expozice způsobené oběma příspěvky vždy sčítají.

Koeficienty  $K_B$  a  $K_E$  obecně také závisí na rozložení magnetického či elektrického pole, na jeho orientaci a na pozici v těle. I v tomto případě je možné vždy uvažovat hygienicky nejhorší situaci, kdy je tělo vystaveno homogennímu magnetickému poli kolmému k hrudi a homogennímu elektrickému poli ve směru od hlavy k nohám, při které  $K_B = 0.050$  m ( $K_E = 66$ ) v hlavě,  $K_B = 0.12$  m ( $K_E = 100$ ) v krku,  $K_B = 0.13$  m ( $K_E = 70$ ) v hrudi.

## 2. Výpočet modifikované proudové hustoty v případě periodického časového průběhu

Vypočítat modifikovanou proudovou hustotu znamená aplikovat filtr s charakteristikou (1) na známý časový průběh proudové hustoty indukované v tkáni (2), (3). Aplikaci filtru lze obecně provést buď ve spektrální nebo v časové oblasti.

Při aplikaci filtru ve spektrální oblasti je nejprve potřeba rozložit vektor proudové hustoty  $\mathbf{J}(t)$  do Fourierovy řady tvaru

$$\mathbf{J}(t) = \sum_{k=-k_{\max}}^{k_{\max}} \mathbf{c}_k e^{jk\omega_0 t}, \quad (6)$$

kde  $\omega_0 = 2\pi / T$  je základní úhlový kmitočet,  $T$  je perioda,  $k_{\max}$  je pořadové číslo nejvyšší harmonické frekvence (z definice proudové hustoty vždy nižší než 10 MHz) a

$$\mathbf{c}_k = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{J}(t) e^{-jk\omega_0 t} dt \quad (7)$$

jsou jednotlivé koeficienty Fourierova rozkladu. Aplikace filtru (1) ve spektrální oblasti je pak přímočará a pro modifikovanou proudovou hustotu  $\mathbf{J}_{\text{mod}}(t)$  platí

$$\mathbf{J}_{\text{mod}}(t) = \sum_{k=-k_{\max}}^{k_{\max}} \mathbf{c}_k H(k\omega_0) e^{jk\omega_0 t}. \quad (8)$$

Úpravou vztahů (7) a (8) lze modifikovanou proudovou hustotu získat i přímo v časové oblasti ve tvaru

$$\mathbf{J}_{\text{mod}}(t) = \int_0^T \mathbf{J}(\tau) g(t-\tau) d\tau, \quad (9)$$

kde

$$g(t) = \frac{1}{T} \sum_{k=-k_{\max}}^{k_{\max}} H(k\omega_0) e^{jk\omega_0 t}. \quad (10)$$

Bez ohledu na způsob výpočtu modifikované proudové hustoty však platí, že nejvyšší přípustná hodnota není překročena, pokud je v každém časovém okamžiku  $|\mathbf{J}_{\text{mod}}(t)| \leq 0,01 \cdot \sqrt{2} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$  pro zaměstnance ( $|\mathbf{J}_{\text{mod}}(t)| \leq 0,002 \cdot \sqrt{2} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$  pro ostatní osoby), tedy pokud vektor  $\mathbf{J}_{\text{mod}}(t)$  leží uvnitř koule se středem v patě vektoru a poloměrem  $0,0141 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$  pro zaměstnance ( $0,00283 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$  pro ostatní osoby).

### 3. Výpočet modifikované proudové hustoty v případě neperiodického časového průběhu

V případě neperiodického časového průběhu můžeme použít zcela analogický postup jako u periodického průběhu, pouze Fourierovu řadu nahradíme Fourierovým integrálem. Pokud je tedy modifikovaná proudová hustota počítána ve spektrální oblasti, je nejprve nutné vyjádřit proudovou hustotu ve spektrální oblasti jako

$$\mathbf{J}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{S}(\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (11)$$

kde

$$\mathbf{S}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{J}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (12)$$

je frekvenční spektrum proudové hustoty. Nekonečné integrační meze jsou zde pouze formální, jelikož předpokládáme, že maximální frekvence proudové hustoty nepřesáhne 10 MHz. Zcela analogicky vztahu (8) pak získáme modifikovanou proudovou hustotu jako

$$\mathbf{J}_{\text{mod}}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{S}(\omega) H(\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (13)$$

Obdobně jako v případě periodických časových průběhů i zde je možné vypočítat modifikovanou proudovou hustotu přímo v časové oblasti podle vztahu

$$\mathbf{J}_{\text{mod}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{J}(\tau) h(t - \tau) d\tau, \quad (14)$$

kde

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) e^{j\omega t} d\omega = \alpha \frac{(\beta - \alpha) e^{-\alpha t} + 3\beta e^{-4\beta t}}{4\beta - \alpha} U(t) \quad (15)$$

a kde  $U(t)$  značí jednotkový skok.

Stejně jako v kapitole č. 2 je i zde nepřekročení nejvyšší přípustné hodnoty podmíněno tím, že v každém časovém okamžiku platí  $|\mathbf{J}_{\text{mod}}(t)| \leq 0,01 \cdot \sqrt{2} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$  pro zaměstnance ( $|\mathbf{J}_{\text{mod}}(t)| \leq 0,002 \cdot \sqrt{2} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$  pro ostatní osoby).

### 4. Příklady výpočtu modifikované proudové hustoty

Nízkofrekvenční expozice je v praxi majoritně způsobena magnetickým polem. Dále uvedené příklady se tedy týkají určení modifikované proudové hustoty z časového průběhu magnetické indukce. Při hodnocení expozice pocházející od elektrického pole lze však postupovat zcela analogicky.

Dále jsou uvedeny tři reprezentativní příklady: pole s časově harmonickým průběhem, pole s periodickým nesinusovým průběhem a pole časově neperiodické.

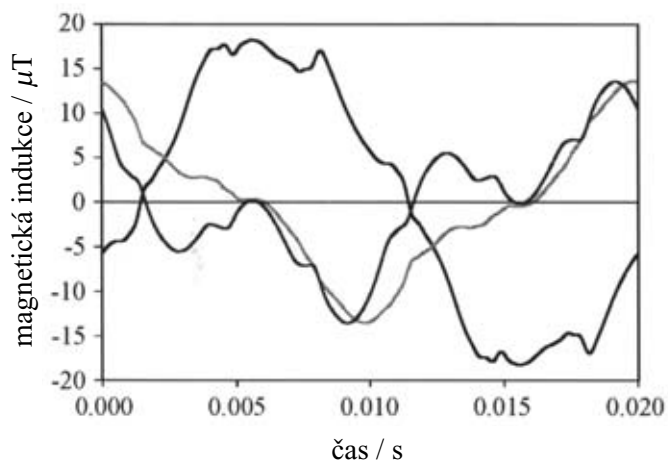
#### a) harmonický („sinusový“) průběh

V případě sinusového signálu je hodnocení expozice velmi jednoduché. Výchozí veličinou je zpravidla efektivní hodnota magnetické indukce  $B_{\text{eff}}$ . Amplituda magnetické indukce je pak  $B_a = \sqrt{2} B_{\text{eff}}$  a její časová derivace, potřebná pro dosazení do vztahu (2), má tvar  $dB_a/dt = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot B_a$ , kde  $f$  je frekvence. Proudová hustota indukovaná tímto magnetickým polem tedy bude  $J_B = 2\sqrt{2} \cdot \sigma \cdot K_B \cdot \pi \cdot f \cdot B_{\text{eff}}$ . Modifikovaná proudová hustota je pak dána součinem mezi proudovou hustotou  $J_B$  a amplitudou filtru z obr. 1 příslušnou dané frekvenci. Bude-li tedy v místě hlavy pracovníka přibližně homogenní magnetické pole s frekvencí 50 Hz a efektivní hodnotou magnetické indukce 500  $\mu\text{T}$  (referenční hodnota pro zaměstnance), dostaneme s použitím koeficientu  $K_B = 0,050 \text{ m}$  a vodivosti tkáň  $\sigma = 0,2 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$  indukovanou proudovou hustotu o amplitudě přibližně

$J = 0,0016 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ . Na frekvenci 50 Hz lze z obr. 1 odečíst, že amplituda filtru je rovna jedné. Modifikovaná proudová hustota je v tomto případě totožná s vlastní proudovou hustotou; expozice dosahuje přibližně 16 % z nejvyšší přípustné hodnoty pro zaměstnance.

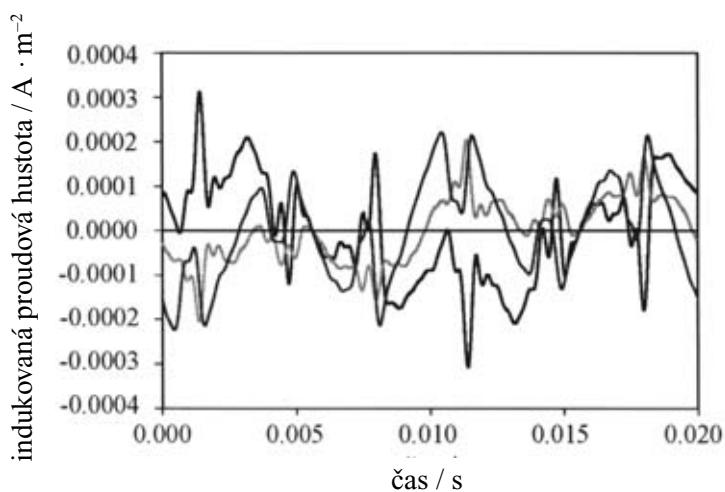
## b) periodický nesinusový průběh

Příklad na nesinusový časový průběh je založen na změřeném časovém průběhu magnetické indukce získaném v blízkosti třífázového vedení tramvajové měřírny. Časový průběh všech tří změřených vektorových složek magnetické indukce je znázorněn na obr. 2.



Obr. 2 Časový průběh vektorových složek magnetické indukce

Při výpočtu indukované proudové hustoty dle (2) je v tomto případě nutné použít pro výpočet časové derivace některý z běžných numerických postupů. Za předpokladu, že magnetická indukce z obr. 2 je homogenní v oblasti hrudníku exponované osoby ( $K_B = 0.13 \text{ m}$ ), a při použití vztahu (2), mají vektorové složky indukované proudové hustoty průběh vyznačený na obr. 3.



Obr. 3 Časový průběh vektorových složek indukované proudové hustoty

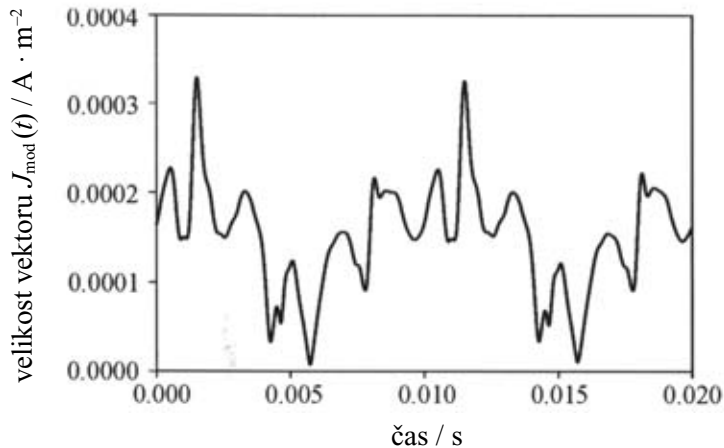
Rozložením vektoru indukované proudové hustoty do Fourierovy řady, dle vztahů (6) a (7), a po aplikaci filtru dle vztahu (8) dostaneme časový průběh vektoru modifikované proudové hustoty. Pro porovnání s nejvyšší přípustnou hodnotou je třeba nejprve určit časový průběh velikosti vektoru modifikované proudové hustoty, dle vztahu

$$|\mathbf{J}_{\text{mod}}(t)| = \sqrt{(J_{\text{mod}}(t))_i^2 + (J_{\text{mod}}(t))_j^2 + (J_{\text{mod}}(t))_k^2}, \quad (16)$$

kde

$$(J_{\text{mod}}(t))_{i,j,k} \quad (17)$$

jsou jednotlivé složky vektoru. Časový průběh  $|\mathbf{J}_{\text{mod}}(t)|$  je zobrazen na obr. 4.

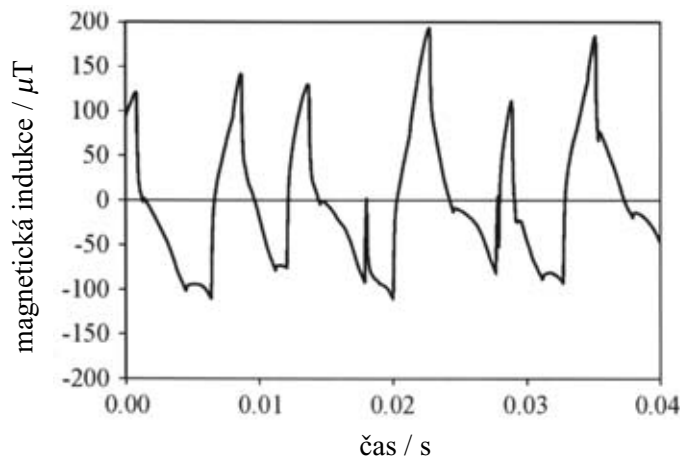


Obr. 4 Časový průběh velikosti vektoru modifikované proudové hustoty

Z obr. 4 odečteme  $\max(|\mathbf{J}_{\text{mod}}(t)|) = 0,00033 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$  a srovnáním s nejvyšší přípustnou hodnotou zjišťujeme expozici rovnou přibližně 2,3 % z nejvyšší přípustné hodnoty pro zaměstnance.

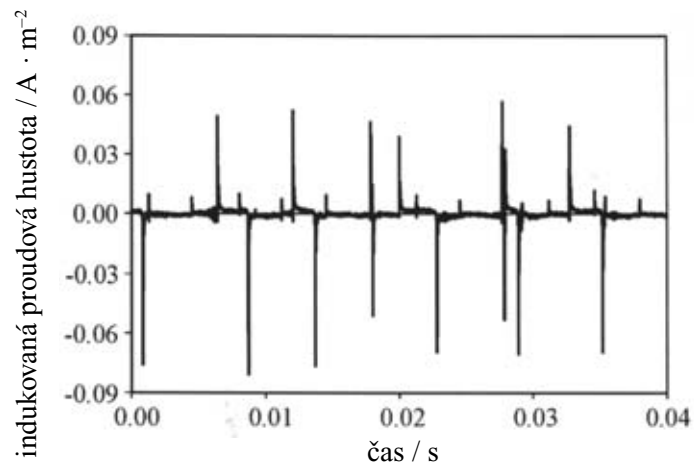
### c) neperiodický průběh

Obrázky č. 5, 6 a 7 ilustrují postup při hodnocení expozice v případě neperiodických průběhů. Magnetická indukce na obr. 5 byla naměřena u svářecího zařízení a zobrazuje relevantní část celého časového průběhu sváření.



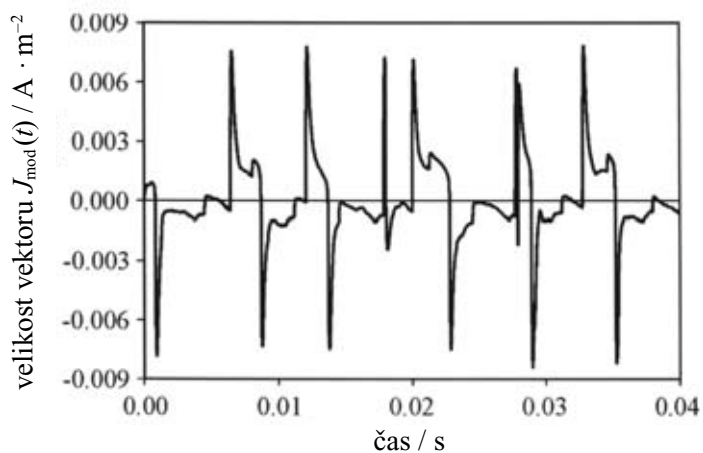
Obr. 5 Časový průběh magnetické indukce

Indukovaná proudová hustota zobrazená na obr. 6 byla vypočtena zcela stejným postupem a za stejných předpokladů jako v případě periodických časových průběhů, viz bod (b).



Obr. 6 Časový průběh indukované proudové hustoty

Na rozdíl od periodických průběhů je v tomto případě pro výpočet modifikované proudové hustoty vhodnější využít rovnice (14), která aplikuje filtr přímo v časové oblasti. Výsledek této operace je graficky znázorněn na obr. 7, ze kterého je patrné, že expozice je určena nízkofrekvenční složkou průběhu a krátké ostré impulzy se při expozici neuplatňují (obr. 7 má 10krát menší hodnoty na vertikální ose). Srovnáním s nejvyšší přípustnou hodnotou zjišťujeme expozici rovnou přibližně 55 % z nejvyšší přípustné hodnoty pro zaměstnance.



Obr. 7 Časový průběh modifikované proudové hustoty