

K VÝBĚRU RADIOLOKAČNÍHO STANOVIŠTĚ Z HYGIENICKÉHO HLEDISKA

Plk. MUDr. Jiří ŠTVERÁK, CSc., pplk. ing. Zdeněk FRANK, CSc.

Ústav leteckého zdravotnictví, Praha

V civilizované společnosti je věnována trvale rostoucí pozornost biologické aktivitě nejrozličnějších fyzikálních faktorů. Zvláštní postavení mezi těmito faktory má neionizující elektromagnetické záření, speciálně záření mikrovlnné (dále jen: záření), zpravidla vymezené kmitočty 300 MHz až 300 GHz. Biologická aktivita záření je závažná zejména u zdrojů, které vyzařují elektromagnetické vlny s velkým výkonem. Typickými představiteli těchto zdrojů jsou radiolokátory.

Hygienická norma platná v ČSLA [1] vychází z předpokladu, že stupeň biologického účinku záření je určen jeho výkonovou hustotou a dobou působení. Vztah mezi nimi může být definován různě. V civilní hygienické normě [2] je stanoveno přípustné ozáření (O) jako součin výkonové hustoty záření (S) a doby jeho působení (t), tedy

$$O = S \cdot t \quad [\mu W \cdot cm^{-2} \cdot h, \mu W \cdot cm^{-2}, h].$$

Pro mikrovlnné pásmo, pulsně pracující zdroje a profesionální pracovníky (podléhající zvláštní lékařské péči) se podle [2] připouští průměrná denní, resp. směnová hodnota ozáření (počítaná z ozáření zjištěného v průběhu jednoho pracovního týdne) $O \leq 80$. To – ve shodě s [1] – představuje osmihodinové ozařování při $S \leq 10 \mu W \cdot cm^{-2}$. Celková hustota energie záření smí tedy během jednoho dne dosáhnout hodnoty $L_{max} = 0,288 W \cdot s \cdot cm^{-2} = 0,288 J \cdot cm^{-2}$.

Chceme-li zabezpečit zdravotně nezávadný pobyt osob v okolí radiolokátoru, nesmí být uvedená hodnota L_{max} překročena. (Pro tu část populace, která není zabezpečena lékařským dozorem, by měla být přípustná hustota energie L'_{max} desetkrát menší; $L_{max} = 10 L'_{max}$. V praxi se však ukazuje, že splnění podmínek tohoto zpřísněného kritéria je velice obtížné.) Docílit to lze několika způsoby:

- omezit dobu pobytu osob v elektromagnetickém poli (např. organizačním opatřením, zákazem pobytu ve volném terénu nebo ve vymezených prostorech apod.),

- vybavit pracovníky ochrannými oděvy, kombinézami a jinými prostředky individuální ochrany proti záření (jejichž užívání je ovšem z různých subjektivních i objektivních důvodů nepopulární),

- stínit pracoviště a místa pobytu osob před zářením (ukládáním stínících kovových sítí pod omítkou budov, stíněním oken, vhodným výběrem střešní krytiny, vhodnou orientací objektů při výstavbě – realizací opatření zahrnovaných pod pojem prostředky kolektivní ochrany),

- vhodně umístit zdroj záření vůči místům pobytu osob (umísťovat radiolokátory vzhledem k těmto

místům „dostatečně daleko“ a „s dostatečným převýšením“).

Podle zkušeností – nejen z ČSSR – se ukazuje, že jedině poslední z uvedených způsobů je dlouhodobě účinný, zcela nezávislý na lidském činiteli (na „ochotě“ nosit ochranné oděvy, na péči o údržbu budov, na zajišťování trvalé platnosti vyhlášených organizačních a provozních opatření atd.). To vyvažuje nevýhodu počátečních vysokých nákladů, spojených s výstavbou ramp pro umístění radiolokátorů.

V další části článku se pokusíme zdůvodnit – z hygienického a ekonomického hlediska – volbu umístění radiolokátoru a analyzovat s tím související úvahy. To se neobejde bez užití několika technických termínů a bez jednoduchých (a proto jen přibližných) výpočtů.

Předpokládáme, že čtenáři je znám obecný princip činnosti klasického aktivního impulsního radiolokátoru. (Termínem klasický rozumíme v zásadě ty vlastnosti a prvky radiolokátoru, které se ustálily od doby 2. světové války. Označení aktivní vyjadřuje, že radiolokátor reaguje na záření vyslané vlastním vysílačem, přijaté po odrazu od cíle; nepracuje tedy s pasivní registrací např. infračerveného záření z motorů proudových letounů. Konečně adjektivum impulsní znamená, že zdroj nevysílá záření kontinuálně, ale v opakujících se pulsech.) Takovýto radiolokátor nevyzařuje izotropně, ale směrově. Díky směrové anténě je většina vyzářené energie koncentrována do svazku, který je možno si v jednoduchých případech představit jako více či méně protáhlé těleso kapkovitého tvaru (kruhového nebo eliptického průřezu). Směru, ve kterém anténa vyzařuje maximálně, říkáme osa svazku. Při zkoumání míst mimo osu svazku (v konstantní vzdálenosti od zdroje, tedy na povrchu koule se středem totožným se zářičem) je výkonová hustota záření vždy nižší než maximální. Závislost výkonové hustoty záření na úhlové poloze od osy svazku vyjadřuje charakteristická funkce záření $F(\varphi, \psi)$ (kde φ, ψ je horizontální, resp. vertikální úhlová souřadnice), jejímž grafickým zobrazením je tzv. „směrový diagram záření“. Lze tedy psát

$$S|_r = \text{konst} \propto F(\varphi, \psi).$$

(Z výkladu je zřejmé, že u pojmů „charakteristická funkce záření“ a „směrový diagram záření“ máme na mysli „výkonové“, nikoliv „intenzitní“ hodnoty. Vztah mezi nimi je ostatně zcela jednoduchý. Přidáme-li příslušným „výkonovým“ resp. „intenzitním“ hodnotám index P, resp. E, platí např.

$$F_P(\varphi, \psi) = F_E^2(\varphi, \psi).$$

Charakteristickou funkci záření je možno stanovit měřením, nebo – v jednoduchých případech – odvo-

dit analyticky (početně). Pro některé úvahy – včetně „hygienických“ – je možná třetí cesta: vyjádřit charakteristickou funkci záření přibližně, vhodnou funkcí aproximující. Z řady vhodných aproximujících funkcí je možno např. užít typ

$$S \propto \cos^4(k\alpha)$$

kde α ... úhlová odchylka od osy svazku,

k ... koeficient ovlivňující „šíři“ svazku.

Základní rovnice pro výpočet výkonové hustoty záření má tvar

$$S = \frac{P \cdot D}{4\pi r^2} F(\varphi, \psi)$$

kde P ... střední vyzářený výkon,

D ... činitel směrovosti (souvisí úzce s charakteristickou funkcí záření; udává, kolikrát je výkonová hustota ve směru maxima – tedy ve směru osy svazku – větší proti případu prostorově izotropní antény, u které zajisté $F(\varphi, \psi) = \text{konst} = 1$),

r ... vzdálenost od zdroje.

(Zdůrazněme, že u parametru P nejde o výkon vyzářený v okamžiku vysílání, o výkon impulsní. Střední výkon P je proti výkonu impulsnímu podstatně menší, u impulsů s jednoduchými časovými průběhy je možný snadný vzájemný přepočít, vycházející z rovnosti energie vyzářené v době např. mezi dvěma začátky pulsu, tedy v době jedné periody opakovacího kmitočtu. Podobně je tomu u výkonové hustoty S . V hygienických normách udávané přípustné hodnoty S se vztahují k „střední“ výkonové hustotě, která je co do stupně biologické účinnosti určující. Tím ovšem není řečeno, že při konstantní hodnotě S je účinek pulsního a kontinuálního záření stejný.)

Ukončeme tuto obšírnou poznámku sdělením, že vyšetřování často udávají pobyt v blízkosti zdrojů záření „o výkonu několika set kilowattů“. Z výše uvedeného je zřejmé, že v takových případech jde o výkon impulsní. Poučený pracovník – v prvním přiblížení – neučiní velkou chybu, „dělí-li“ tato sdělení tisícem, nejjednodušeji vypuštěním předpony kilo-. Výsledkem je přibližný střední vyzářený výkon, který je z hygienického hlediska rozhodující.)

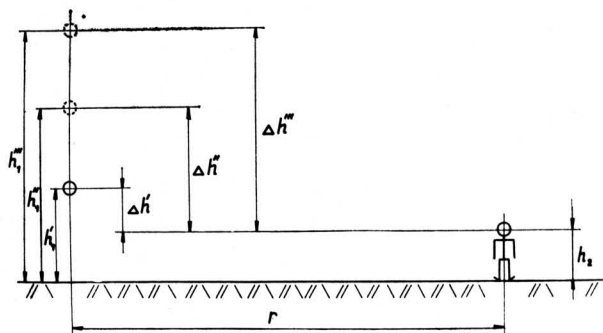
Předpokládejme hypotetický radiolokátor s těmito parametry: $P = 1000 \text{ W}$, $D = 1550 \pm 31,9 \text{ dB}$, osa hlavního laloku vyzářovaného svazku rovnoběžná s vodorovným terénem, $F(\alpha) = \cos^4(k\alpha)$, kde $k \pm 13,106$...

(Pro techničtější zaměřené čtenáře uvedme, že prostorový vyzářovací diagram takového hypotetického radiolokátoru je prost všech parazitních laloků. Pro $\alpha = 0$ je $F(\alpha) = F(0) = 1$. Pro rostoucí α klesá $F(\alpha)$ na $0,5 \cdot F(0)$ při $\alpha = 2^\circ 30'$ a na nulu při $\alpha \pm 8^\circ 52' 01''$; technicky řečeno šíře svazku $\alpha_{0,5} = 5^\circ$, šíře svazku při nulové hodnotě $\alpha_0 \pm 13^\circ 44' 03''$...).

Předpokládejme dále, že anténa je bodová (to platí pro „dosti velké“ r), a že její základní výška nad terénem $h_1' = 3 \text{ m}$. Radiolokátor umístíme postupně na 2,5metrový, resp. 5metrový val, takže výsledná výška antény nad terénem bude $h_1'' = h_1' + 2,5 = 3 + 2,5 = 5,5 \text{ m}$, resp. $h_1''' = h_1' + 5 = 3 +$

$+ 5 = 8 \text{ m}$ (viz obr. 1). Sledujme průběh výkonové hustoty záření v závislosti na vzdálenosti v rovině umístěné ve výši $h_2 = 1,6 \text{ m}$ nad terénem (což je antropometricky stanovená výška hlavy nad terénem u vztyčené osoby). Zavedme převýšení $\Delta h^{(n)} = h_1^{(n)} - h_2$, takže např. $\Delta h' = h_1' - h_2$ atd.; zřejmě $\Delta h' = 1,4 \text{ m}$, $\Delta h'' = 3,9 \text{ m}$, $\Delta h''' = 6,4 \text{ m}$.

Anténu otočnou ve vodorovné rovině (kolem svislé osy) zastavíme, zjišťujeme průběh $S = f(r, \Delta h^{(n)})$ v průsečnici svislé roviny proložené osou svazku s vodorovnou rovinou $h_2 = 1,6 \text{ m}$. Výsledky jsou shrnuty v horní části obr. 2. Z něho je patrné, že hodnoty $S = 10 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ je dosaženo ve vzdálenosti $r \pm 1100 \text{ m}$, ať je $\Delta h^{(n)}$ jakékoliv.



Obr. 1

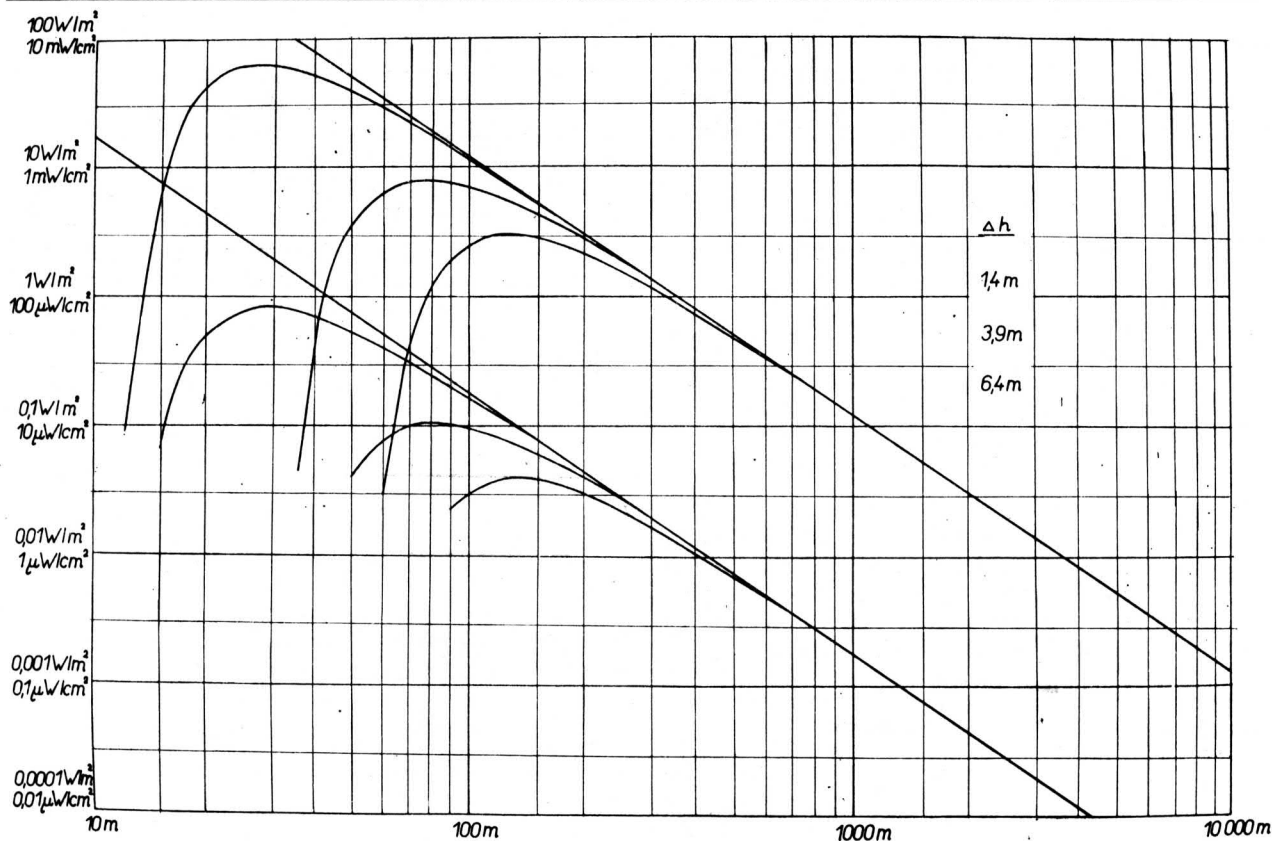
V praxi se ovšem anténa otáčí, takže nikdy (trvale) nedochází k tak hygienicky nepříznivému případu, aby byl pracovník ozařován nejvyšší možnou hodnotou výkonové hustoty vyskytující se v dané vzdálenosti. Tuto okolnost – vyplývající z celokruhového protažení antény (konstantní úhlovou rychlostí) – řeší [1] známým koeficientem „10“: pro pohybující se anténu by bylo možno připustit trvalý (osmihodinový) pobyt „na úrovni $100 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ zastavené antény“. Konkrétně (viz obr. 2): ve vzdálenostech $r \approx 340 \text{ m}$ a větších (na hodnotě $\Delta h^{(n)}$ záleží velmi málo).

Jiný, daleko přesnější způsob hodnocení vychází (ve smyslu stanovení ozáření podle [2]) z energetického rozboru. Při něm nahradíme (hypotetickou) směrovou otáčející se anténu hypotetickou anténou v horizontální rovině izotropní, směrové vlastnosti v rovině svislé nechť zůstanou zachovány.

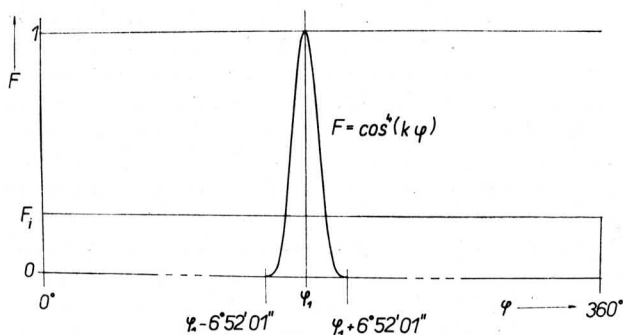
Z požadavku rovnosti energie vyzářené v daném směru kteroukoliv z obou antén v časovém intervalu odpovídajícím době jedné otáčky směrové antény vyplývá (viz obr. 3) požadavek rovnosti plochy omezené křivkou $\cos^4(k\varphi)$ a vodorovnou osou v příslušném intervalu úhlů φ a plochy omezené úsekem F_i a vodorovnou osou v intervalu úhlů $[0^\circ, 360^\circ]$. Druhá z obou ploch představuje protáhlý obdélník, první lze v našem případě stanovit jednoduchým výrazem:

$$A = \int_{-6^\circ 52'..}^{+6^\circ 52'..} \cos^4(13,106... \varphi) d\varphi.$$

Z předpokladu rovnosti obou ploch snadno stanovíme F_i (známe obsah a jednu stranu obdélníku). Zavedeme-li činitel



Obr. 2



Obr. 3

$$\varepsilon = \frac{F_i}{\cos^4(k\varphi)} \Big|_{\varphi=0} = \frac{F_i}{F_{\max}} = \frac{F_i}{1}$$

můžeme jím násobit všechny hodnoty S , zjištěné pro nejnepríznivější případ, tedy pro případ svislé roviny proložené osou svazku (směrové antény). Pokládejme takto stanovenou výkonovou hustotu za „ekvivalentní výkonovou hustotu“ S_e . (Není obtížné zjistit, že v našem příkladu $\varepsilon \approx 0,0143 \dots$, a že je tedy mnohem nižší, než převrácená hodnota koeficientu „10“, doporučeného [1], tj. 0,1.) Příslušné průběhy $S_e(r)$ ($\Delta h^{(n)}$ jako parametr) jsou v dolní části obr. 2. Z něj je okamžitě patrné, že $S_e \leq 10 \mu W \cdot cm^{-2}$ pro $r \geq 130$ m při radiolokátoru umístěném na zemi, rampa o výšce 2,5 m je bezpečná pro celý rozsah vzdáleností, další zvyšování výšky rampy je z hygienického hlediska neúčelné, zbytečně nákladné.

Považujeme za vhodné dodat:

- „levá“ část spodních křivek zahrnuje skutečnost, že se se změnou r mění i vertikální úhel ψ ; teoreticky (neuvažujeme-li parazitní laloky) lze tedy bezprostředně u zdroje záření nalézt místa, kde $S = 0$. V žádném případě nelze odpovídající „spodní“ a „horní“ křivky ztotožnit rovnoběžným posunutím,
- uvedené vývoody platí přesně jen pro jisté „dosti veliké“ hodnoty r (v tzv. „vzdálené“ zóně),
- výrazného poklesu S by bylo možno dosáhnout změnou elevačního úhlu antény (pokud by to neovlivnilo taktické parametry radiolokátoru),
- v celé úvaze byl záměrně pominut vliv odrazů, zejména od terénu,
- lze diskutovat o správnosti úvahy založené na principu „rovnosti energií“. Nepochybně jsou biologické účinky záření při kontinuálním a intermitentním ozařování (např. u otáčející se antény) poněkud jiné, byť by S_e bylo konstantní.

Tyto námitky – jak se domníváme – ovlivňují hygienické závěry vyplývající z předložené úvahy spíše kvantitativně než kvalitativně.

Požadavek umístit radiolokátory velkého výkonu na přiměřeně vysoká stanoviště (zejména v rovinném terénu bez přirozených vyvýšenin a v terénu prostorově omezeném) je tedy nutno pokládat nadále za zdůvodněný a zcela oprávněný.

Souhrn

Autoři na základě dlouholeté zkušenosti teoreticky zdůvodňují a navrhuji vhodné uspořádání radiolokačního stanoviště. Praktická realizace spočívá v umís-

tění radiolokátoru na přirozený nebo uměle vybudovaný násep (val). Reálný vyzařovací diagram antény radiolokátoru je možno nahradit vhodnou jednoduchou aproximující funkcí, pomocí které lze početním rozbořem prokázat, do jaké míry převýšení významně ovlivňuje velikost výkonové hustoty záření v okolí radiolokačního stanoviště a tím i kvalitu hygienických podmínek. Navržený rozbor dovoluě uvažovat i vliv otáčení antény radiolokátoru. Pro zadané podmínky musí výška valu dosáhnout jisté exaktně stanovené

hodnoty, její další zvětšování je z hygienického hlediska neúčelné a ekonomicky nežádoucí.

Literatura

- [1] Sbírka nařizení a směrnic MNO č. 9 z 15. 4. 1968.
- [2] Výnos hlavního hygienika ČSR, čj. HE-344.5-3.2.70, O hygienicky únosných hodnotách ozáření elektromagnetickými vlnami a Jednotná metodika stanovení intenzity pole... Příl. č. 6 k Acta hygienica, epidemiologica et mikrobiologica Institutu hygieny epidemiologie Praha, 1974. 12 s.