

# Význam mezopického vidění pro praxi

prof. Ing. Jiří Habel., DrSc., Ing. Petr Žák, Ph.D.,  
ČVUT Praha, FEL

## Úvod

V běžném životě zrak člověka obvykle pracuje v podmínkách denního (fotopického) vidění. To je spojeno zejména s činností čípků, fotoreceptorů, umožňujících barevné vidění, které jsou umístěny převážně v centrální části sítnice (žlutá skvrna). Názory na spodní mez adaptačního jasu, od které již probíhá proces denního vidění, nejsou dosud mezinárodně sjednoceny [1]. Nejčastěji se uvádí, že podmínky denního vidění jsou splněny při hladinách jasu přibližně od  $3 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ . V současnosti se světelnotechnické výpočty a rovněž fotometrická měření provádějí téměř výhradně pro podmínky denního vidění.

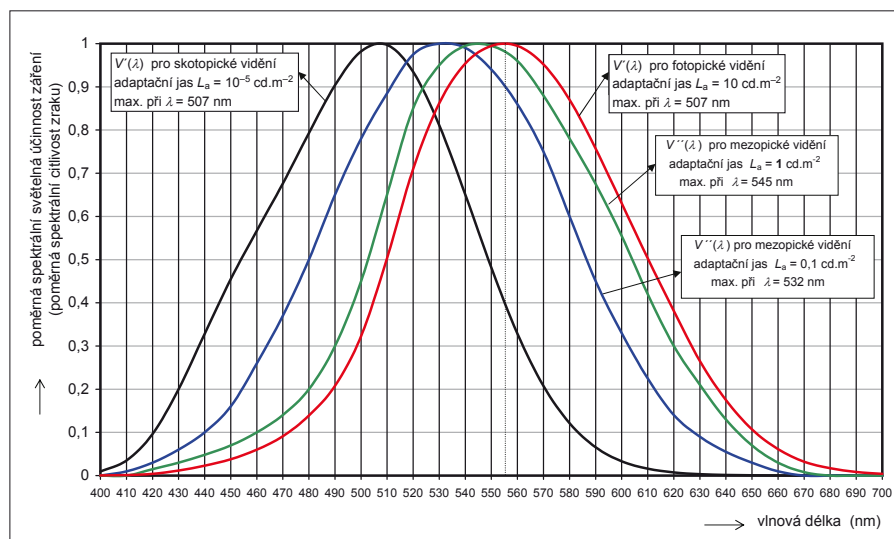
Druhým krajním případem činnosti zraku člověka je noční (skotopické) vidění. To je spojeno převážně s činností výrazně citlivějších fotoreceptorů, tj. tyčinek, které jsou rozmístěny zvláště v okolí žluté skvrny a v dalších krajních oblastech sítnice. Noční vidění je většinou spojováno s velmi nízkými adaptačními jasy; převážně se uvádí, že jde o jasy nižší než asi několik setin, či dokonce jen tisícín  $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$  [1]. Z hlediska hodnocení osvětlovacích soustav v praxi tedy skotopické vidění nemá význam.

Ovšem práce zraku člověka v oblasti mezi denním a nočním viděním, kdy se zrakový orgán musí přizpůsobit jasům, které se nacházejí mezi oběma zmíněnými krajními případy, je v praxi obvyklá. Lze se s ní setkat např. v osvětlovacích soustavách venkovních komunikací nebo v soustavách nouzového osvětlení. Oblast mezi denním a nočním viděním se nazývá oblast mezopického vidění, v níž se v té či oné míře uplatňují oba typy fotoreceptorů.

Citlivost zraku člověka k záření různých vlnových délek závisí na parametrech světelného mikroklimatu vytvořeného v osvětlovaném prostoru, a je tedy určována jasnem, kterému se zrak pozorovatele přizpůsobuje, tzn. adaptačním jasnem. Běžně se světelnotechnické parametry světelných zdrojů, svítidel a osvětlovacích soustav fotometricky ověřují přístroji, jejichž poměrná spektrální citlivost se shoduje s dohodnutým průběhem poměrné spektrální citlivosti tzv. normálního fotometrického pozorovatele v podmínkách denního (fotopického) vidění. Vzniká otázka, do jaké míry se mohou zmíněné parametry zdrojů, svítidel a sou-

stav změnit v případě, že budou měřeny přístroji, jejichž poměrná spektrální citlivost by byla přizpůsobena průběhu poměrné spektrální citlivosti zraku skutečného pozorovatele adaptovaného na urči-

novala Mezinárodní komise pro osvětlování (CIE) tzv. *normálního fotometrického pozorovatele*. Případ fotopického vidění zmíněného pozorovatele charakterizuje křivka poměrné spektrální citlivosti  $V(\lambda)$



Obr. 1. Křivky poměrné spektrální citlivosti zraku k záření různých vlnových délek (resp. průběhy poměrných světelných účinností záření) pro fotopické (adaptační jas  $L_a = 100 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ), mezopické (adaptační jasy  $L_a = 1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ,  $0,1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ) a skotopické (adaptační jas  $L_a = 10^{-5} \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ) vidění

tý, relativně nízký jas, v mezopické oblasti vidění. V současné době zatím neexistuje ani v rámci Mezinárodní komise pro osvětlování CIE jednotný přístup k řešení otázek světelnotechnických výpočtů a měření v oblasti mezopického vidění. V předloženém článku se proto autoři pokusí čtenářům uvedenou problematiku alespoň přiblížit.

## Fotopické, mezopické a skotopické vidění

Vzhledem k individuálnímu charakteru citlivosti lidského zraku a nezbytnosti sjednotit světelnotechnické výpočty defi-

a skotopického vidění křivka  $V(\lambda)$ , které jsou znázorněny na obr. 1.

Pro další výklad problematiky mezopického vidění je důležité připomenout, že pro oblast světelné techniky je v soustavě SI základní jednotkou 1 kandela, která popisuje svítivost zdroje světla. Z této jednotky jsou odvozeny ostatní světelnotechnické veličiny. Podle usnesení 16. generální konference Míry a váhy z roku 1979 je jedna kandela rovna svítivosti zdroje, který vyzařuje v určitém směru monochromatické záření o frekvenci  $540\cdot 10^{12}$  Hz, přičemž zářivost zdroje v tomto směru je  $1/683 \text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}$  (wattů na steradián).

Tab. 1. Porovnání světelných toků různých typů světelných zdrojů při fotopickém, mezopickém a skotopickém vidění

Vidění	Světelný zdroj			
	klasická žárovka 100 W	lineární zářivka 24 W/840	halogenidová výbojka 150 W/830	vysokotlaká sodíková výbojka 150 W
	<b>Světelný tok (lm)</b>			
fotopické	<b>1 380</b>	<b>1 750</b>	<b>14 500</b>	<b>16 700</b>
mezopické ( $L_a = 1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ )	<b>1 390</b>	<b>1 700</b>	<b>14 200</b>	<b>15 420</b>
mezopické ( $L_a = 0,1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ )	<b>1 510</b>	<b>1 660</b>	<b>13 940</b>	<b>13 010</b>
skotopické	<b>2 730</b>	<b>2 440</b>	<b>20 080</b>	<b>10 480</b>

Zmíněný kmitočet ve standardním ovzduší (20°C; 50% vlhkost, tlak 1 013,2472 hPa, index lomu  $N = 1,000279668$ ) odpovídá základní vlnové délce  $\lambda_m = 555,016 \approx 555$  nm.

Konstanta  $683 \text{ cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{W}^{-1}$  představovala v roce 1979 nejlepší odhad maxima  $K_m$  světelné účinnosti pro fotopické vidění, který zachovával předchozí úroveň fotopické kandely a dnes je konstantou, jež spojuje fyzikální fotometrii a optickou radiometrii.

Podstatné je, že při uvedené základní vlnové délce  $\lambda_m = 555$  nm je spektrální citlivost lidského zraku pro fotopické i skotopické vidění shodná a platí:

$$K(555) = K'(555) = 683 \text{ lm/W} \quad (1)$$

Z toho vyplývá, že ve zmíněných stavěch vidění (fotopickém i skotopickém) lze pracovat se světelnými toky udávanými v lumenech. Světelný tok, který odpovídá zářivému toku při základní vlnové délce  $\lambda_m = 555$  nm je pro:

fotopické vidění:  
 $\Phi_v(555) = K(555)\Phi_e(555) = K_m V(555)\Phi_e(555) \quad (\text{lm}) \quad (2)$

skotopické vidění:  
 $\Phi'_v(555) = K'(555)\Phi_e(555) = K'_m V'(555)\Phi_e(555) \quad (\text{lm}) \quad (3)$

přičemž platí  $\Phi_v(555) = \Phi'_v(555)$

Funkce  $V(\lambda)$  a  $V'(\lambda)$  poměrné spektrální citlivosti zraku, definované v normě ISO/CIE [2], doplňují definici kandely z roku 1979 tak, že logicky dotvářejí systém fyzikální fotometrie. Na základě toho jsou definovány spektrální světelné účinnosti záření pro:

fotopické vidění:  
 $K(\lambda) = K_m V(\lambda) = \Phi_v / \Phi_e \quad (\text{lm/W}) \quad (4)$

skotopické vidění:  
 $K'(\lambda) = K'_m V'(\lambda) = \Phi'_v / \Phi_e \quad (\text{lm/W}) \quad (5)$

kde  $K_m$  a  $K'_m$  označují maximální hodnoty spektrálních průběhů veličin  $K(\lambda)$  a  $K'(\lambda)$ , pro které platí:  $K_m = K(555 \text{ nm})$ ,  $K'_m = K'(507 \text{ nm})$ . Z křivek  $V(\lambda)$  a  $V'(\lambda)$  nakreslených na obr. 1 lze pro vlnovou délku 555 nm číst hodnoty poměrné světelné účinnosti záření pro:

fotopické vidění  $V(555) = 1$   
 skotopické vidění  $V'(555) = 0,40176$

Maxima průběhů absolutních hodnot světelných účinností záření je pak možné v souladu se vztahy (1), (4) a (5) stanovit z výrazů pro:

fotopické vidění:  
 $K_m = 683/V(555) = 683/1 = 683 \text{ lm/W} \quad (6)$

skotopické vidění:  
 $K'_m = 683/V'(555) = 683/0,40176 = 1700 \text{ lm/W} \quad (7)$

Uváží-li se, že mezopické vidění představuje v zásadě kombinaci denního a nočního vidění, je logické vycházet i v oblasti mezopického vidění z podmínky, kterou vyjadřuje vztah (1). Pak lze konstatovat, že všechny spektrální průběhy citlivosti zraku zjištěné pro různé adaptační jasy v oblasti fotopického, mezopického i skotopického vidění vykazují při záření základní vlnové délky  $\lambda_m = 555$  nm stejné hodnoty citlivosti. Rovnice (1) se rozšíří i pro hodnoty světelných účinností záření  $K''(555)$  v mezopické oblasti vidění, takže má tvar:

$$K(555) = K'(555) = K''(555) = 683 \text{ lm/W} \quad (8)$$

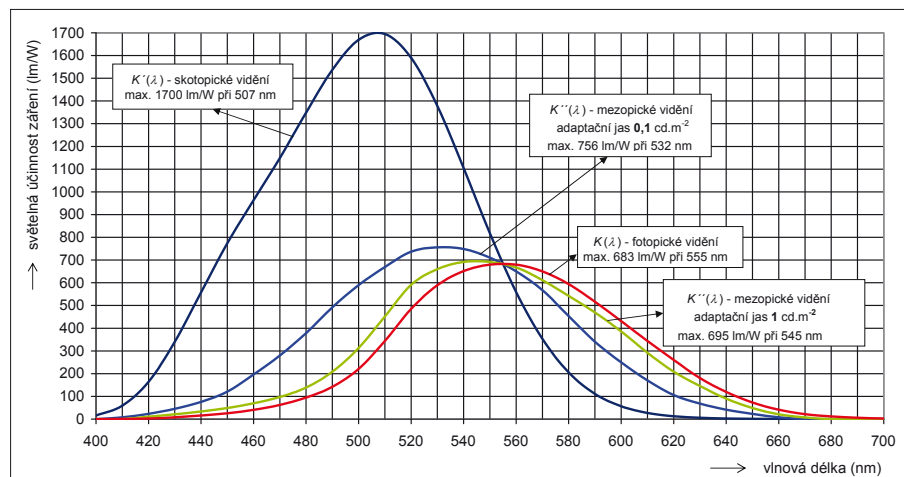
V důsledku toho je možné pracovat se světelnými toky udávanými v lumenech nejen v oblasti denního a nočního vidění, ale také v oblasti mezopického vidění.

### Problematika mezopického vidění

V běžných vnitřních prostorech s umělým osvětlením jsou adaptační jasy většinou vyšší než asi  $10 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ , a proto se průběhy poměrné spektrální citlivosti jen relativně málo liší od křivky  $V(\lambda)$ ; to je dobře patrné z rozložení křivek na obr. 1. Výjimkou je případ nouzového osvětlení, kde jsou adaptační jasy výrazně nižší, např.  $0,1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Co se týče venkovních prostorů s umělým osvětlením, jsou adaptační jasy nižší (např.  $0,1$  až  $1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ) než v běžných interiérech, neboť většinou nejde o prostory obklopené velkými světelně činnými plochami, které by podstatně ovlivňovaly hladiny adaptačního jasu. Proto se často zraková činnost ve venkovních prostorech odehrává v oblasti mezopického vidění. Typickým příkladem je vidění na uměle osvětlené komunikaci, kde mohou adaptační jasy být např. asi  $0,3 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ .

V současné světelnětechnické praxi se počítá výhradně se světelnětechnickými veličinami odpovídajícími podmínkám fotopického vidění. Tato skutečnost



Obr. 2. Průběhy absolutních hodnot světelných účinností záření pro fotopické, mezopické a skotopické vidění

Obdobným postupem jako v případech fotopického a skotopického vidění lze stanovit poměrné spektrální světelné účinnosti  $V''(555)$ , jejich absolutní hodnoty  $K''(\lambda)$  a jim odpovídající maxima  $K''_m$  pro různé adaptační jasy  $L_a$  také v oblasti mezopického vidění. Například pro uvažované adaptační jasy:

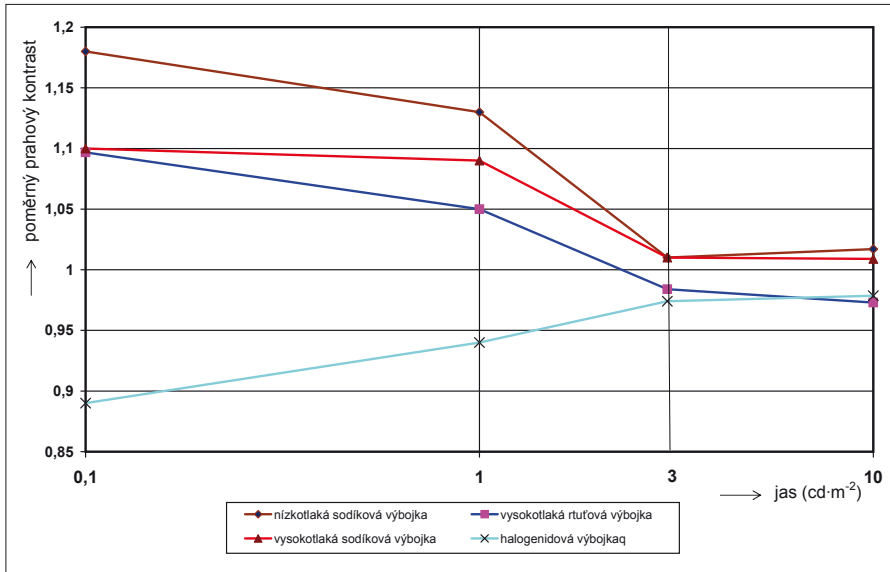
$L_a = 0,1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ :  $K''_m = 683/V(555) = 683/0,9035 = 756 \text{ lm/W}$  ( $\lambda''_m = 532 \text{ nm}$ )  
 $L_a = 1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ :  $K''_m = 683/V(555) = 683/0,9825 = 695 \text{ lm/W}$  ( $\lambda''_m = 545 \text{ nm}$ )

Pro ilustraci jsou spektrální průběhy absolutních hodnot světelných účinností záření (resp. spektrálních citlivostí zraku) pro fotopické i skotopické vidění a pro dva vybrané adaptační jasy ( $0,1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  a  $1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ) z oblasti mezopického vidění znázorněny na obr. 2.

však ve zmíněných případech venkovního a nouzového osvětlení způsobuje jisté odchylky mezi subjektivním vjemem pozorovatele a objektivními hodnotami fotometrických veličin. Velikost odchylek souvisí s adaptačními podmínkami i se spektrálním složením záření použitých světelných zdrojů.

Průběhy spektrální světelné účinnosti zraku pro různé adaptační jasy uvedené na obr. 2 umožňují převod energetických veličin záření na světelnětechnické veličiny. Je zřejmé, že pro různé úrovně adaptačních jasů pozorovatele se světelný tok odpovídající zářivému toku určitého světelného zdroje může významně lišit.

Vliv spektrálního složení záření světelných zdrojů na odchylku mezi subjektivním hodnocením situace pozorovatelem

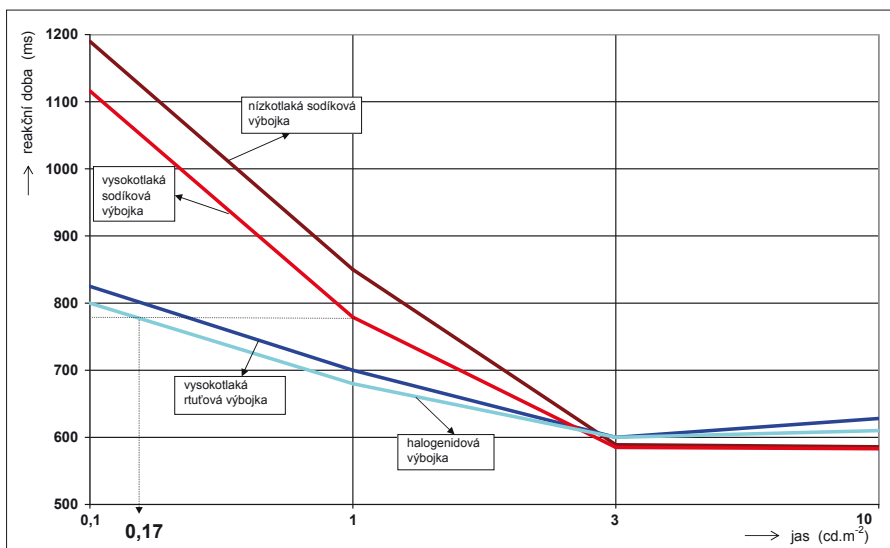


Obr. 3. Závislost poměrného prahového kontrastu na jasu komunikace pro různé typy světelných zdrojů

a výsledky objektivních fotometrických výpočtů či měření lze dokumentovat porovnáním hodnot světelných toků zdrojů pro různé adaptační jasy.

V případě teplotních světelných zdrojů jsou zmíněné odchylky relativně malé. Pro světelné zdroje s čárovým spektrem mohou však být až desetinásobné.

dou v tomto případě vysoké. S poklesem hladin osvětlenosti do mezopické oblasti se citlivost oka na tento typ záření podstatně snižuje a výsledný dojem z osvětlení je výrazně temnější v porovnání s údaji fotopických přístrojů. Ještě větší odchylky se projeví při měření červeného světla, které se využívá např. k signalizaci v lodní



Obr. 4. Závislost reakčního času pozorovatele na jasu komunikace pro různé typy světelných zdrojů

Například pro adaptační jasy nižší než 0,1 cd·m<sup>-2</sup> bude při stejných hodnotách fotopického jasu pozorovatel vnímat modré světlo desetkrát intenzivněji než světlo běžného teplotního zdroje.

Dalším názorným příkladem popsaného jevu jsou nízkotlaké sodíkové výbojky. Jejich zářivý tok je soustředěn v blízkosti vlnové délky 589 nm, tedy do oblastí, ve které je lidské oko při fotopickém vidění velmi citlivé. Proto hodnoty světelných veličin naměřené fotopickými přístroji bu-

a letecké dopravě. Pro ilustraci jsou v tab. 1 vypočítány světelné toky vybraných světelných zdrojů pro různé adaptační jasy zraku pozorovatele.

Složitost problematiky popisu vidění v mezopické oblasti navíc roste tím, že ve zmíněném světelném prostředí nemění jen citlivost zraku člověka k záření různých vlnových délek, ale i další aspekty vidění, např. rozsah zorného pole. Tyto další aspekty výrazně ovlivňují hodnocení zrakových úkolů pozorovatelem, např.

reakční čas řidiče. Na obr. 3 a obr. 4 jsou znázorněny závislosti poměrného prahového kontrastu a reakční doby pozorovatele na jasu komunikace pro různé typy světelných zdrojů s odlišným spektrálním složením. Z obr. 4 je možné zjistit, že pro dosažení stejného reakčního času řidiče je při použití halogenidových výbojek zapotřebí šestkrát nižší jas než při použití vysokotlakých sodíkových výbojek.

### Závěr

Hlavním důvodem chybějícího systému mezopické fotometrie je mimořádná složitost této problematiky. V souladu se standardní definicí světla podle CIE se vyžaduje, aby měřené veličiny byly svázány s procesem vidění. Z pohledu vidění musí být vyšší jas vztažen k účinnějšímu podnětu než jas nižší. V oblasti fotopického vidění je této vazby dosaženo integrací spektrálního průběhu zářivého toku podle funkce  $V(\lambda)$  a v oblasti skotopického vidění podle funkce  $V'(\lambda)$ . Pro popis mezopického vidění však nestačí pouze jedna křivka spektrální světelné účinnosti, ale je zapotřebí celá sada křivek, u kterých se s klesající úrovní osvětlení od fotopického ke skotopickému vidění mění jejich tvar i maximální hodnota (obr. 2) [3], [4], [5].

V současné době se řešení problematiky mezopického vidění věnuje v rámci Mezinárodní komise pro osvětlování divize 1 (TC 1-58). Snahou této komise je nalézt způsob, jak mezopickou fotometrii zavést do světelnotechnické praxe. Paralelně probíhají práce na dalších projektech, které se zabývají touto problematikou. V rámci Evropské unie to byl např., v současné době již ukončený, projekt MOVE.

Popsaná studie je součástí výzkumného záměru MSM 6840770017 Rozvoj, spolehlivost a bezpečnost elektrotechnických systémů.

Recenze: doc. Ing. Jiří Plch, CSc.

### Literatura:

- [1] The IESNA Lighting Handbook. 9th Edition, IESNA, 2000.
- [2] ISO 23539/CIE S010:2005 *Photometry – The CIE system of physical photometry*. 2005.
- [3] WRIGHT, W. D.: *Researches on Normal and Defective Colour Vision*. London, Kimpton, 1946, s. 80–85.
- [4] KINNEY, J. A. S.: *Sensitivity of the eye to the spectral radiation at scotopic and mesopic intensity levels*. J. Opt. Soc. Amer., 1955, č. 45, s. 507–514.
- [5] KINNEY, J. A. S.: *Comparison of scotopic, mesopic and photopic spectral sensitivity curves*. J. Opt. Soc. Amer., 1958, č. 48 s. 185–190.
- [6] PALMER, D. A.: *Mesopic photometry with non-monochromatic lights*. J. Opt. Soc. Amer., 1974, č. 64, s.1386.