

Základy světelné techniky (2)

Zrak a vidění (1. část)

prof. Ing. Jiří Habel, DrSc., Elektrotechnická fakulta ČVUT V Praze

2. Zrak a vidění

Zrak člověku umožňuje získat velké množství informací o prostředí, které ho obklopuje. Nositeli těchto informací jsou světelné a barevné podněty. Vidění je proces zahrnující jak příjem informace, tak její výběr a zpracování, včetně transformace optických podnětů v nervové vzruchy, které se zrakovým nervem vedou k mozkovým centrům vidění, kde vzniká zrakový počitek. Syntézou počitků se ve vědomí člověka vytváří vjem umožňující poznání, identifikaci pozorovaného předmětu či situace a následně určité zařazení získané informace ve vědomí, a to buď k bezprostřednímu využití při určité činnosti, nebo k uchování v paměti k pozdějšímu použití. Vhodné světlo a dobré osvětlení mohou přijímání a zpracovávání zmíněných informací významnou měrou usnadnit. Proto je důležité, aby všichni, kteří osvětlovací soustavy navrhují, realizují, ale také provozují a udržují, byli alespoň do určité míry seznámeni se základy procesu vidění.

2.1 Zrakový systém

Zrakový systém je soubor orgánů, které zajišťují příjem, přenos a zpracování informace přinášené světelným podnětem v komplex nervových podráždění, jejichž výsledkem je zrakový vjem. Zrakový systém člověka se skládá zhruba ze tří částí: periferní (oči člověka), spojovací (zrakové nervy) a centrální (podkorové a korové části mozku).

Oko je smyslový orgán, který zprostředkovává příjem informace o vnějším prostředí přenášené světlem a v němž se tato informace upravuje v nervová podráždění a do značné míry i zpracovává. Obě oči člověka jsou symetricky uloženy v lebce v tzv. očníchích.

Tvar oka je přibližně kulový, uzpůsobený pro snadné a rychlé otáčení v očníci. Oční bulva dospělého člověka má průměr asi 24 mm. Stěnu oka v jeho zadní části (obr. 2.1) tvoří tři vrstvy, a to bělima, cévnatka a sítnice. Bělima je neprůhledná, opálově bílá tkáň. Cévnatka je tvořena spleť krevních cév a vlasečnic. Od sítnice je cévnatka oddělena tenkou elasticou blánou, přes níž cévnatka sítnici vyživuje.

V přední části oka přechází bělima v průhledný pevný obal zvaný rohovka, kdežto cévnatka přechází jednak v tzv.

řasnaté tělísko, na němž je zavěšena oční čočka, a jednak v duhovku. Mezi rohovkou a duhovkou je prostor (přední komora) vyplněný vnitrooční tekutinou. Duhovka tvoří jakousi „mechanickou“ optickou clonu oka. Uprostřed duhovky je přibližně kruhový otvor – zornice, kudy vstupuje do oka světlo. Průměr zorničky se mění v závislosti na smrštění či uvolnění hladkých svalů duhovky, a tím se upra-

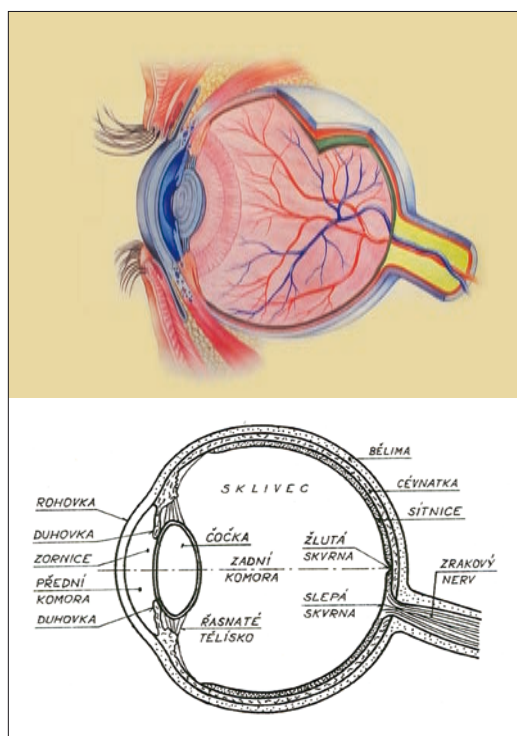
do sítnice, nejsou žádné nervové buňky, tedy ani fotoreceptory, a toto místo se proto nazývá slepá skvrna. Uprostřed sítnice je jasně hnědá, cév prostá oblast, tzv. žlutá skvrna, jejíž střední prohloubenou část o průměru asi 1,5 mm tvoří centrální jamka (fovea).

Zjednodušeně lze říci, že oko má dva systémy, a to systém optický a nervový. Optická část zahrnuje rohovku, přední komoru, duhovku se zorničkou, čočku a sklivce a umožňuje v sítnici vytvářet převrácený, zmenšený a neskutecný obraz vnějšího světa.

K nervovému systému oka kromě nervového zásobení náleží zejména sítnice, což je průsvitná, poměrně tenká (asi 0,2 mm) blána s velmi složitou, ale pravidelnou buněčnou skladbou. Sítnice je členěna do jedenácti vrstev, v nichž je vedle fotoreceptorů rozmístěno mnoho dalších nervových buněk, včetně buněk gangliových. Systém nervových buněk sítnice je velmi komplikovaně provázán, díky čemuž může již v sítnici proběhnout první důmyslné zpracování a třídění informací, zachycených fotoreceptory v podobě časových a prostorových, jasových i barevných rozdílů a změn a vybrané užitečné informace mohou být zakódovány do podoby schopné přenosu prostřednictvím vláken zrakového nervu do vyšších úrovní zrakového systému a do mozkových center.

Z fotoreceptorů jsou běžně známy čípky, které se uplatňují převážně při denním (fotopickém) vidění, a tyčinky, které se uplatňují převážně při nočním (skotopickém) vidění. V sítnici je asi 6,5 milionu čípků soustředěných více ke středu sítnice a asi 125 milionů tyčinek hustěji umístěných při kraji sítnice. Centrální jamka, která je místem přímého vidění s největší rozlišovací schopností (oko zde dokáže rozlišit podrobnosti řádu tisíce milimetrů), obsahuje z fotoreceptorů pouze čípky (asi 800 000). Průměr čípků je asi 0,005 až 0,006 mm a tyčinek přibližně 0,002 mm.

Výsledky množství výzkumů [2.5], [2.6], [2.7] potvrzují, že kromě zmíněných čípků a tyčinek je v sítnici ještě třetí druh fotoreceptorů – obvykle označovaných



Obr. 2.1. Schematický vodorovný řez pravou oční bulvou dospělého člověka

vuje hodnota světelného toku vstupujícího do oka. Za zornici se nachází čočka, což je průzračné dvojvypuklé tělísko polotuhé pružné konzistence, obalené pružným pouzdem. V průběhu života člověka se čočka zvětšuje a její hmotnost narůstá (mezi 10. a 20. rokem života je hmotnost čočky asi 150 mg, mezi 30. a 40. rokem asi 180 mg, a po 70. roce dokonce až 240 mg).

Vnitřní prostor (zadní komoru) oka vyplňuje bezbuněčná, čirá, průhledná, bezbarvá rosolovitá a pružná hmota – sklivce. V zadní části oka asi 18° od zadního pólu směrem k nosu vystupuje z oka zrakový nerv, spojující sítnici oka s vyššími zrakovými nervovými centry v mozku. V místě, kde vstupuje zrakový nerv

písmenem „C“. Jde o tzv. cirkadiánní či dila, která člověku zajišťují řízení mnoha biologických pochodů pravidelně kolísajících přibližně ve dvacetičtyřhodinovém (cirkadiánním) cyklu. Zmíněný cyklus se vyvinul na základě pravidelného střídání světla a tmy v závislosti na otáčení Země okolo Slunce. Vyznačuje se aktivní fází ve dne a klidovou fází v noci. Řídí se jím většina biorytmů, např. tělesná teplota, krevní tlak, tepová frekvence, látkový metabolismus, ladění organismu k práci či k odpočinku, ovlivňuje i imunitní, sexuální a další funkce.

Spojení mezi nervovými buňkami zrakového systému jsou na různých úrovních velmi složitá, různorodá a vykazují i četné zpětné vazby, a to i mezi centrální částí a nervovými buňkami sítnice. Do oblasti zrakové části mozkové kůry přicházejí také nervová vlákna i z podkoryových center jiných senzorů a jiných mimozrakových oblastí kůry. Existují rovněž komplikovaná spojení mezi oběma hemisférami mozku. Takováto vzájemná složitá propojení a vazby v centrální nervové soustavě jen potvrzují skutečnost, že osvětlení ovlivňuje nejen samotné zrakové vnímání, ale také množství dalších fyziologických a biologických funkcí a projevů organismu člověka a jeho celkový psychický stav, což ve svých důsledcích podmiňuje úroveň a kvalitu pracovního výkonu člověka.

Podrobné výzkumy procesu zpracování a přenosu zrakové informace spojené s detailní analýzou informací, jež jsou přenášeny jednotlivými nervovými vlákny ve formě frekvenčně modulovaných impulzů, prokázaly, že základní funkční jednotkou sítnice není jeden fotoreceptor, ale tzv. *vjemové pole*. Vjemové pole je část plochy sítnice přibližně kruhového tvaru, z níž lze podráždit jedno vlákno zrakového nervu, tj. jednu gangliovou buňku sítnice. Velikost vjemových polí se mění v závislosti jak na jas světelného podnětu, tak i na stavu adaptace sítnice. Vjemová pole jsou funkční jednotky, které se mohou částečně i překrývat. V sítnici člověka existuje mnoho typů vjemových polí. U některých reaguje více střed pole na začátek podnětu a jeho okraje na konec podnětu. U jiných polí je reakce opačná. Další pole vykazují oba typy reakcí.

Gangliové buňky buď reagují po celou dobu trvání podnětu a zprostředkovávají informaci o kontrastech jasů či barev a o drobných detailech (což je důležité z hlediska rozlišovací schopnosti), nebo jde o přechodné, krátké reakce na změny osvětlení, tedy o zprostředkování informace o časových změnách světelného podnětu (což je důležité z hlediska procesu adaptace).

Vjemová pole se liší i podle umístění v sítnici. V okrajové části sítnice je s jed-

nou gangliovou buňkou spojeno až několik tisíc receptorů. V oblasti centrální jamky, kde jsou čípky hustě nahromaděny, bývá jeden receptor (čípek) spojen s jednou gangliovou buňkou, což jistě podmiňuje rozlišovací schopnost zraku, která je v této části největší. Ale i v této oblasti vedou nervová vlákna informaci do značné míry zpracovanou, zahrnující údaje o jasových rozdílech, barvách předmětů, jejich pohybech atd.

V sítnici člověka existuje mnoho různých funkčních druhů a typů vjemových polí, jejichž reakce je ovlivňována nejen úrovní osvětlenosti, ale i trváním podnětu, jeho spektrálním složením i prostorovým a časovým rozložením. Mnohonásobné spoje mezi nejrůznějšími nervovými buňkami zahrnují i mnohé zpětné vazby, které rovněž významně ovlivňují výsledné vyhodnocení přijaté informace.

2.2 Akomodace oka

Oko nedovede současně stejně ostře zobrazit na sítnici předměty nacházející se v různých vzdálenostech. Běžné oko hledící do dálky zobrazuje na sítnici ostře předměty umístěné teoreticky nekonečně daleko od oka, v praxi ve vzdálenosti větší než asi 6 m. Paprsky přenášející informaci o takto vzdálených předmětech dopadají do oka rovnoběžně. Paprsky, které přenášejí informaci o předmětech umístěných blíže k oku, vstupují do oka tak, že by ostře zobrazení předmětu zajistily až za sítnicí. Aby se i blízké předměty mohly na sítnici zobrazit ostře, musí se optický systém oka přizpůsobit – akomodovat.

Akomodace je schopnost oka přizpůsobit lomivost optického prostředí oka vidění do blízka změnou zakřivení hlavně přední, ale i zadní stěny čočky, vyvolanou různým stahem ciliárního svalu (řasnatého tělíska). Nejbližší bod, který může plně akomodované oko vidět ostře, se nazývá *blízký bod*. Naproti tomu názvem *vzdálený bod* se označuje nejdále umístěný bod, který dokáže oko přizpůsobené pro vidění do dálky vidět ještě ostře. S přibývajícím věkem se blízký bod oka vzdaluje. V patnácti letech je tento bod vzdálen asi 9 až 10 cm, ve třiceti letech asi 13 cm a v padesáti letech už přibližně 50 cm. Tím je dán rozsah akomodace, který se měří v dioptriích (D) a určuje se z rozdílu převrácených hodnot vzdáleností blízkého a vzdáleného bodu, tj. z výrazu

$$\text{akomodační rozsah} = \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \quad (\text{D; m, m}) \quad (2.1)$$

kde r_1 (r_2) je vzdálenost blízkého (vzdáleného) bodu v metrech.

U patnáctiletého člověka je tedy akomodační rozsah asi 10 D, zatímco u padesátiletého jen 2 D. Krátkozraká starší

osoba však může mít akomodační rozsah také 10 D, ale v rozmezí mezi 10 a 5 cm před okem.

2.3 Adaptační mechanismy

Přizpůsobení oka různým hladinám osvětlenosti se nazývá adaptace. Oko je schopno přizpůsobit se osvětlenostem svislé roviny proložené zornicí v rozmezí asi od 0,25 až do 10^5 lx (avšak je schopno vnímat ještě asi při 2×10^{-9} lx). Takto velkým změnám osvětlenosti se oko přizpůsobuje nejen změnou velikosti zornice, ale i změnou citlivosti fotoreceptorů sítnice a též změnou velikosti vjemových polí sítnice.

Průměr zornice se maximálně mění asi od 1,8 do 7,5 mm a plocha zornice se může měnit přibližně v poměru 1 : 16 až 1 : 20. Změna průměru zornice trvá asi 360 až 380 ms, ale při náhlých změnách podnětu i jen 100 ms. Zvýšení hladiny osvětlenosti vede k zúžení zornice a naopak. Ženy, mladší osoby a lidé se světlou pletí mají zornice relativně širší. S přibývajícím věkem se průměrná velikost zornice zmenšuje.

Hlavním adaptačním mechanismem je však fotochemický děj (rozklad *zrakových pigmentů* ve vnějších segmentech fotoreceptorů působením světla, resp. syntéza pigmentů vlivem tmy). V sítnici jsou čtyři druhy pigmentů. Tři z nich jsou vázány na čípky. Proto existují tři druhy čípků, z nichž každý obsahuje jiný pigment. Čtvrtý pigment, zrakový purpur (rodopsin), je vázán na tyčinky.

Rychlost rozpadu pigmentu závisí jak na parametrech předcházejícího osvětlení, jímž se oko přizpůsobilo, tak na jas a vlnové délce nového světelného podnětu. Například rodopsin rychle bledne účinkem žlutozeleného, modrého, zeleného a žlutého světla a naopak nejpomaleji bledne vlivem světla červeného. Proto má-li se dosáhnout rychlejší adaptace na šero při zachování zrakové orientace (kino, divadlo, rtg), používají se červené brýle nebo se místnost osvětlí červeným světlem. Regenerace fotopigmentů čípků ve tmě je podstatně rychlejší (asi 1,5 min) než u rodopsinu (5 min).

Při adaptaci oka z nižšího jasu na vyšší (tzv. adaptace na světlo), např. při přechodu ze tmy do světla, se vlivem rozkladu fotopigmentů zmenšuje citlivost fotoreceptorů. Děj je dokončen asi do jedné minuty a doznívá asi 10 min. Adaptace z vyšší hodnoty jasu na nižší (tzv. adaptace na tmu), např. při přechodu ze světla do tmy, vyžaduje naopak vytvoření zásob fotopigmentů, a proto trvá od několika minut při vysokých hladinách osvětlenosti až i hodinu při nízkých hladinách osvětlenosti.

Mnohem dokonalejším adaptačním mechanismem je zmenšování průměru

vjemových polí sítnice při vysokých hladinách osvětlenosti a naopak jejich zvěšování při nízkých hladinách osvětlenosti. Při dostatečně vysoké hladině osvětlení, tj. např. při denním světle, se z citlivých buněk sítnice uplatňují zejména čípky. Podle trojkomponentní teorie [2.2] existují tři druhy čípků, které se vzájemně liší svou spektrální citlivostí k záření různých vlnových délek (jeden druh je citlivý na záření v modré oblasti spektra, druhý na žlutozelené světlo a třetí na dlouhovlnné červené světlo), a tím je umožněno barevné vidění. Takové vidění se uskutečňuje při jasech vyšších než $10 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ a nazývá se *vidění denní (fotopické)*.

Světlocitlivé buňky sítnice druhé skupiny, tj. tyčinky, jsou asi tisíckrát citlivější než čípky a uplatňují se při hladinách jasu nižších než $0,001 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$. Toto vidění se nazývá *vidění noční (skotopické)*. Tyčinky nejsou citlivé na všechny barvy stejně. Nejcitlivější jsou na modrofialovou barvu, podstatně méně na barvu červenožlutou. Proto se na velkou vzdálenost rozeznává modré světlo mnohem lépe než světlo červené (Purkyňův jev). V rozmezí jasů od $0,001$ do $10 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ se při vidění uplatňují oba druhy citlivých buněk a takové vidění se nazývá *mezopické vidění*. Přejít mezi fotopickým a skotopickým viděním je dalším adaptačním mechanismem oka.

K adaptačním mechanismům patří i důležitá adaptace na barvy, která zajišťuje určitou stálost vnímání barevných tónů i při poměrně velkých změnách spektrálního složení přírodního a určitého umělého světla.

Zrak člověka nepracuje staticky. Naše oči se neustále pohybují a obraz na sítnici se mění, a to s frekvencí asi pět obrázků za sekundu. Dojem o statickosti pozorovaného prostředí vzniká vlivem kompenzačních mechanismů, které ruší informace o změně způsobené pohybem očí, hlavy či těla. Jako časové změny takto člověk vnímá jen skutečně probíhající proměny ve vnějším prostředí.

Zrakový vjem nevzniká ani nezaniká současně s popudem, ale s určitým časovým zpožděním. Rychlost vnímání závisí na jasu předmětů v zorném poli a zvyšuje se s růstem jasu asi do $300 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$. Při jasu $0,15 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ je doba potřebná ke vzniku vjemu asi 1 s, zatímco při jasu $1 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ asi 0,5 s. Tato okolnost je důležitá zvláště pro osvětlení dopravních cest. Rychlost vnímání roste také se zvěšováním kontrastu jasů podrobnosti a pozadí. Trvání zrakového vjemu podstatně ovlivňuje intenzita podráždění a doba trvání světelného popudu.

V centrech nervové soustavy vyvolávají vytyřené, upravené a zpracované informace o světelných popudech dvě kvalitativně

odlišné reakce. První probíhá nezávisle na vědomí člověka jako reflexní reakce celého organismu na určité dávky radiace (vliv na metabolismus, krevní skladbu apod.) a současně jako adaptační a akomodační, popř. motorické přizpůsobení zrakového orgánu světelným vlivům.

Druhý komplex reakcí vyplývá ze zrakového vjemu, uvědomění si situace, a to za spoluúčasti jiných smyslových orgánů v souvislosti s poznatkami z předcházejících dráždění i vzhledem ke zkušenostem zahrnutým v záznamech paměti. Uvědomění si určité vizuální informace o prostředí vyvolává také nervové impulzy v asociálních psychických zónách, které souvisejí s myšlením, cítěním, pozorností, představivostí, vzrušením apod. Všechny tyto vlivy určují konečný postoj a reakci člověka na vizuální vjem. Funkce paměťových a pozornostních mechanismů je proto nezanedbatelnou součástí a podmínkou činnosti zraku a tyto mechanismy patří k významným fyziologickým adaptačním mechanismům. Přitom bylo prokázáno, že mechanismy pozornosti jsou rozmístěny na všech úrovních zrakového systému, včetně sítnice.

(pokračování v příštím čísle)

Recenze doc. Ing. Josef Linda, CSc.






INDUSTRY EXPO

3. VELTRH NOVÝCH PRIEMYSELNÝCH TECHNOLOGIÍ, MATERIÁLOV A ZARIADENÍ
3rd FAIR OF NEW INDUSTRIAL TECHNOLOGIES, MATERIALS AND EQUIPMENT

ELEKTRO EXPO

1. VELTRH ELEKTROTECHNIKY, ELEKTRONIKY A ENERGETIKY
1st FAIR OF ELECTRICAL ENGINEERING, ELECTRONICS AND POWER ENGINEERING

17. - 19. 2. 2009

INCHEBA, a.s., Viedenská cesta 3-7, 851 01 Bratislava, Slovak Republic
T +421-2-6727 3293 • F +421-2-6727 2201 • E arehakova@incheba.sk
www.incheba.sk



INCHEBA
EXPO BRATISLAVA

