

Základy lidského vidění, oko, jeho anatomická struktura a problematika zrakového systému

1.1 Úvod

Světelné záření a jeho působení na okolní prostředí vyvolává v člověku jak přímé fyziologické, tak nepřímé psychologické reakce, které jsou ovlivňovány jak množstvím světelné energie, tak časovým a prostorovým rozdělením této energie a v neposlední řadě druhem světla a jeho barvou.

Prostřednictvím zraku získává člověk asi 80–90 % všech informací o prostředí, které ho obklopuje.

Lidským senzorem pro přijímání informací je nejen oko, ale i proces přenosu do mozku při zpracovávání informací přijatých v podobě světelného podnětu. Vidění není pouze vnímání určité části elektromagnetického záření, ale je to i možnost identifikace pozorovaného předmětu a jeho zařídění do vědomí, a to buď bezprostředně při určité činnosti, nebo k uchování v paměti pro pozdější aplikace.

Zrak je pro člověka zařízením pro příjem a zpracování informací o vnějším prostředí. Nositelem těchto podnětů je světlo – světelný podnět. Světlo a osvětlení jsou prostředky umožňující přijetí zmíněných informací a mohou v některých případech příjem informací buď usnadnit, nebo ztížit.

1.2 Zrakový systém člověka

Zrakový systém člověka je tvořen souborem orgánů, které zajišťují *příjem, přenos* a *zpracování* informací přenášených světelným podnětem včetně jejich transformací do komplexu nervových podráždění, jejichž výsledkem je zrakový vjem.

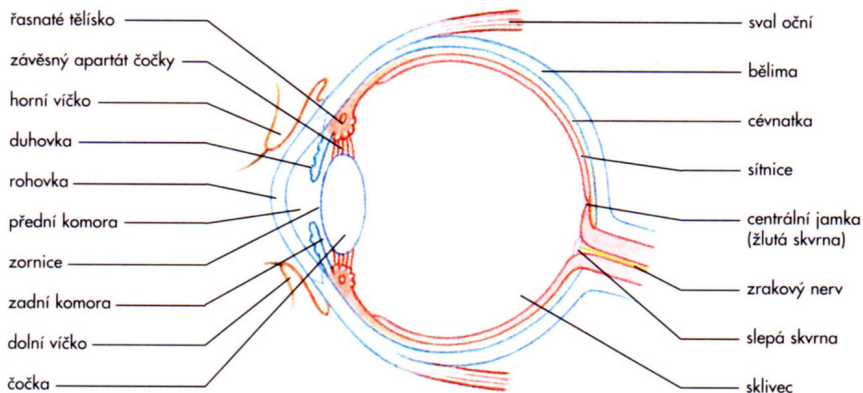
Zrakový systém člověka se v zásadě skládá ze tří částí:

- periferní část – oči
- spojovací část – zrakové nervy
- centrální část – podkorová jádra mozku a korové zrakové centrum

Oko je smyslový orgán zajišťující příjem informací o vnějším prostředí, které jsou přenášeny světlem. V oku se tyto informace primárně zpracovávají, upravují do nervových podráždění a těmito nervovými cestami se přenášejí do centrální mozkové části, kde dochází k finálnímu zpracování a uložení některých podnětů do paměti.

Oko má přibližně tvar koule s průměrem cca 24 mm a je uloženo v lebce člověka v tzv. očníci, v níž má možnost otáčení kolem své osy o cca $\pm 30^\circ$.

Oko se principiálně skládá z optického aparátu, který zobrazuje na jeho sítnici převrácený a patřičně nedokonalý obraz vnějšího světa. V očnících obou očí se nacházejí tři páry *vnějších očních svalů*, dále závěsný aparát, krevní a nervové zásobení očí (obr. 1).



Obr. 1: Řez lidským okem

Stěna oka v zadní části je tvořena třemi vrstvami:

- bělima – neprůhledná bílá tkáň,
- cévnatka – složitá soustava cév a vlasečnic vyživujících sítnici,
- sítnice, která je tenkou (asi 0,2 mm) průsvitnou blánou skládající se z deseti vrstev epitelů s fotoreceptory, má složitou, ale velice pravidelnou strukturu a tato blána zpracovává obrazové informace, které na ni dopadají z optického aparátu oka. Uprostřed sítnice je tzv. centrální jamka, což je místo s nejvyšším počtem fotoreceptorů.

V zadní části oka cca 18° od jeho vodorovné osy vystupuje zrakový nerv spojující sítnici s nervovými centry mozku.

V místě vstupu nervu do sítnice je tzv. slepá skvrna, která neobsahuje žádné fotoreceptory, a naopak tzv. žlutá skvrna, která je situovaná uprostřed sítnice a její střední prohloubená část o průměru asi 1,5 mm tvoří výše zmíněnou centrální jamku s nejvyšší rozlišovací schopností.

Základní *fotoreceptory* lidské sítnice jsou *tyčinky a čípky*. Rozložení a hustota čípků a tyčinek je různá podle toho, o kterou část sítnice jde. V centrální jamce jsou situovány pouze čípky, ve vzdálenějších periferiích sítnice jsou zastoupeny jak čípky, tak tyčinky. Čípky reagují na světelné podněty vyšší úrovně (jasy vyšší než cca 10 cd/m²) a svojí diferentní spektrální citlivostí na různé vlnové délky světla umožňují barevné vidění (tzv. fotopické). Tyčinky, druhá skupina světlocitlivých buněk, jsou cca 1000× citlivější než čípky a jejich nejvyšší citlivost je na modrou a následně na červenožlutou barvu. Vidění při nízkých úrovních světla se nazývá skotopické.

Celkem lidská sítnice obsahuje cca 6,5 milionů čípků a cca 125 milionů tyčinek. V centrální jamce v kořenu očního nervu je umístěno asi 800 000 čípků. Všechny fotoreceptory v podstatě mění viditelnou světelnou energii na nervová podráždění.

Velice složitá funkce těchto buněk umožňuje reagovat nejen na změnu intenzity osvětlení, ale i na drobné detaily s velkými jasovými kontrasty.

Samozřejmě s diferenciací tyčinek a čípků je diferentní rozlišovací schopnost lidského zraku, která je nejvyšší ve středu sítnice a prudce klesá směrem k jejím okrajovým polím.

V poslední době bylo potvrzeno, že mimo čípků a tyčinek jsou na sítnici ještě další světlocitlivé prvky se spektrální citlivostí koncentrovanou do modré

oblasti viditelného spektra o vlnové délce kolem 465 nm (nazývané čidla cirka-diánní soustavy). Pro člověka je přítomnost modré barvy v dopadajícím spektru přímo závislá na tvorbě hormonu „melatonin“, který se také nazývá hormon spánku. V případě akcentované hodnoty modré vlnové délky ve světle se blokuje tvorba melatoninu, což pro člověka znamená možnost intenzivní akceschopnosti. V létě a v poledne má sluneční světlo významnou složku modré barvy, produkce melatoninu je minimální. Naopak po soumraku je tento hormon vyráběn v hypofýze a člověk přechází do útlumového spánkového režimu. Ale v případě večerního osvětlování světlem s výraznou složkou modré barvy, např. LED s teplotou chromatičnosti vyšší než 3500 K a indexem podání barev CRI (viz str. 55 kap. 4.4) menším než 90, často dochází ke spánkovým poruchám a ke snížení kvality spánku. Potlačená tvorba melatoninu může způsobovat i další zdravotní komplikace, jako jsou kardiovaskulární choroby nebo nádorová bujení. Proto před spánkem není úplně vhodné používat monitor počítače, LED podsvětlené televizory a ostatní zdroje intenzivního modrého záření.

Je možno souhrnně konstatovat, že informace přenášená do mozku pomocí zrakového nervu je výsledkem celkové integrující funkce sítnice. Pomocí tohoto souboru, jehož významnou složkou jsou čípky a tyčinky, se do mozku dostávají informace o jasech, rozdílech jasů, barvách i o změnách těchto veličin v čase, včetně všech parametrů pohybu obrazu.

Nitrooční dutina je vyplněna průhlednou bezbuněčnou rosolovitou tekutinou sklivcem, která umožňuje svojí pružností prostorové změny oční bulvy.

Průhledný přední obal oka po stranách přecházející do krycího epitelu oční spojivky se nazývá *rohovka*.

Oční čočka je průzračné dvojvypuklé tělísko obalené do pružného pouzdra zavěšeného na řasnatém tělísku vytvořeném z cévnatky.

Strukturou oční čočky jsou lamelovité do radiální hvězdice uspořádané dlouhé buňky nazývané vlákna čočky.

Duhovka je podstatě mechanickou optickou clonou oka, situovanou jako překážka světelných paprsků vstupujících do oka. Uprostřed duhovky je *zornička*, jejíž průměr kolísá v závislosti na smrštění a uvolnění svalů duhovky.

1.3 Optika lidského oka

Světlo vstupující do oka prochází diferentními optickými prostředími a dopadá na sítnici, kde je vytvořen nedokonalý obraz snímaného vnějšího prostředí.

Oko je tedy souborem celé řady povrchů a prostředí o různých indexech lomu, kde samozřejmě platí zákony geometrické optiky.

Vypočítat lomivost nebo určit přesné poloměry zakřivení jednotlivých prvků této soustavy je velmi nesnadné. Protože bylo zjištěno, že optické parametry prvků oka se i u normálně vidících lidí liší, a protože dále dochází ke změnám těchto parametrů s věkem, bylo na základě experimentálně průměrných hodnot navrženo tzv. schematické a redukované lidské oko, na nějž jsou vztaženy všechny optické výpočty určující jeho funkce.

1.3.1 Akomodace oka

Při jisté nedokonalosti optického systému lidského oka není možné současně stejně ostře zobrazit na sítnici předměty nacházející se od něj v různých vzdálenostech.

Zaostření předmětů do sítnice se dosahuje *akomodací*, což je schopnost servomechanismu ovládajícího čočku přizpůsobit lomivost optických prostředí oka (oční čočky) vidění do blízka, tj. do konečné vzdálenosti. V tomto smyslu se o přizpůsobení čočky k vidění do dálky (asi od 6 m do nekonečna) v některých lékařských pramenech mluví jako o *dezakomodaci*.

Podnětem k zahájení akomodace oka je většinou neostrost obrazu na sítnici. Oko se v tomto případě akomoduje bez jakékoliv účasti vědomí. V podstatě jde o změnu ohniskové vzdálenosti čočky změnou zakřivení obou jejích stěn. Současně se také změní hloubka přední komory oka a příčný průměr čočky.

Nejvzdálenější bod, který oko dokáže vidět ostře v případě jeho akomodace do dálky, nazýváme *vzdáleným bodem akomodace* a nejbližší bod viděný ostře při maximální akomodaci oka do blízka nazýváme *blízkým bodem akomodace*. Vzdálenost mezi těmito dvěma body se nazývá *hloubka* nebo *rozsah akomodace*. Vzdálený bod je u normálně vidícího člověka v nekonečnu, blízký bod je v závislosti na věku člověka od cca 9 cm až do cca 50 cm. Rozsah akomodace se měří v dioptriích.

Akomodace je aktivním procesem úzké spolupráce optického mechanismu oka a příslušného mozkového centra, i v případě fixace oka na definovaný pozorovaný předmět není jeho akomodace v absolutním klidu. Celý systém je v tzv. nestabilní oscilaci, kde neustále kolísá akomodace kolem tzv. střední hodnoty – tím se mění ostrost obrazu na sítnici. Tento jev není dosud exaktně vysvětlen, možná je pomocí oscilace zvyšována citlivost celé regulační smyčky. Zajímavým fenoménem je, že obě oči oscilují vždy naprosto stejně.

Na akomodaci lidského oka má vliv mnoho faktorů, v první řadě osvětlení, resp. jeho intenzita, dále fyzická a duševní únava a případně i některá farmaka.

Zraková únava se projevuje na dynamice akomodace, ale také na horším přenosu informací z oka do mozku.

1.3.2 Fotopupilární reflex

Hlavní funkci „servosmyčky“ duhovka–zornice je regulace množství světla vstupujícího do oka. Je to první z mnoha regulovaných podnětů vstupujících do oka, regulační pochod je sice nedokonalý, ale je poměrně rychlý a závisí na intenzitě a ploše podnětu, dále na výchozím stavu adaptace zraku a také na věku jedince.

Maximální rozsah průměru zornice je asi od 7,5 do 1,8 mm, z toho plyne, že plocha zornice se může měnit zhruba patnácti- až dvacetinásobně.

Adekvátním podnětem pro vybuzení servosystému je změna intenzity osvětlení, které dopadá na sítnici, čím vyšší je hladina osvětlení, tím více se zornička zužuje. Regulační křivka tohoto servomechanismu je nelineární. Práh reakce zorničky na světlo je trochu vyšší, než je absolutní práh světelné citlivosti zraku.

Na regulační smyčku zornice má vliv také dynamika, resp. délka doby světelného podnětu. Návrat zornice do neutrální polohy má značně delší průběh cca 150–200 sekund.

Regulační smyčka je v podstatě totožná pro obě oči, takže reagují zhruba stejně i v případě, že světelný podnět působí pouze na jedno z nich. Při stejném osvětlení obou očí je reakce zorniček větší. Někteří autoři to vysvětlují tím, že mozek se snaží udržet v této regulační smyčce konstantní tok dat. Pravděpodobně z důvodů větší citlivosti regulace průměrů zorniček je faktem, že i při konstantním osvětlení sítnice zorničky obou očí současně téměř nepřetržitě mění svůj průměr.

1.3.3 Optická kvalita zobrazovacího systému oka

Optickou kvalitu zobrazení oka určuje ostrost zobrazení v úrovni sítnice. Nedokonalost optického prostředí oka, dále pouze jedna čočka a zároveň celý systém oka tvořený buněčnou a fibulární strukturou s různými nepravidelnostmi limitují zobrazovací schopnost oka, která je v principu velmi špatná. Explicitně je možné definovat několik základních vad – např. otvorová aberace, fyziologický astigmatismus, zkreslení a zakřivení pole a další. Jejich přesná definice však přesahuje rámec těchto skript. Souhrnně je možné konstatovat, že mozek buď zcela, nebo částečně tyto chyby u zdravého jedince beze zbytku kompenzuje.

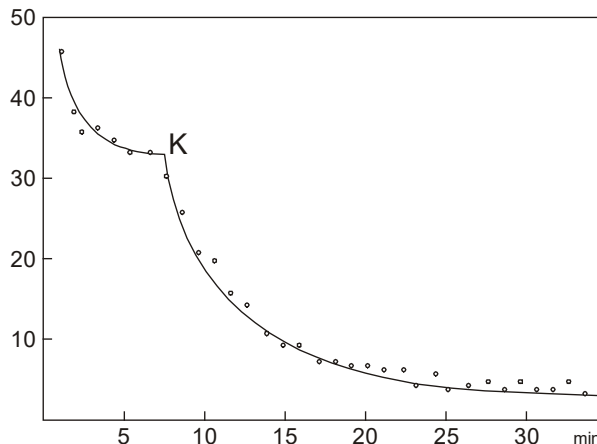
1.3.4 Adaptace na světlo a tmu

Rozlišovací schopnost lidského zraku je v rozsahu jasů cca $1 : 10^{12}$, což jest zhruba od jasové hodnoty 10^{-6} do cca 10^5 cd/m² – pro zajímavost televizní řetězec dokáže zpracovat jasy v poměru cca $1 : 60$, barevný film v poměru cca $1 : 160$.

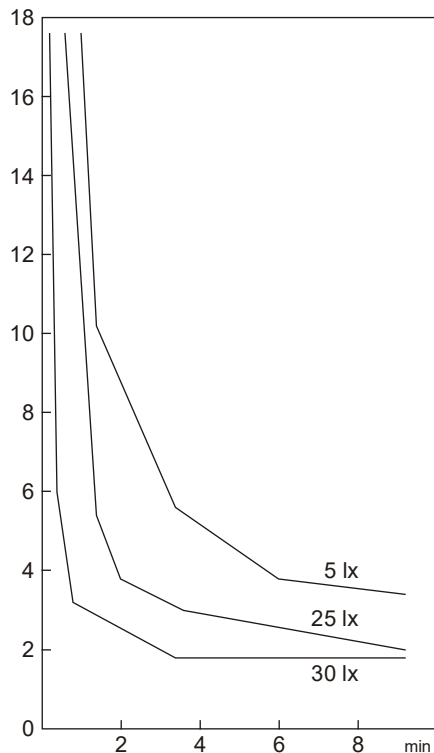
Lidské oko dokáže velice rychle měnit citlivost celého systému tak, aby se strmá část křivky rozlišovací schopnosti kryla s danou úrovní osvětlení na sítnici.

Tento proces se nazývá adaptací, která probíhá dvěma směry:

- adaptace lidského oka na tmu – obr. 2
- adaptace lidského oka na světlo – obr. 3



Obr. 2: Typický průběh křivky adaptace lidského oka na tmu (K – Kohlrauschův ohyb křivky)



Obr. 3: Typický průběh adaptace lidského oka na světlo

V podstatě lze definovat dva mechanismy adaptace:

- a) fotopupilární reflex je změna osvětlení sítnice v poměru cca 1:16 až 1:20. Tento reflex lze nazvat předregulačním stupněm nebo prvním stupněm regulační smyčky oka, který je daný změnou průměru zornic
- b) adaptace vlastní sítnice na úroveň dopadajícího světelného podnětu; je to druhý a nejdůležitější regulační proces v lidském oku.

Průběh adaptace lze rozdělit na dvě části: počáteční tzv. *fotopická* část je připisována růstu světelné citlivosti čípků a delší tzv. *skotopická* část následující po tzv. Kohlrauschově ohybu křivky [k] je důsledkem růstu citlivosti tyčinek.

Dvoudílnost křivky souvisí s tím, že světelná citlivost tyčinek je mnohem vyšší než citlivost čípků (cca $10^3 \times$ větší). Světelná citlivost lidského zraku dosahuje svého maxima po cca 45 minutách pohybu v úplné tmě.