

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI

KATEDRA OPTIKY

**VLIV CYKlickÉHO KOLÍSAÍ JASU OPTOTYPU
NA KONTRASTNÍ CITLIVOST U ZDRAVÝCH
DOSPĚLÝCH**

Diplomová práce

VYPRACOVALA:

Bc. Lucie Vávrová

Obor OPTOMETRIE

Studijní rok 2016/2017

VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE:

RNDr. Mgr. František Pluháček, PhD.

KONZULTANT:

MUDr. Miroslav Dostálek, PhD.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením RNDr. Mgr. Františka Pluháčka, PhD. za použití literatury uvedené v závěru práce.

V Litomyšli dne 20. listopadu 2016

.....

Bc. Lucie Vávrová

Poděkování

Ráda bych poděkovala konzultantovi MUDr. Miroslavu Dostálkovi, PhD. a vedoucímu práce RNDr. Mgr. Františku Pluháčkovi, PhD. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích.

Tato práce byla vytvořena za podpory projektu IGA PřF UP v Olomouci s názvem "Optometrie a její aplikace", č. IGA_PrF_2016_015.

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| SEZNAM VYBRANÝCH ZKRATEK | 6 |
| ÚVOD | 7 |
| 1 SÍTNICE | 9 |
| 1.1 Fotoreceptory | 10 |
| 1.2 Bipolární buňky | 11 |
| 1.3 Gangliové buňky | 11 |
| 1.3.1 Parvocelulární gangliové buňky | 12 |
| 1.3.2 Magnocelulární gangliové buňky | 13 |
| 2 RECEPTIVNÍ POLE (RP) | 14 |
| 2.1 Receptivní pole neuronů zrakové dráhy | 14 |
| 2.2 Receptivní pole neuronů zrakové kůry | 15 |
| 3 ZRAKOVÁ DRÁHA | 16 |
| 3.1 Corpus geniculatum laterale | 16 |
| 3.2 Senzorické oblasti mozkové kůry | 17 |
| 3.2.1 Analytické oblasti | 18 |
| 3.2.2 Asociační oblasti | 19 |
| 3.2.3 Specializace neuronů korových oblastí | 21 |
| 4 KONTRASTNÍ CITLIVOST | 23 |
| 4.1 Fyzikální popis kontrastu | 23 |
| 4.2 Testování kontrastní citlivosti | 25 |
| 4.2.1 Testy využívající sinusové mřížky | 26 |
| 4.2.2 Písmenové testy | 27 |
| 4.2.3 Test rozlišování dělicích linií | 28 |
| 4.2.4 Digitální testování kontrastní citlivosti | 28 |
| 4.3 Koncepce zpracování kontrastu ve zrakové kůře | 29 |
| 5 ČASOVÉ VLASTNOSTI STIMULŮ | 30 |
| 5.1 Critical Flicker Fusion | 31 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.1.1 | Faktory ovlivňující CFF | 31 |
| 5.2 | Temporální funkce kontrastní citlivosti | 32 |
| 5.3 | Spatiotemporální funkce kontrastní citlivosti | 34 |
| 6 | EXPERIMENTÁLNÍ STUDIE Vlivu CYKLICKÉHO KOLÍSÁNÍ JASU OPTOTYPU NA KONTRASTNÍ CITLIVOST | 36 |
| 6.1 | Cíle experimentální části | 36 |
| 6.2 | Statistický soubor a metodika | 36 |
| 6.3 | Výsledky | 38 |
| 6.4 | Diskuze | 43 |
| | ZÁVĚR | 47 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 49 |

SEZNAM VYBRANÝCH ZKRATEK

P – buňky / dráha / systém – parvocelulární buňky / dráha / systém

M – buňky / dráha / systém – magnocelulární buňky / dráha / systém

CFF – Critical Flicker Fusion

RP – receptivní pole

CGL – *Corpus geniculatum laterale*

c/st – cyklus na úhlový stupeň

MT – middle temporal

PIT - posterior inferotemporal

CIT - central inferotemporal

AIT - anterior inferotemporal

MTF - modulation transfer function

CSF – contrast sensitivity function

TSF – temporal contrast sensitivity function

ÚVOD

Zpracování a vyhodnocování vizuálních informací je složitá a dosud ne zcela popsaná oblast lidského vnímání. Následující práce se snaží shrnout známé informace právě z této oblasti. To, jak dochází k přenosu a kortikálnímu vyhodnocení vizuální informace, lze sledovat nejkompexněji na změnách kontrastní citlivosti. Analýza kontrastní citlivosti vizuálního systému umožňuje odděleně sledovat detekci nízkých prostorových frekvencí převážně magnocelulárním systémem a vysokých prostorových frekvencí převážně systémem parvocelulárním. Z dostupných zdrojů také vyplývá rozdílná citlivost magnocelulárního a parvocelulárního systému k časovým frekvencím, což pravděpodobně umožňuje oddělené testování obou systémů ve zrakové dráze. Tento poznatek ověřuje praktická část práce, která zkoumá, zda je možné za pomoci pravoúhlého kolísání jasu oddělit vyšetření kontrastové citlivosti pro magnocelulární a parvocelulární systém.

Cílem práce je poskytnout pokud možno nejaktuálnější informace o zpracování vizuálních informací magnocelulárním a parvocelulárním systémem za pomoci vyšetření kontrastní citlivosti, která je důležitým klinickým ukazatelem kvality zpracování vizuálních informací.

Diplomová práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část je členěna do několika kapitol, které na sebe navazují svým obsahem. Jednotlivé kapitoly tvoří výchozí body pro následující praktickou část zabývající se studiem vlivu cyklického kolísání jasu optotypu na kontrastní citlivost. V úvodu práce je popsána stavba sítnice se zaměřením na popis rozdílů magnocelulárních a parvocelulárních gangliových buněk, které částečně oddělují zpracování vizuálních informací. Následuje kratší část věnovaná receptivním polím, jejichž fungování je třeba znát k dalšímu pochopení funkce vizuálního systému. Na úvodní kapitoly navazuje podrobný popis zrakové dráhy se zaměřením na analytické a asociační oblasti vizuálního mozku. Zmíněná kapitola se snaží sledovat nejnovější poznatky týkající se dané problematiky. Předposlední kapitola teoretické části nahlíží do fyziologie kontrastní citlivosti. Předkládá seznam v dnešní době používaných testů a metod ke stanovení prostorové kontrastní citlivosti. Kapitola v závěru teoretické části práce se zabývá časovými

vlastnostmi vizuálních stimulů a popisem časové kontrastní citlivosti a směřuje k popisu spatiotemporální funkce kontrastu. S problematikou poslední kapitoly úzce souvisí termín *Critical Flicker Fusion*, který je podrobně rozebrán v jedné její podkapitole. Plynule navazující experimentální část diplomové práce se zabývá ovlivněním citlivosti parvocelulárního a magnocelulárního systému vůči prostorovým a časovým frekvencím během vyšetřování kontrastní citlivosti za nestacionárních podmínek.

Ke sledovanému tématu (zatím) není k dispozici mnoho relevantních literárních zdrojů. Převážnou většinu informací lze získat pouze z odborných článků anglicky píšících autorů. Jedním z úkolů práce bylo zorientovat se v nich a vyextrahovat takový souhrn informací, které srozumitelně popíší danou problematiku.

1 SÍTNICE

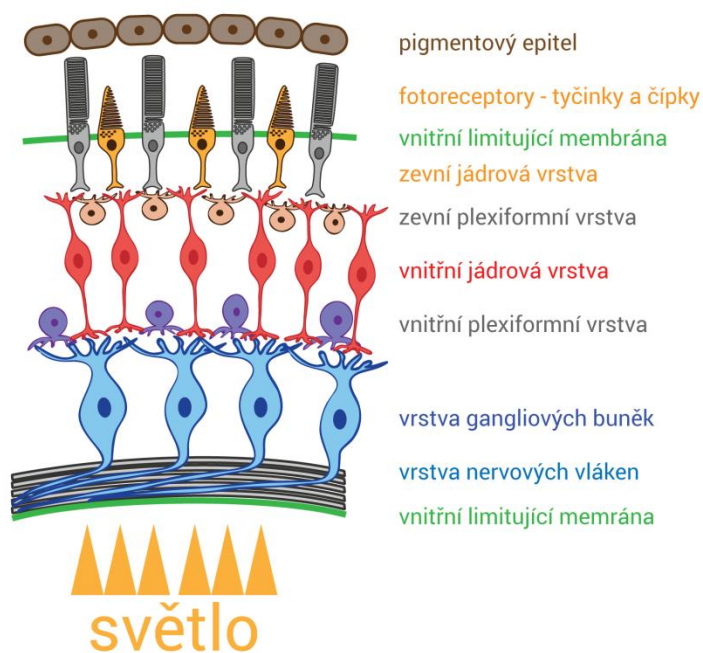
Sítnice je asi 0,2 - 0,4 mm silná blanka, která je tvořena několika vrstvami funkčně specializovaných buněk. Dělí se na dvě části. První část zvaná *pars optica retinae* (optická část sítnice) pokrývá vnitřní povrch cévnatky. Druhou částí sítnice je *pars coeca retinae* (slepá část sítnice), která se nachází v přední části oka a pokrývá vnitřní povrch řasnatého tělíska a zadní plochu duhovky. Obě části jsou od sebe odděleny linií zvanou *ora serrata* (tzv. zubatá linie).

Hlavním úkolem sítnice je příjem světelných impulzů a jejich přeměna chemickým procesem v elektrické impulzy, které jsou dále vedeny zrakovou dráhou do mozkové kůry.

Sítnice obsahuje tři typy neuronů, které jsou propojeny vertikálně - fotoreceptory, bipolární buňky a gangliové buňky. K synapsím dochází v zevní a vnitřní plexiformní vrstvě. Kromě zmíněných třech hlavních typů neuronů existují v sítnici ještě interneurony - horizontální a amakrinní buňky, které horizontálně propojují synapse mezi neurony sítnice (viz obr. 1).

Sítnice obsahuje zhruba 130 mil. fotoreceptorů, ale *nervus opticus* vystupující ze sítnice má cca 1 – 1,5 mil. vláken, což znamená, že v sítnici jsou informace z receptorů shromážděny a dále integrovány na synapsích gangliových buněk.

Struktura sítnice je rozdělena do deseti vrstev (následující výčet řadí vrstvy od té nejhluběji uložené): pigmentový epitel, vrstva fotoreceptorů, membrána *limitans interna* (zevní membrána), zevní jaderná vrstva fotoreceptorů, zevní plexiformní vrstva, vnitřní jaderná vrstva bipolárních buněk, vnitřní plexiformní vrstva, vrstva gangliových buněk, vrstva nervových vláken, membrána *limitans externa* (vnitřní membrána). [7, 11, 15]



Obr. 1 – Stavba sítnice [32]

1.1 FOTORECEPTORY

Nejhlouběji uložená vrstva je složena z fotoreceptorů - tyčinek a čípků. Jejich hlavní funkcí je přeměna světelné energie na elektrický signál. Tyčinky a čípky se od sebe liší funkcí, morfologií, počtem a rozmístěním na sítnici. U fotoreceptorů rozeznáváme 2 úseky. Vnější úsek obsahuje světločivné elementy, ve kterých dochází k přeměně světelné energie na elektrický signál a vnitřní část sestává z buněčného jádra a nervového vlákna, které vedou elektrické impulzy dále k bipolárním buňkám. Rozmístění tyčinek a čípků na sítnici je pravidelné. Největší koncentrace čípků je ve fovee a celkově v centrální části sítnice. Naopak tyčinek je nejvíce 20° od fovey a celkově v periferních částech sítnice. Světlo dopadající přímo do fovey neprochází všemi vrstvami sítnice, ale dopadá na vrstvu čípků, což umožňuje průchod světla bez zkreslení.

Tyčinky

Tyčinek se v sítnici nachází zhruba 120 milionů. Tyčinky jsou citlivé na světlo, protože obsahují rodopsin, u kterého dochází při osvětlení k přestavbě molekuly a s tím související přeměně světelných impulsů na nervové vzruchy. Tyčinky jsou velmi citlivé na rozdíly v nejnižších jasových hladinách (zajišťují skotopické vidění). Obsahují pouze jeden druh fotoaktivního pigmentu, z čehož plyne jejich barvoslepost, tedy neschopnost reagovat odlišně na světlo o různých vlnových délkách (vrchol vlnové délky cca 500 nm). Důsledkem tohoto jevu je nebarevné vidění za zhoršených světelných podmínek.

Čípky

Čípků je v sítnici zhruba 7 milionů. Jejich hlavní funkcí je zprostředkovat vidění za vyšších světelných intenzit (fotopické vidění) a také rozlišení jemných detailů v zorném poli. Čípky obsahují tři druhy fotoaktivního pigmentu (vrcholy vlnových délek 450, 530 a 565 nm), díky čemuž zajišťují barevné vidění. [7, 11, 15]

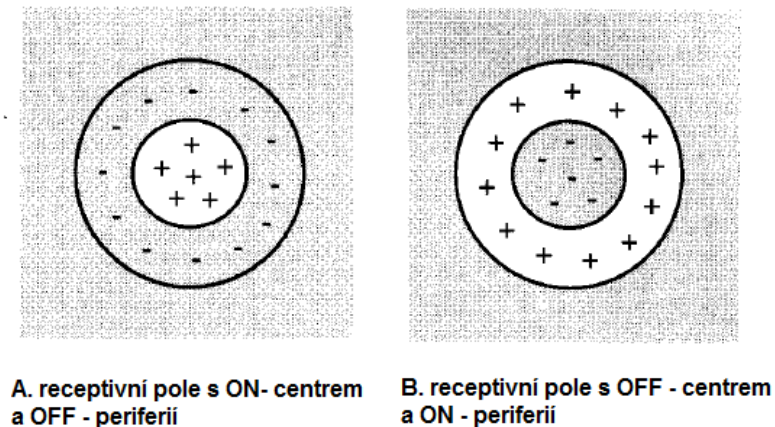
1.2 BIPOLÁRNÍ BUŇKY

Další buněčnou vrstvou jsou bipolární buňky, které se nacházejí mezi fotoreceptory a vnitřní vrstvou gangliových buněk. Jejich hlavní funkcí je spojení fotoreceptorů a gangliových buněk. Rozlišují se dva základní typy bipolárních buněk: monosynaptické a difúzní. Monosynaptické bipolární buňky se napojují na jeden čípek a jednu gangliovou buňku, zatímco difúzní gangliové buňky mají synapse se dvěma a více percepčními buňkami. [7, 11, 15]

1.3 GANGLIOVÉ BUŇKY

Gangliových buněk je v sítnici asi 1 – 1,5 milionu. Jejich neurity zasahují až do primárního zrakového centra v *corpus geniculatum laterale* (CGL). Existuje dvojí základní dělení gangliových buněk. První je dělení na buňky, jejichž receptivní pole má excitační centrum (on - centrum) a inhibiční periferii, a buňky, jejichž receptivní pole má excitační periferii a inhibiční centrum (off – centrum), jak je vidět na obr. 2. Druhé dělení je založeno na základě různého tvaru a funkce gangliových buněk, a to na

malobuněčné (parvocelulární, P - buňky) a velkobuněčné (magnocelulární, M - buňky) s poměrem výskytu 4:1. V sítnici se nalézá malé množství gangliových buněk, které není možné označit ani jedním termínem. Rozdíly ve fyziologických vlastnostech gangliových buněk naznačují, že M a P – buňky zpracovávají rozdílné druhy vizuální informace. [7, 11, 26]



Obr. 2 – Receptivní pole gangliových buněk (přeloženo autorkou) [3]

1.3.1 PARVOCELULÁRNÍ GANGLIOVÉ BUŇKY

Parvocelulární gangliové buňky přijímají signál z menšího počtu fotoreceptorů a tudíž mají 2 – 3 krát menší receptivní pole než M - buňky. Nervové vzruchy vedou do mozku pomaleji, než je tomu u M - buněk. P – buňky reagují hlavně na drobné zrakové podněty a barvy (více než 80 % P - neuronů vykazuje barevnou oponenturu). K jejich aktivaci dochází buď při dopadu světla určité vlnové délky, nebo při velkém rozdílu v intenzitě světla dopadajícího na střed a obvod receptivního pole. Vlákná P – buněk jsou menšího průměru a vedou do parvocelulárních (3. – 6.) vrstev v *corpus geniculatum laterale* a do hlubších vrstev 4C β zrakové kůry (Brodmannova area 17, V1). Parvocelulární systém je citlivý především na vysoké prostorové frekvence, vysoký kontrast, nízké časové frekvence, a má proto i nízký Critical Flicker Fusion (CFF). Podrobné informace o CFF se nacházejí dále v textu. [7, 11, 12, 26]

1.3.2 MAGNOCELULÁRNÍ GANGLIOVÉ BUŇKY

Magnocelulární gangliové buňky mají oproti P - buňkám větší receptivní pole a přijímají signál z více fotoreceptorů. Nacházejí se hlavně na periférii sítnice. M – buňky reagují na pohyb a silné zrakové podněty. K jejich stimulaci dochází buď po osvitě jakoukoliv vlnovou délkou, nebo při malém rozdílu světelné intenzity ve středu a odvodu receptivního pole. Vlákná M – buněk jsou většího průměru a vedou do magnocelulární (1. – 2.) vrstvy v *corpus geniculatum laterale* a vrchnějších částí 4Cα vrstvy v Brodmannova area 17 (V1). Magnocelulární systém je citlivý na nízké prostorové frekvence, nízký kontrast nižší než 10 %, vysoké časové frekvence, a má proto vysokou hodnotu CFF. [7, 11, 12, 26]

Merrigan a Eskin (1986) studovali vliv neurotoxinu na časové a prostorové rozlišení u opic. Aplikace neurotoxinu se projevila selektivním poškozením P – neuronů, při zachování M – neuronů. V souladu s fyziologickými vlastnostmi magno- a parvo- drah, tyto opice vykazovaly snížení kontrastní citlivosti pro vysoké prostorové a nižší časové frekvence. [26]

2 RECEPTIVNÍ POLE (RP)

Všeobecně je za receptivní pole považována ta část senzitivní oblasti, odkud lze vzbudit nebo utlumit aktivitu studovaného neuronu ležícího kdekoliv v sensorické dráze. Konkrétně na sítnici je receptivním polem plocha, která při stimulaci světlem způsobí odezvu daného neuronu. Velikost receptivních polí na sítnici kolísá. Centrum receptivního pole gangliových buněk fovey měří cca dvě úhlové minuty, v periférii sítnice už dva stupně a receptivní pole v asociačních oblastech zrakové kůry jsou veliká až sto stupňů.

2.1 RECEPTIVNÍ POLE NEURONŮ ZRAKOVÉ DRÁHY

Kuffler jako první roku 1952 popsal vzhled receptivních polí gangliových buněk. Obdobná jsou i receptivní pole fotoreceptorů, bipolárních buněk a buněk *corpus geniculatum laterale*, pouze receptivní pole buněk geniculata mají větší periferní část, což vede ke slabší reakci na difuzní osvětlení, ale silnější reakci v místech světelných přechodů (lepší reakce na kontrast). Dopadem světla do receptivního pole neuronu dojde k excitaci nebo inhibici sledovaných buněk. Receptivní pole gangliové buňky má tvar terče, který se skládá z centrální a obvodové části. Po dopadu světla do vnitřní nebo vnější části receptivního pole dochází k protichůdné reakci na obou částech – jedna část gangliovou buňku aktivuje, zatímco druhá část ji utlumí. Aktivací se rozumí změna frekvence akčního potenciálu vysílaného sledovanou buňkou. Existují dva typy koncentricky uspořádaných receptivních polí. Prvním typem jsou receptivní pole, která reagují na světelný podnět v centru svého receptivního pole a jsou inhibována dopadem světla na periferní část. Naproti tomu druhý typ je excitován podnětem v periférii receptivního pole a je inhibován světlem v centrální oblasti. [3, 7, 11, 12]

2.2 RECEPTIVNÍ POLE NEURONŮ ZRAKOVÉ KŮRY

Jak bylo řečeno výše, receptivní pole neuronů sítnice a *corpus geniculatum laterale* mají kruhový tvar a koncentrické uspořádání, proto nejlépe reagují na jasové rozhraní (ideálním podnětem je světelný pruh), avšak nejsou schopny např. rozeznat natočení tohoto rozhraní. Naproti tomu receptivní pole neuronů zrakové kůry mají asymetrická receptivní pole. Dle Hubela a Wieselova lze na základě testu linearity kortikální neurony klasifikovat na jednoduché, komplexní a hyperkomplexní. Jednoduché neurony se nalézají nejvíce v oblasti V1 zrakové kůry, komplexní ve V1 a V2 a hyperkomplexní v korové oblasti V2 a V3.

Jednoduché neurony mají asymetrické (většinou oválné) receptivní pole, které se skládá z excitační a inhibiční oblasti. K aktivaci vyžadují směrovou shodu podnětu a receptivního pole. Při úplné shodě je frekvence akčního potenciálu maximální, čím větší odchylka nastane, tím frekvence klesá (nad 20° bez odezvy).

Receptivní pole **komplexních neuronů** nelze jednoduše členit na excitační a inhibiční oblast. K aktivaci dochází při každém promítnutí obrazu do jakékoli části jejich receptivního pole. Nejlépe reagují na pohyb pruhu v preferovaném směru. Naopak nejméně reagují na pohyb stejného podnětu v opačném směru. Vykazují taktéž citlivost na orientaci kontrastního rozhraní. Receptivní pole komplexních neuronů je složeno z několika RP simplexních bipolárních buněk.

RP **hyperkomplexních neuronů** je nejcitlivější na pohybující se úsečky určité délky. Této vlastnosti se říká „end stopping“. Receptivní pole hyperkomplexních neuronů je složeno z několika receptivních polí komplexních bipolárních buněk a podobně jako RP komplexních neuronů reaguje na preferovaný směr pohybu. V literatuře je možné se setkat s označením hyperkomplexních neuronů jako tzv. detektorů rysů.

Každý neuron ve zrakové kůře funguje jako filtr vyladěný na úzké pásmo hodnot obrazu podnětu, které vedou k jeho aktivaci. [11, 16, 18]

3 ZRAKOVÁ DRÁHA

Zraková dráha vede od smyslových buněk na sítnici až po zraková centra v mozkové kůře. Z gangliových buněk vycházejí nervová vlákna, která se sbíhají na papile. Zde se sdružují do svazku, který je označován jako optický nerv. Optický nerv dále prochází sklérou, opouští bulbus a dostává se do očníce, kde kanálem zrakového nervu očníci opouští. Přes nitrolební dutinu se optický nerv dostane do oblasti *chiasma opticum*, kde dochází ke křížení vláken z nazálních částí obou očí. Z chiasmatu vybíhají dva optické trakty do *corpora geniculata laterale* – primárních zrakových center. Odtud vede zraková dráha vějířovitě dvěma svazky optických radiací (Gratioletův svazek) do zrakového centra v okcipitálním laloku. [6, 12, 15]

Průběh magnocelulární a parvocelulární dráhy

Jak již bylo uvedeno výše, gangliové buňky lze na sítnici dělit na M – buňky a P - buňky. Axony těchto buněk pokračují až do CGL, kde se nacházejí oddělené vrstvy magno- a parvo- intralaminárních neuronů. Signál z CGL je dále veden oddělenou magno- a parvo- drahou až do primárního zrakového centra (V1), kde dochází k dalšímu zpracování. Odtud dále pokračuje jako dorzální proud (magnocelulární) a ventrální proud (parvocelulární), ve kterých pokračuje zpracování vizuálních informací. Jednotlivé oblasti, ze kterých se skládá ventrální i dorzální dráha, jsou vzájemně propojeny. [26]

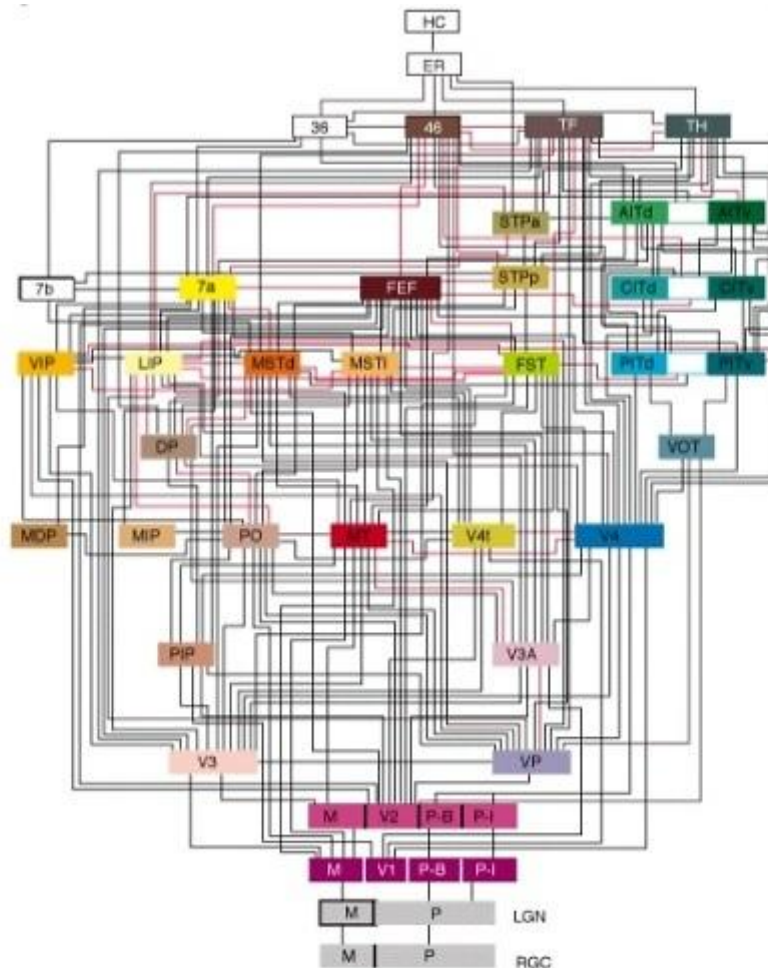
3.1 CORPUS GENICULATUM LATERALE

CGL je podkorový párový útvar nacházející se v mezimozku. Skládá se z šesti zřetelně oddělených vrstev buněk (číslovaných 1 - 6), mezi nimiž probíhají aferentní i eferentní vlákna. Zde se dále nacházejí interlaminární neurony s nejasnou funkcí (někteří autoři se domnívají, že mají za úkol primitivní binokulární suprese). Hlavní úlohou CGL je jednak vedení impulzů optickou radiací do čtvrté vrstvy V1 (magnocelulární neurony směřují do vrstvy 4C α a parvocelulární do 4C β), ale také zpětný příjem signálů z šesté vrstvy V1. Vrstvy 1 a 2 (magnocelulární) přijímají informace z M – buněk sítnice a

vrstvy 3 až 6 (parvocelulární) přenášejí informace z P – buněk. Díky částečnému křížení nervových vláken v chiasmatu se stejnostranné axony promítají do vrstev 2, 3 a 5, zatímco druhostranné do vrstev 1, 4 a 6. Vlákná z horních stejnostranných retinálních kvadrantů obou očí končí v mediální části CGL a vlákna z dolních stejnostranných kvadrantů končí v laterální části CGL. [7, 11, 15]

3.2 SENZORICKÉ OBLASTI MOZKOVÉ KŮRY

Senzorické oblasti mozkové kůry lze dělit na **analytické** a **asociační**. Oblast V1 a V2 jsou označovány jako analytické a oblasti V3, V4 a V5 (MT) jako asociační. Senzorické oblasti mozkové kůry jsou mezi sebou vzájemně propojeny. Dosud ovšem nebylo hierarchické uspořádání zrakové kůry zcela popsáno a pochopeno. Van Essen a Felleman roku 1991 schematizovali semihierarchické uspořádání vzájemného propojení jednotlivých oblastí (obr. 3). Jednotlivé oblasti vizuálního kortexu navzájem velmi intenzivně komunikují. Horizontálně (komunikace na jedné hierarchické úrovni) a vertikálně (předávání informací vzestupně i sestupně). Bylo doloženo, že vertikální asociační spoje nedodržují důsledné vertikální anatomické uspořádání, někdy nadřazenou oblast obcházejí. Z tohoto důvodu dává Van Essen přednost termínu semihierarchie. Vertikální spoje nejsou vždy pouze vzestupné, významná část spojů je i sestupná. Jejich význam je v modulaci nižších etáží tak, aby efektivněji zpracovaly ty části vizuálního systému, na které se soustřeďují oblasti vyšší. [7, 11, 29, 31]



Obr. 3 – Uspořádání oblastí mozkové kůry podle Van Essena a Fellemana (1991) [11]

3.2.1 ANALYTICKÉ OBLASTI

Primární zraková kůra (area striata, Brodmanova area 17, V1) se nachází v okcipitálních lalocích nad a pod *fissura calcarina*. Převážná většina axonů z *tractus geniculocorticalis* vede do 4. vrstvy (magno- neurony 4C α , parvo- neurony 4C β). Neuronální spojení jednotlivých vrstev je nejbohatší mezi vrstvou 4 s vrstvy 2 a 3, které vedou signál do vyšších zrakových center. Eferentní vlákna vedou z vrstvy 6 zpět do CGL a z vrstvy 5 zejména do *colliculi superiores*. Z vyšších zrakových center přijímá vrstva 1 zpětný signál. Dle Hubela a Wieselova neurony ze všech vrstev V1 (mimo 4. vrstvy) mají binokulární receptivní pole, ovšem více preferují obraz z pravého nebo levého oka. Neurony se stejnou preferencí jsou uspořádány v systematicky řazených sloupcích okulární dominance. Ve V1 se dále nacházejí seskupení neuronů – tzv. bloby

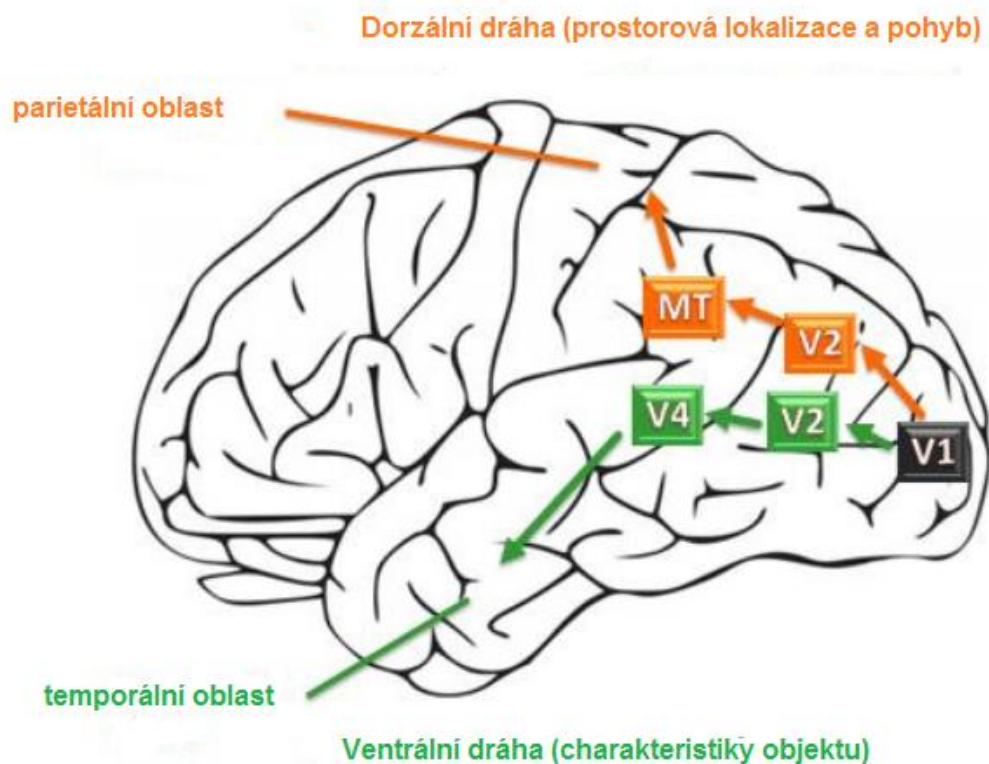
(reagují na barvu a jsou tedy pravděpodobně součástí parvocelulárního systému) a interbloby, které pravděpodobně nesou projekci ze systému magnocelulárního. V1 je stejně jako jiné části zrakové dráhy a asociační oblasti zrakové kůry retinotopicky uspořádána. Vlákná horního svazku optických radiací (vedoucí vzruchy z horních polovin sítnic) končí nad *fissura calcarina*. U dolního svazku vedoucího vzruchy z dolních polovin sítnic je tomu naopak. V zadní části area 17 končí vlákna z makulárních oblastí obou očí, zatímco vpředu jsou situována vlákna z periferních homolaterálních oblastí sítnic a kontralaterálních zorných polí. Makulární oblast tvoří ½ celkové plochy arey 17. Primární zraková kůra obsahuje cca 200 milionů neuronů a je oproti předešlým úsekům zrakové dráhy již vysoce specializovaná. Receptivní pole neuronů V1 reagují nejen na prostý světelný podnět, ale již také na tvary, barvu, orientaci a kontrast podnětů. [7, 11, 29]

Sekundární zraková kůra (area parastirata, Brodmanova area 17, V2). Tento 1 - 3,4 cm široký pás kůry bezprostředně navazuje na primární zrakovou kůru. Morfologicky se V2 liší od V1 absencí striagenari a přítomností tzv. stripes, což jsou oblasti střídajících se tmavých a světlých myelinových pruhů. Ve V2 probíhá komplexnější zpracování zrakových informací - rozeznávání objektu na pozadí, relativní disparita, kontury (obrysy) včetně iluzorních (např. Kaniszův trojúhelník). [7, 11, 19, 29]

3.2.2 ASOCIAČNÍ OBLASTI

Za korovou oblastí V2 se zpracování vizuálního signálu rozděluje do dvou drah – dorzální a ventrální (obr. 4). Dorzální (magnocelulární, parietální) dráha je tvořena neurálními strukturami napojenými na magnocelulární struktury zrakové dráhy a promítá se do parietookcipitální části (zadní parietální cortex, PPC) týlního laloku. Podává odpověď na otázku „KDE, JAK?“ (analýza pohybu a lokalizace předmětu, podílí se také na očních pohybech – např. vergence). Ventrální (parvocelulární, temporální) dráha zpracovává signály přenesené systémem parvocelulárním a promítá se do okcipitotemporální části (dolní temporální cortex, ITC) spánkového laloku. Podává odpověď na otázku „CO?“ (analýza formy pomocí oblastí pro identifikaci objektů, barev, tváří apod.). Kortikální oblasti tvořící dorzální a ventrální dráhu jsou organizovány hierarchicky tak, že vstupní informace nízké validity jsou přeměněny na užitečnější následným zpracováním. V posledních letech se ukazuje, že koncept

úplného oddělení zpracování vjemu magno- a parvo- drahou napříč všemi úrovněmi (Ungerleider, Mishkin) není přesné. Předpokládá se, že ve zrakové kůře dochází k míchání a reorganizaci signálů z magno- a parvo- systémů, čemuž odpovídá rozsáhlé neurální propojení mezi jednotlivými oblastmi dorzální i ventrální dráhy, ale též reakce neuronů obou drah na stejné vizuální podněty (např. barva, kontury, směr pohybu). [7, 8, 11, 14, 29]



Obr. 4 – Průběh dorzální a ventrální dráhy (přeloženo autorkou) [14]

Ventrální dráha

Ventrální dráha vede z V1 přes oblasti V2, ventroposteriorní část VLP / V3, V4 a poté podává informace do oblastí PIT (posterior inferotemporal), CIT (central inferotemporal) a AIT (anterior inferotemporal) v temporálním laloku. Každá korová oblast reprezentuje různé části zorného pole a promítá se přes *splenium* v *corpus callosum* (shluk nervových vláken spojující obě mozkové hemisféry) do oblastí v protější hemisféře. Všechny části V1 zprostředkovávají vizuální informace přes vzájemné propojení do dalších oblastí homolaterálních částí inferotemporálního kortexu

(ITC), ale navíc z důvodu vzájemného propojení přes *corpus collosum* každá oblast V1 také přenáší informace do kontralaterálních částí ITC. V ITC jsou centra pro vnímání odstínu, jasu, 2D konfigurace a 3D tvaru. Zadní část ITC (area TEO) umožňuje využívat rozlišovací schopnosti, zatímco přední část (area TE) zprostředkovává vizuální paměť. Neurony v ITC se podílejí hlavně na všímání a zapamatování si vlastností pozorovaného objektu, ale nereprezentují jeho pozici v prostoru.

Dorzální dráha

V zadním parietálním cortexu (PPC) se nachází centrum pro prostorové vnímání. PPC na rozdíl od ITC, který vyhodnocuje „kvality“ pozorovaného objektu, analyzuje prostorové vztahy mezi jednotlivými objekty a pohyb obrazu ve vizuálním prostoru. Dorzální dráha, podobně jako ventrální dráha, přenáší vizuální informace z V1 přes oblasti V2, dorsomediální oblast (DM) VLP / V3, V5 (MT), medial superior temporal area (MST) a Brodmanovu oblast 7a v zadním parietálním laloku. Ventrální dráha umožňuje vnímání podnětu, jeho vlastností, ale neanalyzuje umístění objektu v prostoru. Naopak dorzální dráha umožňuje provádět činnosti řízené zrakem, jako je orientace v prostoru a uchopení předmětu (reflex oko – ruka). [5, 7, 8, 11, 25, 29]

3.2.3 SPECIALIZACE NEURONŮ KOROVÝCH OBLASTÍ

Při povrchním posouzení by mohlo z předchozích kapitol vyplynout, že popsané oblasti zrakové kůry jsou jednoznačně funkčně specializovány na konkrétní vlastnosti vizuálního vjemu. V následujícím grafu na obr. 5 je však vidět, že neurony v jednotlivých oblastech jsou výběrově senzitivní k více než jedné vlastnosti vizuálního podnětu. V následujícím výčtu vybraných oblastí jsou popsány jejich dominantní reakce na vlastnosti stimulu.

V1 – neurony fungují jako lokální filtry prostorové frekvence, jsou citlivé na směr pohybu a orientaci podnětu

V3 – neurony reagují hlavně na tvar a prostorovou orientaci podnětu

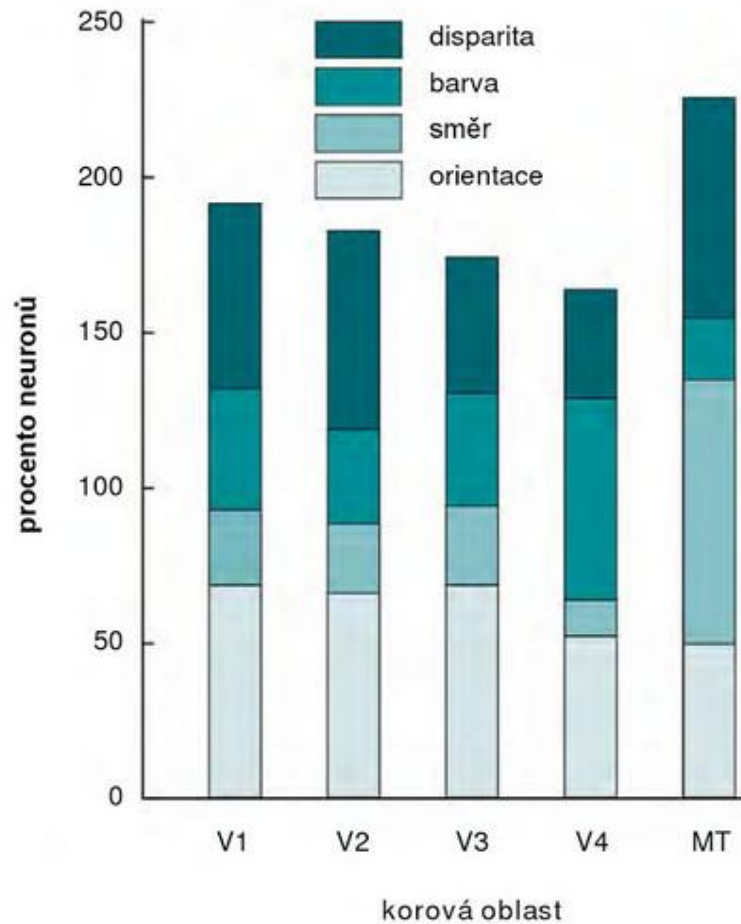
V4 – část neuronů reaguje na stimul vyčnívající z pozadí (na základě rozdílu barvy a tvaru), reakce na barvu

MT – citlivé na celkový pohyb předlohy, barvu a binokulární disparitu

MST – reagují na dilataci / konstriktci sítnicového obrazu přibližujícího se / vzdalujícího se objektu

FFA (fuziformní gyrus) – citlivé hlavně na rozpoznání tváří

EBA – citlivé na rozeznání postav a částí těla [8, 11, 25]



Obr. 5 – Graf procentního zastoupení nervových buněk ve vybraných oblastech mozkové kůry citlivých k binokulární disparitě, barvě, směru pohybu a orientaci. Upraveno dle Mather (2006). [11]

4 KONTRASTNÍ CITLIVOST

Zjednodušeně řečeno, kontrastní citlivost vymezuje hranici mezi viditelným a neviditelným. Existují dva úhly pohledu na kontrast. Prvním je subjektivně vnímaný kontrast, který nelze fyzikálně změřit a který se formuje pomocí optického zpracování informace ve zrakovém systému. Druhým je kontrast zrakového objektu, který je možné fyzikálně popsat a který lze definovat jako nestejnost jasu dvou podnětů viděných současně nebo postupně působících na zrak. [9, 10, 22, 23, 24]

4.1 FYZIKÁLNÍ POPIS KONTRASTU

Pro fyzikální popis kontrastní citlivosti je třeba definovat pojem kontrast (C). Při předpokladu přítomnosti vizuálního podnětu na jednotném pozadí je kontrast objektu popisován jeho relativním rozdílem v jasu od pozadí. [9, 10, 22, 23, 24] Z fyzikálního hlediska lze kontrast C popsat třemi následujícími způsoby:

1) Weberův popis kontrastu:

Weberův kontrast nabývá hodnot od -1 až do $+\infty$ a lze ho definovat jako rozdíl největšího (L_{\max}) a nejmenšího (L_{\min}) jasu obrazu dělený celkovým jasnem pozadí (L_p),

$$C = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_p}.$$

Weberův popis kontrastu je používán při popisu znaků (nejčastěji písmen) nacházejících se na jednotném pozadí;

2) Michelsonův popis kontrastu:

Michelsonův kontrast je bezrozměrná veličina nabývající hodnot od 0 do 1 (nebo 0 – 100 %) a lze ji definovat jako rozdíl maximálního (L_{\max}) a minimálního (L_{\min}) jasu objektu, který je dělen jejich součtem,

$$C = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}.$$

Tento vztah se využívá při popisu sinusové mřížky;

3) RMS kontrast:

RMS (root mean square) kontrast je definován jako standardní odchylka v jasech jednotlivých bodů obrazu,

$$rms = \frac{L_{\sigma}}{L_{\mu}},$$

kde L_{σ} je průměr a L_{μ} standardní odchylka. Tento vzorec je používán pro popis přirozených stimulů.

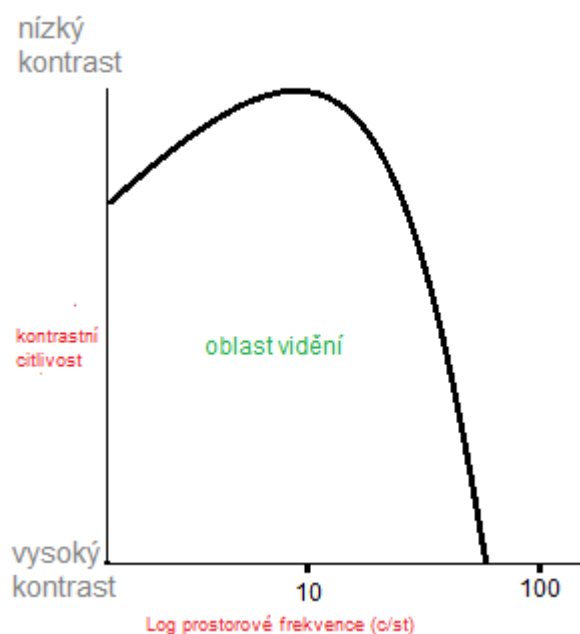
Dalším důležitým termínem je tzv. **kontrastní práh** (treshold), což je minimální kontrast potřebný ke spolehlivému rozeznání objektu na pozadí. Hodnota kontrastního prahu je závislá např. na osvětlení, pohybu a adaptaci oka. Pro fotoskopické vidění je normální hodnota dle Michelsonova popisu kontrastu v oblasti asi 0,01. Převrácená hodnota kontrastního prahu se nazývá kontrastní citlivost. [9, 10, 23, 24]

Celková schopnost oka vnímat jemné detaily závisí nejen na výše zmíněné kontrastní citlivosti, ale také na **prostorové frekvenci** (kontrastní citlivost je funkcí prostorové frekvence). Každý vizuální objekt lze na základě tzv. Fourierovy analýzy rozložit na součet sinusových mřížek o různých prostorových frekvencích (hustotě linií) a různých fázích (posunutích). Prostorovou frekvenci je možné udávat v počtu kontrastních cyklů na úhlový stupeň (c/st), kde se cyklem rozumí jedna perioda mřížky. V praxi to znamená, že větší počet úzkých pruhů reprezentuje vysoké prostorové frekvence a naopak menší počet širokých pruhů reprezentuje nízké prostorové frekvence. Například na dokonale zaostřené fotografii jsou viditelné jemné detaily, hrany a linie - obraz obsahuje velké zastoupení vysokých prostorových frekvencí. Naopak na téže, ale rozostřené fotografii jsou viditelné jen větší tvary s nejasnými okraji - obraz obsahuje především nižší prostorové frekvence.

Rozdělení obrazu pomocí zmíněné Fourierovy analýzy na jednotlivé prostorové frekvence, jejichž součtem je původní obraz, získáme tzv. Fourierovo spektrum, které představuje rozložení amplitud a fází dílčích prostorových frekvencí. Lidský zrakový systém je zjednodušeně považován za Fourierův analyzátor, který rozkládá vstupní signál na sinusové vlny, které jsou dále zpracovávány magno- a parvo- systémem. Parvo- systém je citlivý na signál o vysoké prostorové frekvenci a vysokém kontrastu.

Magno- systém je naopak vnímavější k signálu o nízké prostorové frekvenci a nízkém kontrastu.

Kontrastní citlivost zrakového systému ukazuje **křivka kontrastní citlivosti** (funkce kontrastní citlivosti (CSF), obr. 6), která popisuje závislost prostorové frekvence podnětů (c/st) na kontrastu (log). CSF je často označována jako modulační přenosová funkce (modulation transfer function, MTF). Oko má nejvyšší citlivost na kontrast mezi 3 – 6 c/st. Plocha pod křivkou představuje oblast vidění a vše, co je mimo tuto oblast, je pro oko neviditelné. Kontrastní citlivost lidského oka se mění s přibývajícím věkem, kdy klesá vnímavost zejména na středních a vyšších prostorových frekvencích. [9, 23, 24, 27, 28]



Obr. 6 – Funkce prostorové kontrastní citlivosti

4.2 TESTOVÁNÍ KONTRASTNÍ CITLIVOSTI

K celkovému zhodnocení rozlišovací schopnosti oka nestačí pouze klasické vyšetření centrální zrakové ostrosti, ale je vhodné testovat i citlivost na kontrast. V prostředí, ve kterém se pohybujeme, mají předměty různé kontrasty. Klasické testování zrakové

ostrosti určí schopnost pacienta vidět malé objekty o vysokém kontrastu, zato testování kontrastní citlivosti zhodnotí vidění za běžných (neoptimálních reálných) světelných podmínek. Ze zmíněného vyplývá, že vyšetření kontrastní citlivosti informuje o rozlišovací schopnosti zrakového systému při různých kontrastech a na větší ploše sítnice, což je důležité pro odhalení nejruznějších onemocnění (oka i celkových onemocněních projevujících se změnami ve zrakovém systému), která se manifestují snížením citlivosti na kontrast buďto v oblasti nižších, nebo naopak vyšších prostorových frekvencí, nebo také ve všech frekvencích. Postižení centrální části sítnice, která je velmi citlivá na kontrast, vede ke snížení kontrastní citlivosti na vysokých prostorových frekvencích. Naopak defekt vzniklý v periférii sítnice se manifestuje snížením citlivosti na kontrast v oblasti nižších prostorových frekvencí a snížením časové rozlišitelnosti. [9, 17, 23]

Pro dosažení nejpřesnějších informací o vidění je vhodné kontrastní citlivost měřit za binokulárních podmínek. Binokulární kontrastní citlivost je v důsledku binokulární sumace až o 40 % lepší než monokulární, a to v celém rozsahu frekvencí. Rostoucí rozostření obrazu na jednom oku (např. u amblyopie) snižuje vjem kontrastu i na druhém oku především ve vysokých frekvencích. [4, 9]

4.2.1 TESTY VYUŽÍVAJÍCÍ SINUSOVÉ MŘÍŽKY

Testování pomocí sinusových pruhů je nejpřesnější metodou vyšetření kontrastní citlivosti. Světlé a tmavé sinusové pruhy různých kontrastů a prostorových frekvencí umožňují vyšetření kontrastní citlivosti ve všech viditelných prostorových frekvencích.

1) Ardenovy a Jacobsonovy tabule

Jeden z prvních testů kontrastní citlivosti byly Ardenovy a Jacobsonovy tabule, tento test ale pro svou náročnost a nepřesnost příliš nepronikl do praxe. Na každé tabuli byly svíslé světlé a tmavé pruhy o jedné prostorové frekvenci s klesajícím kontrastem shora dolů. Vyšetřovaný měl za úkol označit místo, kde jednotlivé pruhy přecházejí v jednolitou šed'

2) Ginsburgovy tabule

Přelom ve vyšetřování kontrastní citlivosti znamenaly právě Ginsburgovy tabule zkonstruované již v roce 1984. K testování se používá velká tabule na dálku a malá do blízka. Test obsahuje 45 terčů se sinusovými pruhy o 5 prostorových frekvencích (1, 5; 3; 6; 12 a 18 c/st) v 5 řadách a 9 stupních kontrastu. Kontrast sinusové mřížky ubývá zleva doprava a prostorové frekvence přibývají shora dolů. Úkolem vyšetřovaného je rozpoznání orientace pruhů (svisele, odklon 15° vlevo/vpravo). Na testu se nacházejí i prázdná políčka, která zvyšují spolehlivost posouzení odpovědi pacienta. V dnešní době existuje mnoho modifikací tabulí zkonstruovaných na principu Ginsburgovy tabule. V praxi nejpoužívanější je model CSV-1000, který obsahuje 5 řad sinusových pruhů s 5 prostorovými frekvencemi (1,5; 3, 6, 12 a 18 c/st), kdy 1,5 c/st má odlišnou velikost terče, takže se výsledné hodnoty musí přepočítat. Jas tabule je kalibrován na 85 cd/m² se zpětnou kontinuální vazbou. Test je konstruován na vyšetřovací vzdálenost 2,5 m, odpovídá tak požadavkům FDA pro experimentální testování kontrastní citlivosti v multicentrických studiích.

V roce 1998 vyvinuli Wachler a Krueger metodiku tzv. normalizované kontrastní citlivosti optimalizovanou pro rychlé hodnocení kontrastní citlivosti. Metodika byla vytvořena na základě analýzy výsledků normální populace. Z dat vytvořená skórovací škála se pohybuje v rozmezí 0,10 až 1,35, kdy každému terči odpovídá jedna hodnota. [17, 23, 27]

4.2.2 PÍSMENOVÉ TESTY

V klasické praxi nejčastěji používanými testy jsou písmenové testy, které testují kontrastní citlivost na písmenových optotypech.

1) Pelli – Robsonovy tabule

Pelli – Robsonovy tabule jsou konstruovány jako jednotlivé optotypy se stejně velkými písmeny o různém kontrastu. Existují dva typy tabulí skládajících se z 16 trojic písmen, které jsou poskládány do 8 řad po dvou trojicích. Všechna 3 písmena ve trojici mají stejný kontrast, v následující trojici klesá kontrast o 0,15 log jednotek. Vyšetřovaný čte zleva doprava a shora dolů. Poslední rozpoznaná trojice písmen určuje log kontrastní citlivosti (škála od 0,00 do 2,25). Vyšetřovací vzdálenost činí 1 m.

2) Marsův test

Marsův test vychází z Pelli – Robsonovy tabule. Oproti Pelli – Robsonově tabuli má menší rozdíly ve snižujícím se kontrastu (0,04 log jednotek), menší rozměry (je přenosný), lze na něm testovat i do blízka (50 cm), k dispozici jsou 3 typy tabulí (ztížené zapamatování si optotypů).

3) Reganovy tabule

Měření kontrastové citlivosti na Reganových tabulích je odlišné od předchozích v tom, že se používají písmena o různých velikostech (odpovídající rozdílným stupňem zrakové ostrosti) a kontrastech (96 %, 50 %, 25 % a 11 %).

4) Sloanovy tabule

Na obdobném principu jako Reganovy tabule byly sestrojeny i Sloanovy tabule, z nichž nejnovějším typem je Multi distance testing low contrast letter set, který testuje kontrastní citlivost na vzdálenost 1,6 m a 1 m. Test sestává ze 7 tabulí se 100%, 25%, 10%, 5%, 2,5%, 1,25% a 0,6% kontrastem log MÚR optotypů. [9, 17, 23, 27]

4.2.3 TEST ROZLIŠOVÁNÍ DĚLÍCÍCH LINIÍ

1) Melbournský test rozlišování dělicích linií

Melbournský test slouží ke zjišťování kontrastní citlivosti do blízka. Prototyp byl zkonstruován již v roce 1986. Skládá se z 15 terčů rozdělených na poloviny. Úkolem vyšetřovaného je rozlišit dělicí linii mezi oběma polovinami v osách 0°, 45°, 90° či 135°. K poklesu kontrastu mezi oběma polovinami dochází postupným snižováním intenzity světla mezi polovinami. V současnosti existuje mnoho verzí s různými řadami. [17, 23, 27]

4.2.4 DIGITÁLNÍ TESTOVÁNÍ KONTRASTNÍ CITLIVOSTI

V současnosti je možné kontrastní citlivost vyšetřit výše popsanými postupy na tištěných optotypech, ale také pomocí samostatných digitálních systémů nebo

počítačových programů instalovaných na počítačích se standardizovaným monitorem. Pro příklad je níže uvedeno několik ukázek.

1) Program od firmy Neuroscientific

Program testuje kontrastní citlivost pomocí sinusové mřížky o různých prostorových frekvencích a kontrastech. Sinusová mřížka je promítána na jedné polovině monitoru. Vyšetřovaný má za úkol určit, na které straně monitoru mřížku vidí.

2) Analyzátor zrakové kapacity

Program vytvořený v roce 2003, který umožňuje testovat kontrastovou citlivost za pomoci ETDRS optotypů různých velikostí a kontrastů. Vyšetření může probíhat i při různých intenzitách osvětlení monitoru. [17, 23, 27]

3) LCD systémy SmartChart, TCP-2000, CC 100P

Tyto LCD systémy, které nevyžadují externí počítač, obsahují komplexní soubor testů kontrastní citlivosti v 5 prostorových frekvencích (1,5; 3, 6, 12 a 18 c/st). [9]

4.3 KONCEPCE ZPRACOVÁNÍ KONTRASTU VE ZRAKOVÉ KŮŘE

Campbell a Robson roku 1969 uveřejnili závěry svých studií, kde popsali existenci tzv. spatially tuned channels, přičemž každý kanál reprezentuje informaci v konkrétní prostorové frekvenci, na kterou je nejvíce citlivý. Vizuální svět se skládá z jednotlivých komponent prostorových frekvencí, které jsou přenášeny právě oddělenými vizuálními kanály do kortexu, kde jsou zpracovány a opět rekonstruovány do celkového vjemu. Existence vizuálních kanálů byla prokázána pro zpracování jasů a informací o barvě. Díky odděleným vizuálním kanálům citlivým na různé prostorové frekvence se ukázalo, že sítnice není uniformní. Fovea je specializována pro vysokou ostrost, a tudíž zpracovává informace o vyšších prostorových frekvencích, zato periferní část sítnice je reprezentována kanály citlivými na nízké prostorové frekvence. [13, 18]

5 ČASOVÉ VLASTNOSTI STIMULŮ

Vidění je dynamická činnost zahrnující časté změny fixace, při kterých fovea přijímá různé druhy vizuálních informací. Zrakový systém je neustále zásobován informacemi trvale stimulujícími sítnici. Vizuální informace jsou dále zpracovány tak, aby se zdály stabilní a nepohyblivé. Vizuální systém potřebuje určitý čas potřebný k shromáždění a zpracování informací, a z tohoto důvodu reaguje omezeně na tempo změny stimulu. Pokud jsou stimuly prezentovány zrakovému systému přerušovaně, jsou vnímány jako oddělené do té doby, než tempo jejich prezentace dosáhne kritické úrovně, při které se pozorovateli stimul začne jevit jako kontinuální (neblinká, tj. přestane). Tato hranice se nazývá kritická hranice fúze blikání (Critical Flicker Fusion, CFF) a je závislá na mnoha charakteristikách stimulů a pozorovatele. Hlavním faktorem ovlivňujícím CFF je tzv. temporální (časová) sumace vizuálního systému. Temporální sumace udává schopnost sečíst za binokulárních podmínek kvantový účinek světla v určité kritické časové periodě (critical duration). Podle Blochova zákona je v rámci kritické časové periody dosaženo prahu, pokud je dosaženo maximální světelné energie. [2, 21]

Blochův zákon časové sumace

Blochův zákon říká, že maximální světelná energie je konstantní hodnota (K) a prahu je dosaženo, když světelný jas (L) a trvání stimulu (t) se rovná této konstantě,

$$L \cdot t \cdot n = K.$$

Parametr n reprezentuje temporální sumaci. Ze vzorce vyplývá, že pokud dojde ke snížení jasu L na poloviční hodnotu, k dosažení prahu je nutné zdvojnásobit dobu trvání t stimulu. Naopak při zdvojnásobení jasu dojde k dosažení prahu poloviční dobou trvání stimulu. Blochův vzorec také udává, zda je temporální sumace kompletní ($n = 1$), nebo částečná ($0 < n < 1$). Když $n = 0$, temporální sumace neexistuje.

Z výše popsaných informací plyne značný význam temporální (časové) charakteristiky stimulů pro detekci a rozpoznání podnětů. Při velmi nízké světelné úrovni se schopnost rozpoznat stimul řídí počtem detekovaných fotonů. Temporální sumace pak vede k Blochovu zákonu. [2, 21]

5.1 CRITICAL FLICKER FUSION

Termín Critical flicker fusion (CFF) je definován jako frekvence, při které se pro daný souhrn podmínek blikající světelný stimul jeví jako kontinuální (nepřerušovaný). Flicker v překladu znamená blikání (záblesky, kolísání jasu), které je definováno jako pocit nestálého zrakového vnímání vyvolaný světelným podnětem, jehož jas nebo spektrální rozložení kolísá v čase. Fusion Frequency znamená v překladu frekvence fúze (splnutí).

Ke zjištění CFF se využívá testové pole, které je v pravidelných intervalech zhasínáno a rozsvěceno (dochází k pravouhlému kolísání jasu). Pokud jsou přerušované stimuly prezentovány dostatečně rychle, vizuální systém je vnímá jako kontinuální (neblinkají). Přechod od vnímání blikání ke kontinuálnímu vnímání stimulu značí, že vizuální systém dosáhl hranice temporálního rozlišení. [2]

5.1.1 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ CFF

Účinek jasu na CFF

Obecně platí, že CFF se zvyšuje s rostoucím jasnem blikajícího stimulu. Tento vztah je znám jako Ferry – Porterův zákon, formulovaný koncem 19. století, který říká, že CFF je přes široké spektrum (0,5 – 10000 fotonů) úměrné logaritmu jasu blikajícího stimulu (L). Vztah bývá popisován vzorcem

$$CFF = a \log L + b,$$

kde a a b jsou konstanty. Ferry – Porterův zákon platí pro širokou škálu stimulačních podmínek. Za skotopických jasových podmínek, kdy vidění zprostředkovávají převážně tyčinky, je CFF poměrně nízké a naopak za fotopických podmínek (čípkové vidění) stoupá hodnota CFF na maximum (50 – 60 Hz).

Účinek chromatičnosti na CFF

Skotopický a fotopický systém mají rozdílnou spektrální citlivost. Lineární závislost mezi CFF a logaritmem jasu, vyplývající z Ferry – Porterova zákona, je platná pouze pro barevné stimuly. Nicméně vztah mezi CFF a funkcí jasu se pro různé vlnové délky mění. Funkce popisující zelené světlo (střední vlnová délka) je strmější než funkce pro

červenou (dlouhá vlnová délka). Strmější sklon křivky pro zelené stimuly je důkazem, že dráha pro zpracování informací z čípků citlivých na střední vlnové délky je rychlejší než dráha zpracovávající informace z čípků citlivých na dlouhé vlnové délky, a to pro přenos informací blízko CFF. CFF je nejnižší pro modré stimuly detekované krátkovlnnou drahou.

Účinek excentricity na CFF

CFF je odlišné pro tyčinky a čípky, proto závisí na podílu tyčinek a čípků ve stimulované oblasti. Tyčinky určují výslednou CFF při nízkých jasech a čípky při vyšších jasech. Při stimulaci fovey, tedy pouze čípků, se uplatňuje Ferry – Porterův zákon. Naopak při stimulaci extrafoveální části sítnice, kdy jsou ve stimulované oblasti zahrnuty i tyčinky, se platnost Ferry – Porterova zákona nepotvrzuje. Tato nelinearita je zvláště patrná při nízkých skotopických jasech, kdy tyčinky udržují CFF na vyšších hodnotách, než mohou obstarat osamocené čípky. Při konstantních hodnotách velikosti stimulu a jasů stoupá CFF s excentricitou přes centrálních 50° zorného pole a poté s dalším zvyšováním excentricity klesá.

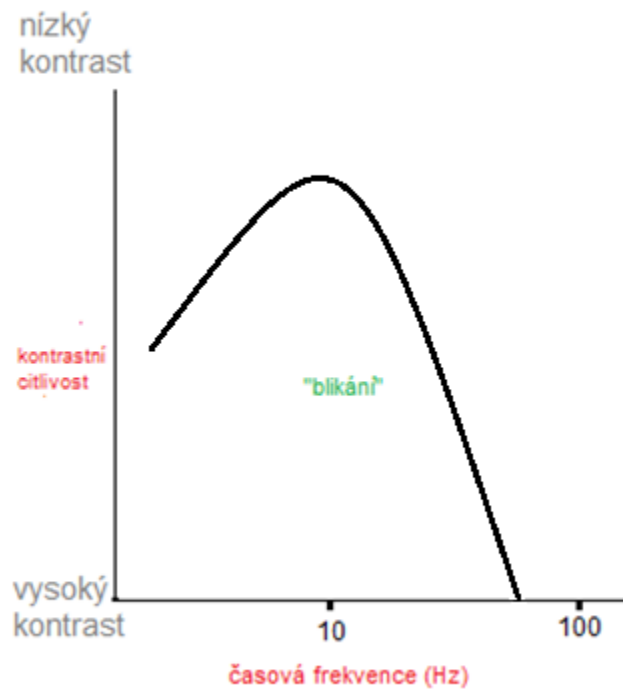
Účinek velikosti stimulovaného pole na CFF

CFF závisí také na velikosti stimulované oblasti sítnice. CFF se zvyšuje se zvyšující se velikostí stimulované oblasti, z čehož vyplývá, že k dosažení maximální CFF a maximálního temporálního rozlišení je zapotřebí stimulace velkým polem, které má nejkratší integrační čas. Pro široký rozsah jasů se CFF zvyšuje lineárně s log stimulované oblasti (Graint – Harperův zákon). [1, 20, 21]

5.2 TEMPORÁLNÍ FUNKCE KONTRASTNÍ CITLIVOSTI

Kontrastní citlivost vizuálního systému závisí na prostorových a časových vlastnostech stimulů. Prostorové vlastnosti stimulu jsou charakterizovány funkcí prostorové kontrastní citlivosti (contrast sensitivity function, CSF) a časové vlastnosti stimulu charakterizuje funkce časové kontrastní citlivosti (temporal sensitivity function, TSF, viz obr. 7). Z průběhu funkce je patrné, že se grafy CST a TSF podobají. Měření časové kontrastní citlivosti obvykle neprobíhá pomocí sinusové mřížky jako je tomu u testování CSF, nýbrž za stacionárních podmínek pomocí uniformního pole neměnného jasů.

Zjišťování TSF probíhá při kolísání jasu (blikání) – buďto pravoúhlém, nebo sinusoidálním. Graf TSF popisuje vzájemnou závislost frekvence blikání a kontrastu. Funkce CFF pak určuje průběh horní (prahové) hranice pro temporální citlivost, při jejímž překročení není možné rozpoznat, že světlo bliká. Prostor pod křivkou představuje oblast, kde je blikání detekováno. Vizuální systém je za kvalitních fotopických podmínek nejcitlivější na kolísání jasu v rozmezí 15 až 20 Hz. Za fotopických jasových podmínek je k rozeznání stimulu zapotřebí méně než 1 % kontrastu a CFF se za těchto podmínek nachází kolem 60 Hz. Při skotopických jasech se maximální kontrast nachází kolem 20 % a hranice pro detekci vysokých časových frekvencí za zmíněných podmínek je kolem 15 Hz. Pro detekci blikání o vysokých frekvencích je zapotřebí maximální kontrast stimulu. [1, 20, 21]



Obr. 7 – Funkce temporální kontrastní citlivosti

U funkce prostorové kontrastní citlivosti (CSF) byla prokázána přítomnost oddělených vizuálních kanálů, kde křivka prostorové kontrastní citlivosti zastřešuje více kanálů, z nichž každý je naladěn na jinou prostorovou frekvenci. Podobně jako u prostorového zpracování, existují důkazy o existenci oddělených kanálů pro časové zpracování, z nichž každý je naladěn na jiné časové frekvence. Filtry časové frekvence jsou méně

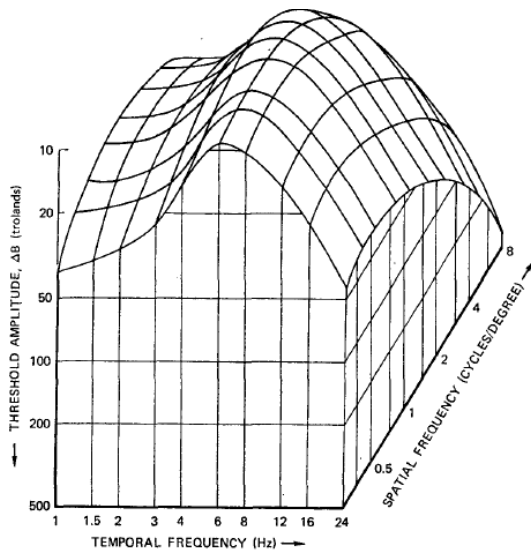
nezávislé než filtry předávající informace o prostorové frekvenci stimulu. Množství identifikovaných časových kanálů je závislé na prostorové frekvenci stimulu. [2, 21]

5.3 SPATIOTEMPORÁLNÍ FUNKCE KONTRASTNÍ CITLIVOSTI

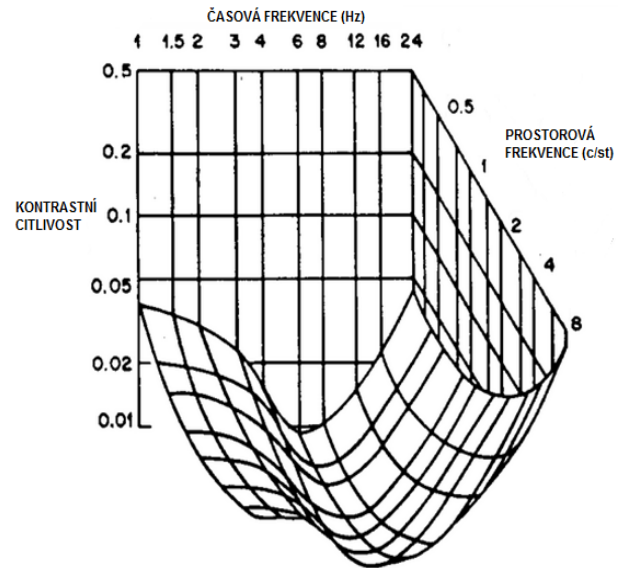
Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, citlivost lidského vizuálního systému na kontrast závisí na prostorových a časových vlastnostech stimulu. V reálném světě se totiž stimuly nacházejí v určitém prostoru a čase. Tento poznatek vedl k vytvoření tzv. spatiotemporální funkce kontrastní citlivosti, ve které jsou obsaženy obě funkce kontrastové citlivosti - CSF a TSF (obr. 8 A). Spatiotemporální kontrastní citlivostí se jako první zabýval Robson (1966). Měřil CSF ve čtyřech různých časových frekvencích a TSF ve čtyřech různých prostorových frekvencích. Kelly (1966) k měření spatiotemporální kontrastní citlivosti použil sinusoidální kolísáním jasu v daných časových frekvencích. K měření použil kruhové testové pole o průměru 16° s vertikálně orientovanou sinusovou mřížkou generovanou na obrazovce CRT monitoru. Měřil za binokulárních podmínek.

Graf spatiotemporální kontrastní citlivosti vytvořený Kellym je na obrázku 8 A. Jedna osa grafu popisuje temporální a druhá osa prostorovou frekvenci stimulu. Vrchol reprezentuje pozorovatelovu kontrastní citlivost za konkrétních prostorových a časových podmínek. Linie grafu probíhající paralelně s osou časové frekvence reprezentují TSF a linie grafu vedoucí paralelně s osou prostorové frekvence reprezentují CSF. Z grafu spatiotemporální funkce vyplývá, že za fotopických podmínek vykazuje vizuální systém nejmenší citlivost na kontrast v časových frekvencích okolo 6 Hz. [1, 2, 20, 21]

A



B



Obr. 8 – (A) Graf spatiotemporální kontrastní citlivosti Kelly (1966), (B) Graf Kellyho po vertikální rotaci, přeloženo (úprava: MUDr. Dostálek a autorka)

Na obrázku 8 B je zobrazen taktéž graf spatiotemporální kontrastní citlivosti změřený Kellym s tím rozdílem, že je vertikálně rotován. Graf 8 A má totiž hodnoty kontrastní citlivosti na ose y orientovány sestupně. Po vertikální rotaci došlo k inverzi hodnot na ose y.

6 EXPERIMENTÁLNÍ STUDIE VLIVU CYKLICKÉHO KOLÍSÁNÍ JASU OPTOTYPU NA KONTRASTNÍ CITLIVOST

6.1 CÍLE EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

Kontrastní citlivost je jedním z komplexních klinických ukazatelů kvality kortikálního zpracování vizuálních informací. Popisuje jak analýzu vysokých prostorových frekvencí parvocelulárním systémem, tak také detekci nízkých prostorových frekvencí systémem magnocelulárním. Teoretické znalosti o citlivosti parvocelulárního systému k nízkým časovým frekvencím a magnocelulárního systému naopak k vysokým časovým frekvencím nabízejí možnost oddělit vyšetření obou částí zrakové dráhy.

Experimentální část se snaží ověřit hypotézu, že je možné za pomoci pravoúhlého kolísání jasu oddělit vyšetření kontrastové citlivosti pro magnocelulární a parvocelulární systém. K měření bude použita kombinace konvenčního vyšetření kontrastní citlivosti s metodikou Critical Flicker Fusion. Dále v rámci experimentální části práce proběhne porovnání charakteristik kontrastní citlivosti zjištěných u souboru zdravých dospělých probandů na optotypu s časově proměnným jasem (pravoúhlé kolísání jasu ve třech různých frekvencích) se známými referenčními hodnotami pro stejný, ale stacionárně osvětlený optotyp. Hlavním cílem experimentální části je studium vlivu citlivosti parvocelulárního a magnocelulárního systému k prostorovým a časovým frekvencím na základě vyšetření kontrastní citlivosti za dále definovaných experimentálních podmínek.

6.2 STATISTICKÝ SOUBOR A METODIKA

Probandi

Výzkumu se zúčastnilo 20 probandů (9 mužů a 11 žen) ve věkovém rozmezí 15 – 41 let. Žádný z probandů neměl významnou refrakční vadu, ani jinou oční patologii. Podmínky zařazení do studie byly následující: Proband nikdy v minulosti neprodělal epileptický záchvat, ani netrpí jiným onemocněním CNS. Vízus dominantního oka s optimální korekcí dosahoval alespoň 1,0. Refrakční vada dominantního oka byla v rozmezí - 3,00

D až + 1,00 D a cyl do - 0,75 D. Žádná z aberací vyšších řádů nepřekročila hodnotu 0,150. Proband neměl žádnou další oční patologii, která by mohla ovlivnit výsledek měření (např. porucha barvocitu, onemocnění sítnice, porucha fotoreakce zornic).

Metodika

Měření proběhla ve vyšetřovně optometrie a specializované laboratoři na pracovišti Binocular s. r. o. - Centrum dětské oftalmologie v Litomyšli. Hlavní prvek používaný ke každému měření byla sinusová optotypová tabule CSV – 1000 v prostorových frekvencích 1, 5; 3; 6; 12 a 18 cyklů na stupeň vsazená do speciálně upraveného boxu opatřeného LED diodami generujícími pravoúhlé kolísání jasu. K boxu náležel prototyp regulačního zařízení, které prostřednictvím zpětnovazebného okruhu s fotometrickým článkem přibližně udržovalo nastavené hodnoty jasu optotypové tabule a které umožňovalo nastavovat frekvenci kolísání jasu. Hlavním komponentem regulačního zařízení byl procesor atmega8, který zajišťoval obsluhu digitálně kalibrovaného fotometrického čidla BH1750. Čidlo připevněné k optotypové tabuli přijímalo intenzitu osvětlení nejen optotypové tabule, ale i okolního prostředí. Z tohoto důvodu byla laboratoř během experimentu zatemněna. Hodnota osvětlení se zobrazovala na LCD displeji. Procesor dále řídil intenzitu osvětlení pásku LED diod pod optotypovou tabulí v rozsahu 1 - 65550 luxů a umožňoval nastavit požadovanou frekvenci kolísání jasu v rozsahu 0,1 Hz - 1 kHz.

Vyšetřovací vzdálenost mezi probandem a optotypovou tabulí byla 2,5 m, přičemž tabule byla instalována do pohledové osy probanda. Před každým měřením byla intenzita osvětlení v těsné blízkosti optotypové tabule nastavena na 270 lx (85 cd/m²), což bylo před každým měřením kontrolováno kalibrovaným fotometrem. Při každém vyšetření byly zajištěny stejné podmínky, čehož bylo docíleno mimo jiné zatemněním laboratoře. Každé vyšetření probíhalo anonymně – proband získal pořadové číslo (1 – 20), pod kterým byl evidován výsledek jeho měření. Každému měření předcházelo seznámení probanda s cílem studie, vysvětlení průběhu měření a poučení o možnosti vzniku nežádoucích zdravotních komplikací a podpis informovaného souhlasu.

Před samotným měřením byla probandovi nasazena zkušební brýlová obruba s neprůhlednou clonou před nedominantním okem. Měření kontrastové citlivosti při kolísavém jasu optotypu probíhalo monokulárně dominantním okem optimálně korigovaným do dálky. Samotné vyšetření sestávalo ze tří částí, mezi kterými byla

pětiminutová přestávka. V první části bylo nastaveno pravoúhlé kolísání jasu optotypové tabule na 80 Hz, v dalších částech na 20 Hz a 8 Hz. Proband měl za úkol rozlišit, který terč ze dvojice je vertikálně pruhovaný. Takto postupoval od sady A po sadu E, která obsahuje 5 řad sinusových pruhů s 5 prostorovými frekvencemi (1,5; 3, 6, 12 a 18 c/st). Sada A (1,5 c/st) má však odlišnou velikost terče, takže se výsledné hodnoty musely přepočítat. Hodnota kontrastu posledního správně rozeznávaného terče v řadě byla zakroužkována v protokolu.

Do studie byli zařazeni probandi z předchozí dosud nepublikované studie zabývající se vlivem Bangerterových filtrů na ovlivnění kontrastní citlivosti. Jejich data pro konstantní jas (0 Hz) byla použita i v této studii.

Metodika vyhodnocení

Zjištěná data byla statisticky zpracována dvouvýběrovým párovým t-testem na střední hodnotu na hladině významnosti 5 %. Tj. pravděpodobnost, že dojde k zamítnutí platné rovnosti, nepřesáhla 5 %. U výsledků je též uvedena mezní hladina významnosti p , při které by právě došlo k zamítnutí uvažované rovnosti. Bylo porovnáno procentní snížení kontrastu v nízkých (1,5, 3 a 6 c/st) a vysokých (12 a 18 c/st) frekvencích u jednotlivých rychlostí kolísání jasu optotypu (8 Hz, 20 Hz a 80 Hz) ve vztahu k referenční hodnotě kontrastu na neblíkajícím optotypu.

6.3 VÝSLEDKY

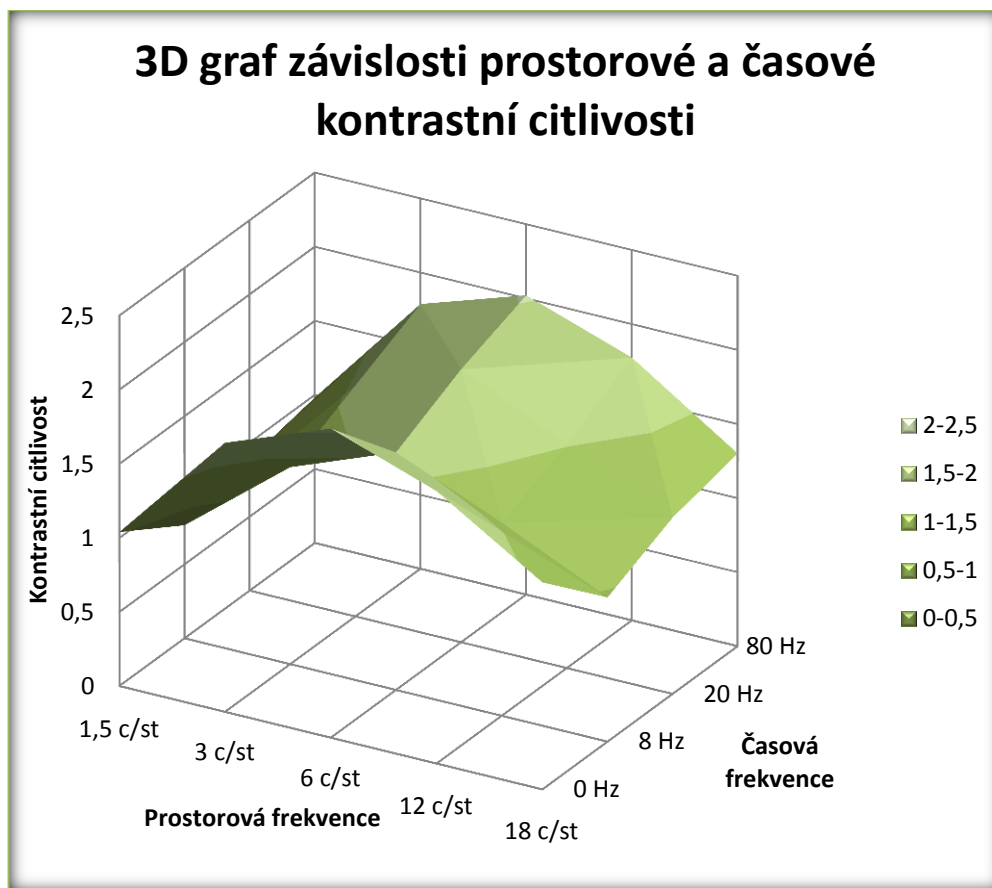
Probandů, jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, se zúčastnilo 20. Všechna změřená data byla zpracována a posléze statisticky vyhodnocena. Tab. 1 uvádí průměrné hodnoty spolu se směrodatnými odchylkami všech změřených probandů.

Tab. 1 – Průměrné absolutní hodnoty a směrodatné odchylky kontrastní citlivosti pro nízké a vysoké prostorové frekvence v závislosti na časové frekvenci

| | | <i>Frekvence kolísání jasu</i> | | | |
|--|--------------------------|--------------------------------|-------------|--------------|--------------|
| | | 0 Hz | 8 Hz | 20 Hz | 80 Hz |
| <i>Nízké prostorové frekvence</i> | 1,5 <i>k</i> c/st | 1,04 ± 0,10 | 0,76 ± 0,07 | 0,89 ± 0,10 | 0,98 ± 0,10 |
| | 3 c/st | 1,82 ± 0,13 | 1,33 ± 0,12 | 1,56 ± 0,15 | 1,79 ± 0,11 |
| | 6 c/st | 2,09 ± 0,10 | 1,60 ± 0,19 | 1,84 ± 0,14 | 2,02 ± 0,14 |
| <i>Vysoké prostorové frekvence</i> | 12 c/st | 1,84 ± 0,18 | 1,31 ± 0,16 | 1,51 ± 0,18 | 1,77 ± 0,16 |
| | 18 c/st | 1,40 ± 0,18 | 0,97 ± 0,19 | 1,19 ± 0,21 | 1,30 ± 0,16 |

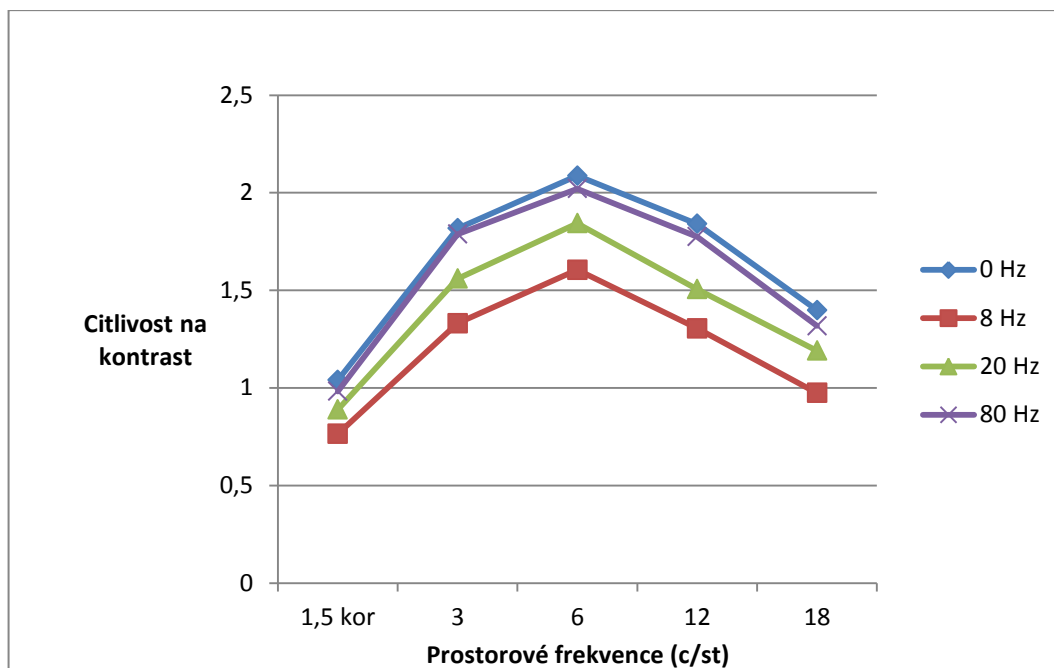
Veškerá změřená data byla zapsána do tabulky, kde v jednom sloupci byly uvedeny prostorové frekvence (c/st, cpd) sad A až E. Sada A (1,5 *k* c/st) však musela být z důvodu odlišné velikosti terče od ostatních sad přepočítána. Z tohoto důvodu se v tab. 1 u prostorové frekvence 1,5 c/st objevuje písmeno *k* (korigované). Pro všechny výpočty byly použity již přepočítané hodnoty.

Graficky jsou získané výsledky znázorněny v trojrozměrném grafu na obr. 9. Výchozími hodnotami grafu jsou průměrné hodnoty ze všech měření (viz tab. 1). Celý graf má sedlovitý tvar.



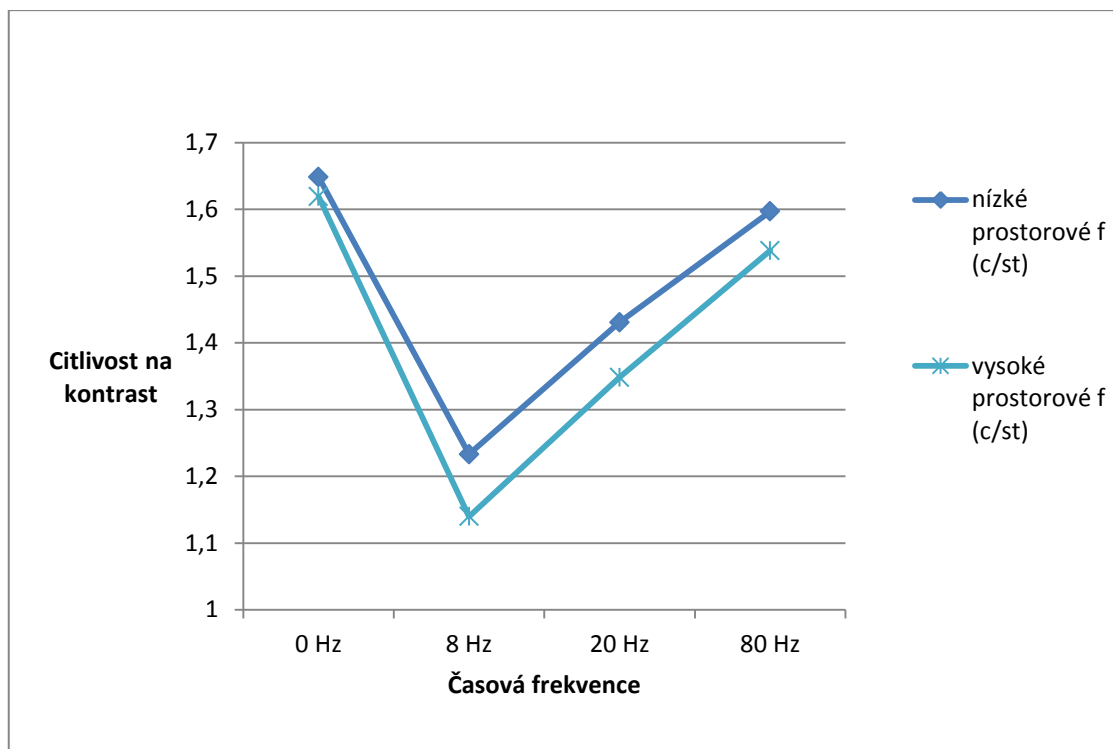
Obr. 9 – 3D graf závislosti kontrastní citlivosti na prostorové a časové frekvenci stimulu

Svislé řezy grafem, odpovídající jednotlivým časovým frekvencím, jsou pro větší přehlednost samostatně znázorněny na obr. 10. Z grafu je patrné, že nejvyšší citlivost na kontrast je v 6 c/st při všech typech kolísání jasu. Z grafu taktéž vyplývá, že kontrastní citlivost při kolísání jasu 80 Hz se blíží k hodnotám při kolísání jasu 0 Hz. Nejnižších hodnot citlivosti na kontrast v jednotlivých prostorových frekvencích bylo dosaženo při kolísání jasu 8 Hz, to jasně ukazuje červená křivka (a také graf na obr. 9). Dále z grafu vyplývá, že nejvyšších hodnot citlivosti na kontrast bylo dosaženo při stacionárně osvětleném optotypu (0 Hz) a při kolísání jasu 80 Hz, kdy pozorovatel většinou subjektivně nezaznamenal, že podklad ještě bliká, a obraz se mu zdál stacionární.



Obr. 10 - Graf průměrné citlivosti na kontrast pro jednotlivé časové frekvence v závislosti na prostorových frekvencích.

Poslední graf na obr. 11 reprezentuje závislost kontrastní citlivosti na časové frekvenci pro všechny nízké (1,5, 3, 6 c/st) a vysoké (12, 18 c/st) prostorové frekvence. Data pro tento graf vycházejí z průměrných hodnot kontrastní citlivosti pro uvedené nízké a vysoké prostorové frekvence za různých podmínek kolísání jasu. Oba typy prostorových frekvencí dosahují shodně minima při 8 Hz, a to 1,14 pro vysoké a 1,23 pro nízké prostorové frekvence. Nejvyšších hodnot bylo dosaženo pro stacionární optotyp (zde se též data pro frekvence nejvíce přibližují) a pro maximální frekvenci blikání 80 Hz, kde je jejich rozdíl druhý nejmenší. Naopak největší rozdíl mezi oběma frekvenčními složkami je v jejich společném minimu.



Obr. 11 – Graf závislosti kontrastní citlivosti na časové frekvenci

K samotnému statistickému zpracování byly použity průměrné hodnoty relativního (procentního) snížení kontrastu v nízkých a vysokých prostorových frekvencích u jednotlivých rychlostí kolísání jasu ve vztahu k hodnotám kontrastu na neblinkajícím optotypu. Tab. 2 ukazuje průměrné hodnoty a směrodatné odchylky procentního snížení v jednotlivých frekvencích blikání pro vysoké a nízké prostorové frekvence. Poté byl pro každou frekvenci kolísání jasu (8, 20 a 80 Hz) použit dvouvýběrový párový t-test na střední hodnotu pro relativní průměrné hodnoty vysokých a nízkých prostorových frekvencí.

Tab. 2 – Průměrné relativní hodnoty a příslušné absolutní odchylky relativních hodnot vysokých a nízkých prostorových frekvencí, vztažených k referenční hodnotě při 0 Hz.

| | <i>Frekvence kolísání jasu</i> | | |
|----------------------------|--------------------------------|--------------|--------------|
| | 8 Hz | 20 Hz | 80 Hz |
| <i>Nízké prostorové f</i> | 74,81 ± 6,34 | 86,90 ± 6,71 | 96,94 ± 6,77 |
| <i>Vysoké prostorové f</i> | 70,46 ± 7,98 | 83,75 ± 8,58 | 95,99 ± 8,97 |

Provedená statistická analýza udává, že frekvence kolísání jasu optotypu 8 Hz, kde byl zaznamenán největší rozdíl nízko- i vysoko-frekvenčních složek, sice nevykazuje statisticky významnou diferenci na požadované hladině významnosti 0,05, ale zjištěná mezní hladina významnosti $p = 0,064$ se požadované signifikanci přibližuje a významnost rozdílu naznačuje. Kolísání jasu 20 Hz nemá statisticky významný rozdíl na vysoké a nízké prostorové frekvenci při hodnotě $p = 0,08$ stejně jako pro mezní hodnotu 80 Hz ($p = 0,66$). Při frekvenci kolísání jasu 80 Hz vyšla hodnota $p = 0,66$, což značí, že za zmíněných podmínek taktéž není rozdíl ve vnímání vysokých a nízkých prostorových frekvencí.

Tab. 3 – Průměrné hodnoty kontrastní citlivosti při kolísání jasu 0 Hz a 80 Hz pro jednotlivé prostorové frekvence

| | | <i>Prostorové frekvence</i> | | | | |
|-------------------------|--------------|-----------------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| | | 1,5 k c/st | 3 c/st | 6 c/st | 12 c/st | 18 c/st |
| <i>Časové frekvence</i> | 0 Hz | 1,04 | 1,82 | 2,09 | 1,84 | 1,40 |
| | 80 Hz | 0,98 | 1,79 | 2,02 | 1,77 | 1,32 |

Na závěr statistického zpracování dat byly též t-testem porovnány naměřené hodnoty v 0 Hz a 80 Hz pro jednotlivé prostorové frekvence (průměrné hodnoty viz tab. 3). Z provedené statistiky vyplynulo, že kolísání jasu 80 Hz má oproti stacionárnímu optotypu (0 Hz) vliv jen na extrémně nízké (1,5 c/st) a vysoké (18 c/st) prostorové frekvence ($p = 0,035$ a $p = 0,048$). Zjištěné průměrné rozdíly však jsou relativně malé (0,06 a 0,08). U ostatních prostorových frekvencí nebyl prokázán významný rozdíl mezi hodnotami při 0 Hz a 80 Hz (pro 3 c/st bylo $p = 0,33$, pro 6 c/st $p = 0,08$ a 12 c/st $p = 0,09$).

6.4 DISKUZE

Výsledky provedeného experimentu naznačují, že kolísání jasu 8 Hz může mít rozdílný vliv na nízké a vysoké prostorové frekvence. Toto tvrzení též podporují výsledky navazující studie probíhající na stejném pracovišti a za stejných podmínek s tím rozdílem, že probandí jsou amblyopové. Data z prvních třech měření vedoucích očí

amblyopiů doplněná k datům probandů měřených v této diplomové práci (při kolísání jasu 8 Hz) změni naznačenou signifikanci tohoto srovnání v signifikanci úplnou ($p = 0,035$). Naopak kolísání jasu o frekvencích 20 Hz a 80 Hz má na obě frekvenční složky srovnatelný vliv. Při analýze extrémních (0 Hz a 80 Hz) frekvencí změn jasu byl zjištěn jejich odlišný vliv pouze u nejvyšších a nejnižších prostorových frekvencí.

Hlavním cílem experimentu bylo prakticky ověřit citlivost na kontrast magnocelulárního a parvocelulárního systému za různých podmínek. Největší motivací ke studiu bylo ověření hypotézy, že pomocí kolísání jasu v různých frekvencích je možné oddělit vyšetření magnocelulární a parvocelulární dráhy. Je známo, že magnocelulární systém vykazuje vyšší citlivost na nízké prostorové frekvence, nízký kontrast a vysoké časové frekvence, a má proto vysokou hodnotu Critical Flicker Fusion (CFF) – viz kapitoly 1.3.2 a 3.2. Naopak systém parvocelulární je citlivý především na vysoké prostorové frekvence, vysoký kontrast, nízké časové frekvence, a má proto i nízký CFF – viz kapitoly 1.3.1 a 3.2. Jako nejprůkaznější se ukázalo porovnat relativní změny kontrastní citlivosti oproti referenční hodnotě 0 Hz. Výsledky výzkumu naznačují, že parvocelulární a magnocelulární systém se při kolísání jasu nechovají vždy shodně (viz graf na obr. 11). Křivka reprezentující nízké prostorové frekvence vlastně představuje magnocelulární systém a druhá křivka (vysoké prostorové frekvence) systém parvocelulární. Z průběhu grafu a provedené statistiky je patrné, že citlivost obou systémů je při stacionárně osvětleném optotypu prakticky shodná, zato v 8 Hz dochází k rozdílné reakci magno- a parvo- systému, která byla naznačena i statisticky. Magno- systém je při této frekvenci více zatížen (nižší hodnoty kontrastní citlivosti) než systém parvocelulární. Od 8 Hz mají křivky relativně paralelní průběh, což značí podobné „zatížení“ parvo- a magno- systému. Jedním z cílů práce bylo zjistit, při jaké frekvenci kolísání jasu se chová magno- a parvo- systém odlišně. Odpověď na tuto otázku podává předložený výzkum. Odlišné chování magno- a parvo- systému bylo zjištěno za zmíněných podmínek (viz metodika) při kolísání jasu na 8 Hz.

Otázkou zůstává, proč zrovna v 8 Hz se parvo- a magno- systém chová odlišně? Přesná odpověď není známa, svoji roli zde ale bude určitě hrát vyšší citlivost magnocelulárního systému k pohybu. Parvo- systém není stavěn na kompenzaci dynamické „překážky“, na rozdíl od systému magno-, který se s kolísáním jasu na 8 Hz lépe vyrovná. Nabízí se také otázka, jestli svou roli nehraje i CFF. Jak je uvedeno v teoretické části práce (viz kapitola 5.1), CFF se nachází za fotopických podmínek někde okolo 60 Hz (záleží na

mnoha dalších faktorech – viz stejná kapitola). Z naměřených dat sice prokazatelně nevyplývalo, že při kolísání jasu 80 Hz se hodnoty citlivosti na kontrast rovnají hodnotám pro stacionárně osvětlený optotyp, ale otázkou zůstává, jestli by se s větším počtem naměřených probandů hypotéza nepotvrdila. Každopádně magno- i parvodráha má pravděpodobně CFF za stejných podmínek v odlišném místě, což by svědčilo pro jejich odlišné chování v 8 Hz. To by ale bylo třeba proměřit i jiné časové frekvence, než které byly měřeny v této práci.

Pro lepší ukázkou toho, co praktická část práce popisuje, by bylo vhodné porovnat výsledky se známými daty pro spatiotemporální citlivost na kontrast prezentovanými v kapitole 5.3 této práce a vycházejících ze studie Kellyho [30]. Graf B na obr. 8 (vertikálně rotovaný graf A) představuje spatiotemporální funkci naměřenou Kellym roku 1966. Tento graf se svým průběhem velmi blíží naměřenému grafu v této diplomové práci (viz graf na obr. 9). Z dat získaných v této diplomové práci plyne, že při kolísání jasu 8 Hz jsou hodnoty kontrastní citlivosti nejnižší u všech měřených prostorových frekvencí. V pomyslné nejnižší linii (pro zmíněných 8 Hz) je nejvyšší citlivost na kontrast v 6 c/st (viz graf na obr. 10). Tento poznatek je víceméně pro oba grafy shodný. Ovšem v Kellyho grafu je patrná nejnižší citlivost na kontrast při 6 Hz (v této práci však měření při kolísání jasu 6 Hz neproběhlo, takže otázkou zůstává, jaké výsledky by přineslo měření i na této frekvenci). Od této hodnoty začíná citlivost na kontrast opět stoupat až k časové frekvenci 24 Hz (více nemá Kelly změřeno). Ze získaných dat vyplývá, že na frekvenci 8 Hz je minimum pro oba systémy a od této frekvence začne citlivost na kontrast taktéž stoupat. Je otázkou, zda by se celý Kellyho graf svým tvarem nepodobal grafu změřenému v této práci, kdyby Kelly měřil i ve vyšších časových frekvencích. Je však nutno podotknout, že Kelly měřil za jiných podmínek – používal např. sinusoidální kolísání jasu (oproti pravoúhlému kolísání jasu použitému při měření v této práci), lišily se vnější podmínky, odlišná byla i velikost testového pole – a pracoval také v jiném rozsahu (viz např. odlišné hodnoty prostorové i časové frekvence, větší množství probandů) než my při získávání dat pro graf v této diplomové práci. Možná právě z důvodu odlišných podmínek grafy nevykazují úplnou shodu. V literatuře lze navíc nalézt graf s nejnižší citlivostí na kontrast taktéž v 8 Hz. [32]

Pro podporu výzkumné části slouží také graf na obr. 10. Na zmíněném grafu je patrné, že nejvyšší kontrastní citlivost je v 6 c/st. Tento poznatek se blíží známému faktu, že nejvyšší citlivost na kontrast je ve středních prostorových frekvencích (viz kap. 4.1).

ZÁVĚR

Předložená diplomová práce se zabývala širokou problematikou zpracování a vyhodnocování vizuálních informací. Snažila se popsat a uvést v souvislost problematiku kortikálního vyhodnocení vizuální informace na základě citlivosti vizuálního systému na kontrast. Kontrastní citlivost je jedním z celkových klinických ukazatelů kvality zpracování vizuálních informací na kortikální úrovni. Úvodní kapitoly teoretické části práce popisovaly magnocelulární a parvocelulární systém. Zaměřily se na popis parvocelulárních a magnocelulárních gangliových buněk, které jsou výchozím bodem v procesu zpracování vizuální informace. Úvodní část práce obsahovala také informace týkající se receptivních polí. Navazující kapitola popisovala zrakovou dráhu a zaměřila se na popis analytických a asociačních oblastí vizuálního mozku. Další kapitola teoretické části přinesla informace z fyziologie kontrastní citlivosti, představila testy a metody využívané k zjišťování prostorové kontrastní citlivosti. Závěrečná část teorie se zabývala časovými vlastnostmi vizuálních stimulů a popisem časové kontrastní citlivosti. Poslední kapitola popsala spatiotemporální funkci kontrastní citlivosti společně s problematikou *Critical Flicker Fusion*.

Experimentální část diplomové práce se zabývala změnami citlivosti parvocelulárního a magnocelulárního systému k prostorovým a časovým frekvencím při vyšetřování citlivosti na kontrast. Získané poznatky ukázaly, že pravoúhlé kolísání jasu optotypu na frekvenci 8 Hz má oproti stacionárně osvětlenému optotypu (0 Hz) naznačeně rozdílný vliv na nízké (1,5, 3 a 6 c/st) a vysoké (12, 18 c/st) prostorové frekvence. V dalších měřených frekvencích (20, 80 Hz) nebyl rozdíl prokázán. Výsledky ukázaly, že by bylo teoreticky možné oddělit vyšetření magnocelulárního (resp. nízkých prostorových frekvencí) a parvocelulárního systému (resp. vysokých prostorových frekvencí) právě při kolísání jasu v 8 Hz. Zjištěný poznatek by mohl být považován za normu (měřeno na zdravých probandech). U probanda s prostou refrakční vadou by se dalo předpokládat snížení citlivosti na kontrast při zachování stejného průběhu křivek (norma). Kdežto u poruch zasahujících pouze magno- či parvo- systém by se dal očekávat posun pouze jedné křivky oproti křivce druhé (popř. každé jinam). Sledována byla také změna citlivosti na kontrast v 0 Hz a 80 Hz pro jednotlivé prostorové frekvence. Ukázalo se, že kolísání jasu 80 Hz má oproti stacionárnímu optotypu (0 Hz)

vliv jen na extrémně nízké (1,5 c/st) a vysoké (18 c/st) prostorové frekvence. U ostatních prostorových frekvencí nebyl prokázán významný rozdíl mezi hodnotami při 0 Hz a 80 Hz.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BARTEN, P. G. J. *Contrast Sensitivity of the Human Eye and Its Effects on Image Quality*. Bellingham, USA: SPIE Optical Engineering Press, 1999, ISBN 0-8194-3496-5.
- [2] LEVIN L. A., NILSSON S. F. E., VER HOEVE J., WU S. M. *Adler's Physiology of the Eye – 11th Edition*. Saunders, 2011 Elsevier, ISBN 978-0-323-05714-1.
- [3] PALMER, S. E. *Vision Science*. Cambridge, USA: The MIT Press, 1999, ISBN 9780262161831.
- [4] STINDWILL D., FLETCHER R. *Normal Binocular Vision*. New Jersey: Willey-Blackwell Publishing, 2011, ISBN 978-1-4051-9250-7.
- [5] VAN ESSEN, D. C., ZEKI, S. M. *The topographic organization of rhesus monkey prestriate cortex*. The Journal of Physiology. Vol. 277, 1978, pp. 193 – 226. ISSN 1469-7793.
- [6] DIVIŠOVÁ, G. a kol., *Strabismus*. Praha: Avicenum, 1979, ISBN-802010037-7.
- [7] KUCHYNKA, P. a kol. *Oční lékařství*. Praha: Grada Publishing, 2007, ISBN 978-80-247-1163-8.
- [8] UNGERLEIDER, L. G., HAXBY, J. V. 'What' and 'where' in the human brain. USA: Current Opinion in Neurobiology. Vol. 4, 1994. ISSN 0959-4388.
- [9] VENTRUBA, J. *Kontrastní citlivost, testování a příčiny jejího snížení*. Česká oční optika, roč. 49, 2008, č. 1, str. 70 – 71. ISSN 1211-233X.
- [10] PELLI, D. G., BEX, P. *Measuring contrast sensitivity*. Vision Research. Vol. 90, 2013, pp. 10 – 14. ISSN 0042-6989.
- [11] ŠIKL, R. *Zrakové vnímání*. Praha: Grada Publishing, 2012, ISBN 978-80-247-3029-5.
- [12] TROJAN, S. a kol. *Lékařská fyziologie*. Praha: Grada Publishing, a. s., 2003, ISBN 80-247-0512-5.
- [13] ARDEN, G. B. *The importance of measuring contrast sensitivity in cases of visual disturbance*. British Journal of Ophthalmology, Vol. 62, 1978, pp. 198 – 209, ISSN 1468-2079.
- [14] MOLOTCHNIKOFF, S., ROUAT, J. *Visual Cortex, Current Status and Perspectives*. InTech, 2012, ISBN 978-953-51-0760-6.

- [15] KVAPILÍKOVÁ, K. *Anatomie a embryologie oka*. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 2000, ISBN 80-7013-313-9.
- [16] HUBEL, D. H., WIESEL, T. N. *Receptive fields of single neurones in the cat's striate cortex*. USA: J Physiol., 1959. Vol. 148, pp. 574–591.
- [17] ROZSÍVAL, P. a kol. *Trendy soudobé oftalmologie, svazek 4*. Praha: Galén, 2007, ISBN 978-80-7262-470-6.
- [18] WANDELL, B. *Foundations of Vision*. USA: Sinauer Associates, 1995, ISBN-0878938532.
- [19] MAI J. K., PAXINOS G. *The Human Nervous System – 3th Edition*. USA, 2012, ISBN 978-0-12-374236-0.
- [20] ROSENFELD, M., LOGAN, N. *Optometry: Science, techniques and Clinical Management*. Philadelphia, USA: Elsevier, 2009 ISBN 978-0750687782.
- [21] KALLONIATIS, M., LUU, CH. *Temporal Resolution*. Dostupné z <http://webvision.med.utah.edu/book/part-viii-gabac-receptors/temporal-resolution/>.
- [22] POLÁŠEK, J. *Technický sborník oční optiky*. Praha: Státní tiskárna, 1974.
- [23] LIŠKA, V. *Citlivost na kontrast*. Česká a slovenská oftalmologie, roč. 52, 1996, č. 1, str. 39 – 43. ISSN 0009-059X.
- [24] PELI, E. *Contrast in complex images*. Journal of the Optical Society of America A. Vol. 7, No. 10, 1990, pp. 2032 – 2040, ISSN 1520-8532.
- [25] INGLE, DAVID J. et al. *Analysis of Visual Behavior*. London: The MIT Press, 1982, ISBN 0-262-09022-8.
- [26] LIVINGSTONE, M. S., HUBEL, D. H. *Psychophysical Evidence for Separate Channels for the Perception of Form, Color, Movement, and Depth*. Washington: The Journal of Neuroscience. Vol. 7, 1987, pp. 3416-3468, ISSN 0270-6474.
- [27] ANTON, M. *Refrakční vady a jejich vyšetřovací metody*. Národní centrum ošetřovatelství a nelékařských zdravotnických oborů v Brně, 2004, ISBN 80-7013-402-X.
- [28] FUKA, J., HAVELKA, B. *Optika – fyzikální kompendium*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1961. Dostupné z http://www.opto.cz/fuka_havelka/index.html.
- [29] Ústav normální anatomie LF UPOL. *Neuroanatomie I. – Struktury CNS* [online].[cit. 2016-04-02]. Dostupné z <http://www.nan.upol.cz/neuro/obsah.html>
- [30] KELLY, D. H. *Adaptation effects on spatio-temporal sine-wave thresholds*. GB: Vision Reseach, Vol. 12, 1972, pp. 89 – 101.

[31] DOSTÁLEK, M. *Fyziologie BV analytická a asociační složka* [přednáška]. Brno: Lékařská fakulta MU, 2014.

[31] ResearchGate [online]. © 2008-2016 [cit. 2016-11-21]. Dostupné z https://www.researchgate.net/figure/3327436_fig3_Fig-3-a-Nonlinear-MPE-bit-allocation-results-in-the-3-D-spatio-temporal-frequency

[32] Úvod do centrální nervové soustavy [online]. [cit. 2016-11-10]. Dostupné z <http://www.cnsonline.cz>