

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: N 2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3902T005 – Automatické řízení a inženýrská informatika

ZADÁNÍ DIPLOMY

Měření detekčních charakteristik a testování pohybového PIR senzoru

Measurement of detection characteristics and testing a motion PIR sensor

Diplomová práce

Autor:

Tomáš Vorel

Vedoucí práce:

Doc. Ing. Miroslav Svoboda

Konzultant:

Ing. Jiří Dašek, Jablotron s.r.o.

V Liberci 16. 5. 2008

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146089491

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Ústav řízení systémů a spolehlivosti

Akademický rok: 2007/2008

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: **Tomáš Vorel**

studijní program: N 2612 – Elektrotechnika a informatika

obor: 3902T005 – Automatické řízení a inženýrská informatika

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona o vysokých školách č.111/1998 Sb. určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu:

Měření detekčních charakteristik a testování pohybového PIR senzoru

Zásady pro vypracování:

1. Seznámit se s funkcí a možnostmi použití PIR čidel. Zhotovit podklady pro měření PIR čidel.
2. Pro měření detekčních charakteristik PIR čidel použít měřicí terč se stabilizovanou a přesně nastavitelnou teplotou.
3. Vytvořit simulaci pohybujícího se tepelného objektu pro měření dynamických detekčních charakteristik vícenásobných PIR senzorů.
4. Změřit detekční vlastnosti soustavy PIR senzoru a čočky .
5. Z naměřených charakteristik stanovit požadavky na vstupní obvody a detekční algoritmy PIR detektorů.

RSS

+CD

V 26/08 M

56 sy Ps. ml.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

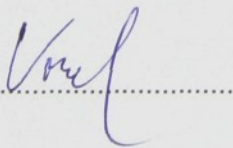
Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

15.6.2008

Podpis



Poděkování

Poděkování za pomoc při vzniku této diplomové práce patří především panu Doc. Ing. Miroslavovi Svobodovi a konzultantovi Ing. Jiřímu Daškovi. Všem děkuji za strávený čas s touto prací při řešení její problematiky. Děkuji firmě Jablotron s.r.o. za finanční podporu.

Abstract

The purpose of this work is to provide information about the operation of a system for detecting and identifying intruders in a building. The system is based on a network of sensors and a central processing unit. The sensors are installed in the building and detect any movement or sound. The central processing unit receives the data from the sensors and processes it to identify the intruder. The system is designed to be easy to install and use. It can be used in a variety of settings, including homes, businesses, and public buildings. The system is also designed to be secure and reliable. It can detect and identify intruders even in the presence of noise and other distractions. The system is a valuable tool for protecting buildings and their occupants. It can help to prevent theft, vandalism, and other crimes. It can also help to identify intruders and provide evidence for law enforcement. The system is a simple and effective way to protect your building and your family.

Tomáš Vorel

Abstrakt

Cílem diplomové práce je seznámit se s funkcí a možnostmi použití PIR senzorů pro zabezpečovací systémy. Změřit jejich dynamické vlastnosti a zhodnotit funkci Fresnelovy čočky s PIR senzorem. Dále stanovit požadavky na vstupní obvody a detekční algoritmy PIR detektorů z naměřených charakteristik. Úvod je zaměřen na princip a použití PIR senzorů. Převod výstupního napětí na vhodný signál pro následné zpracování pomocí osciloskopu a multimetru. Je zde změřeno pět PIR senzorů s různými vlastnostmi a použitím, které se nejvíce používají v zabezpečovací technice. Dále je popsán měřicí terč s přesně nastavitelnou teplotou a návrh pro simulaci pohybujícího se objektu pro změření dynamických charakteristik vícenásobných PIR senzorů. Předposlední kapitola se věnuje Fresnelově čočce a jejím použitím k naměřeným charakteristikám všech měřených PIR senzorů.

Abstract

The aim of this thesis is to provide information about the function and options for using PIR sensors for security systems. To gauge their dynamic properties and assess the function of a Fresnel lens with a PIR sensor. Also to determine the requirements for the input circuits and detection algorithms of PIR detectors from the characteristics measured. The introduction focuses on the principle and use of PIR sensors. Conversion of the output voltage into a suitable signal to then be processed using an oscilloscope and multimeter. This work measures five PIR sensors with a variety of properties and uses which are most commonly used in security equipment. It also describes a measuring target with a precisely adjustable temperature and a design for simulating a moving object in order to measure the dynamic characteristics of multiple PIR sensors. The penultimate chapter covers Fresnel lens and its use with respect to the measured characteristics of all the PIR sensors measured.

Obsah:

Obsah:	6
Seznam pojmů a použitých zkratk:	8
1. Úvod	9
2. PIR senzory	10
2.1 Analogové a digitální zpracování	10
2.2 PIR čidla	10
2.3 MW čidla	11
2.4 Kombinovaná čidla	11
2.5 Výhody a nevýhody PIR senzorů	12
2.6 Použití PIR senzorů	12
2.7 Stručný princip PIR senzorů	12
2.7.1 Konstrukce PIR senzorů	13
2.7.2 Funkce PIR senzorů v praxi	14
3. Popis měřicího zařízení pro PIR čidla	16
3.1 Blokové schéma rozmístění jednotlivých částí modulu	17
3.2 Měřicí terč s přesně nastavitelnou teplotou	18
3.2.1 Funkce mikroprocesorového regulátoru J-110 a jeho nastavení	18
3.2.2 Triaková regulace výkonu pro topné těleso	19
3.3 Zesilovací modul s operačním zesilovačem MCP602	21
3.3.1 Výběr vhodného OZ pro PIR čidla	21
3.3.2 Zesilovací modul pro PIR čidlo	21
3.3.3 Návrh tištěného spoje zesilovacího modulu	25
3.3.4 Požadavky na vstupní obvody a detekční algoritmy PIR senzorů	25
3.4 Napájecí zdroje	27
3.5 Zobrazení	27
4. Měřené PIR senzory	28
4.1 Způsob měření dynamických vlastností PIR senzoru	28
4.2 Způsob měření teplotních vlastností elementů PIR senzoru	28
4.3 PIR senzor RE200B	29
4.4 PIR senzor LHI878	32
4.5 PIR senzor IRS-A200ST01-R1	35
4.6 PIR senzor CSL-051	38
4.7 PIR senzor LHI1128	41
5. Souhrn naměřených hodnot PIR senzorů	45

6. Fresnelova čočka	47
6.1 Princip Fresnelových čoček	47
6.2 Druhy Fresnelových čoček	47
6.3 Teoretický rozbor vlastností Fresnelovy čočky s PIR senzorem	48
6.4 Praktický rozbor vlastností Fresnelovy čočky	50
7. Závěr	54
Použitá literatura	56
Příloha A – Elektrické zapojení triakové regulace výkonu	
Příloha B – Elektrické zapojení zesilovacího modulu	
Příloha C – Horní vějíř – maximální rychlosti	
Příloha D – Horní vějíř – minimální rychlosti	
Příloha E – Střední vějíř – maximální rychlosti	
Příloha F – Střední vějíř – minimální rychlosti	
Příloha G – Dolní vějíř – maximální rychlosti	
Příloha H – Dolní vějíř – minimální rychlosti	
Příloha na CD – Použité materiály.....	(A – B)
Příloha na CD – Katalogové listy (datasheets), grafy.....	(C – H, J - L)
Příloha na CD – Soubory z vývojového prostředí Eagle.....	(I)

Seznam pojmů a použitých zkratk:

U_{out1}	Výstupní napětí OZ1
IR	Infračervené záření
PIR	Pyroelectric InfraRed senzor
U_{out}	Výstupní měřené napětí
$U_{outčidla}$	Výstupní napětí PIR senzoru
A_{u1}	Zesílení OZ1
A_{u2}	Zesílení OZ2
$A_{ucelkový}$	Celkové zesílení OZ1 s OZ2
f_{mez}	Mezní frekvence filtru
α	Zorný úhel detekční zóny
L_B	Délka bloku
$L_{ohn-čoč}$	Vzdálenost ohniska od čočky
$L_{onh-obj}$	Vzdálenost ohniska od objektu
L_{DO}	Velikost detekčních oblastí v určité vzdálenosti
α_c	Úhel od středu celé detekční zóny po jednotlivé hranice detekčních oblastí
L_{VZD}	Vzdálenost od středu celé detekční zóny po jednotlivé hranice detekčních oblastí

1. Úvod

Senzory pohybu jsou nejvýznamnějšími prvky zabezpečovacích systémů, které jsou již v dnešní době rozšířeny po celém světě. Mezi ně patří i pyroelektrické senzory reagující na infračervené záření. Tyto senzory jsou nejrozšířenější díky své spolehlivosti při detekci objektu a jednoduchosti v provedení.

Pyroelektrické snímače označované jako PIR senzory jsou vytvořeny z krystalického materiálu, který při ozáření infračerveným světlem generuje povrchový náboj. Změní-li se hodnota dopadajícího záření, změní se i hodnota elektrického náboje, na který reaguje citlivý FET tranzistor umístěný přímo v PIR senzoru. Jelikož je pyroelektrický senzor citlivý na infračervené záření ve velkém rozsahu, je před ním umístěn filtr, který propouští určité vlnové délky okolo $9,4 \mu\text{m}$. Tato vlnová délka je specifická pro vyzařování lidského těla.

Infračervené detektory se dají klasifikovat podle několika kritérií. Jedno z kritérií je založeno na jediném detektoru, kterým mohou být např. fotodiody citlivé na infračervené záření nebo detektory založené na větším množství takovýchto detektorů. Druhé z kritérií jsou složitější detektory používané zejména v astronomii nebo v technice pro noční vidění. Tyto detektory jsou ovšem naneseny na zvláštní polovodičové materiály, které se musí chladit a jsou velmi drahé. Proto se používají např. ve vojenské technice.

Úroveň signálu PIR snímačů může být velice malá, proto se nanášejí přímo na křemíkovou destičku, kde je i zesilovací prvek, aby zesilovač byl co nejblíže k pyroelektrickému snímači.

Úspěch pyroelektrických detektorů v zabezpečovací technice je vysoký i přes menší kvalitu a citlivost, než je u tradičních infračervených snímačů. Jejich nízká cena díky křemíkové technologii umožňuje použití v různých zařízeních, jako např. v zabezpečovací technice, ve zdravotnictví, k monitorování dopravy a další.

2. PIR senzory

Jedním z nejznámějších a nejviditelnějších prvků elektronických zabezpečovacích systémů jsou pohybová čidla. Za mnoho let používání byly vyzkoušeny různé technologie pro sledování pohybu osob ve střeženém objektu. Není jednoduché vybrat vhodnou technologii a nastavit správně čidlo tak, aby byla citlivost dostatečně vysoká a přitom nedocházelo k vyvolání planého poplachu. Po letech zkoušek se nakonec technologie ustálila na dvou používaných systémech (viz kapitola 2.2 a 2.3) a jejich kombinacích (viz kapitola 2.4).

2.1 Analogové a digitální zpracování

Před nedávnou dobou se na trhu objevila nová generace pohybových čidel, zpracovávajících signál ze senzorů digitálně. Revoluční řešení úplné digitalizace detekce již od výstupního signálu z IR senzoru představuje "skokové" zdokonalení zpracování a tím i spolehlivosti detektorů. Přímý převod signálu do digitální podoby podstatně zlepšuje jeho rozlišení, nezkrsluje průběh a zvyšuje odstup signál - šum. Oproti tradičním analogovým detektorům není signál před vlastní analýzou zatížen šumy ani nelinearitami vznikajícími při analogovém zpracování. Digitální technologie radikálně snížila počet použitých součástek v čidle, zvýšila spolehlivost a teplotní stálost. Při různých frekvencích rušícího signálu čidlo vykazuje rozdílnou odolnost. Tím je dosaženo zvýšení odolnosti proti falešným poplachům a zároveň zvýšení procenta odhalení pohybu pachatele v hlídaném prostoru.

2.2 PIR čidla

Pyroelektrické snímače využívají infračervené světlo (PyroelectricIR). Jde asi o nejpoužívanější systém čidel. Systém PIR vychází nejlevněji z pohybových čidel a přitom jeho technologie patří mezi nejspolehlivější - dochází k vysoké úspěšnosti při detekci pohybu a při vhodném nastavení i k malému výskytu falešných poplachů způsobených např. pohybující se záclonou v průvanu apod.

V některých hlídaných prostorách žijí s majiteli i domácí zvířata. Při použití standardních pohybových čidel by tato zvířata vyvolávala poplach při každém svém pohybu, a tak by majiteli nezbylo nic jiného, než tato zvířata umístit mimo střežený prostor nebo prostor pohybovými čidly nestřežit. Z těchto důvodů jsou na trhu k dispozici pohybová čidla s posunutou geometrií detekce, na základě které vzniká

"hluchý" prostor pro pohyb domácích zvířat bez vyvolání poplachu. Na druhé straně spolehlivě detekuje člověka (pachatele). K vyvolání poplachu je nezbytné narušit obě posunuté charakteristiky najednou, což je znemožněno menší velikostí zvířete, proto nelze jednoznačně určit limitní hmotnost nebo velikost ignorovaného objektu. Vše závisí na umístění detektoru a na minimální vzdálenosti, na kterou se může zvíře přiblížit.

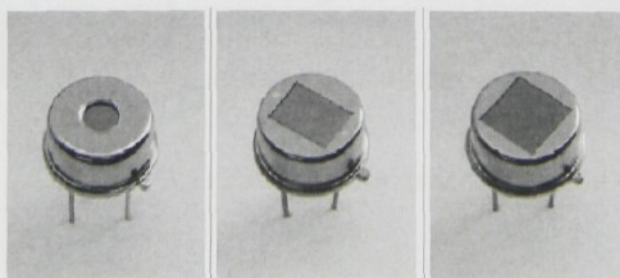
2.3 MW čidla

Systém využívá mikrovlnné záření. Zařízení reaguje na pohyb vodivých předmětů v hlídaném prostoru (lidské tělo je velmi vodivé, obsahuje cca 70% vody). Při nastavení menší úrovně citlivosti však systém nemusí za všech okolností vyvolat poplach a proto se mikrovlnná technologie v čidlech pro běžné prostory většinou nepoužívá samotná, ale v kombinaci s PIR technologií.

2.4 Kombinovaná čidla

Aby byla zajištěna maximální ochrana prostorovými pohybovými čidly a přitom byl minimalizován počet falešných poplachů, začala být jednotlivá čidla zdvojována. Pro vyšší bezpečnost bývají proto čidla konstruována i s konstrukcí PIR / MW a Dual PIR.

Pro kvalitní ochranu vnitřních prostor před narušiteli se používají především infrapasivní snímače (tzv. PIR snímače). Tyto detektory jsou schopny na základě analýzy teplot v místnosti spolehlivě detekovat pohyb člověka v prostoru. Pro různé aplikace se používají PIR snímače s odlišnou charakteristikou, např. vhodné pro standardní prostory, pro dlouhé úzké chodby nebo snímače imunní menším živočichům. Na obr. 2 (lit. [6]) jsou znázorněny tři PIR senzory s jedním, dvěma a čtyřmi elementy (bráno zleva do prava).



Obrázek 2: PIR senzory

2.5 Výhody a nevýhody PIR senzorů

PIR senzory jsou vyráběny křemíkovou technologií a tím je jejich cena velice nízká. Další výhody jsou malé rozměry a vysoká citlivost. Za použití Fresnelovy čočky jsou velice citlivé i pro vzdálenosti až desítek metrů.

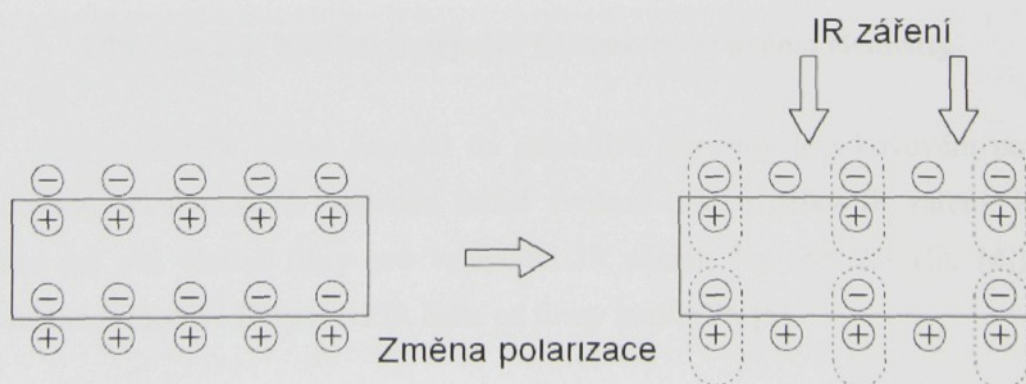
PIR senzory jsou citlivé na IR záření, které vyzařují všechny objekty. Každý pohybující se objekt je senzorem zaznamenán a může vyvolat poplach, např. pohyb zvířat.

2.6 Použití PIR senzorů

- Detekce lidského pohybu
- Detekce požáru
- Automatické rozsvěcení světel

2.7 Stručný princip PIR senzorů

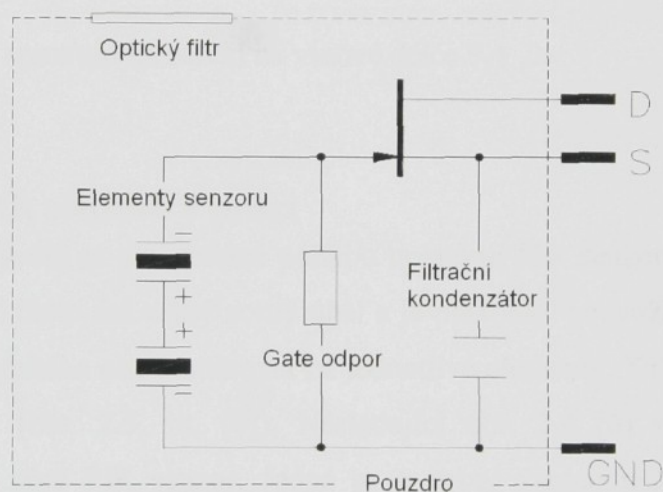
Každý PIR senzor obsahuje jeden, dva nebo čtyři elementy. Materiál těchto elementů nazývaný jako feroelektrický absorbuje tepelnou energii, která změní samovolnou polarizaci na elektricky nabitý element. Změní se tedy polarizace. Tento jev je nazýván jako pyroelektrický efekt. Pyrosenzor používající čistých keramických materiálů může detekovat i velmi malou IR energii z lidského těla. Na obr. 2.1 (lit. [6]) je znázorněna změna polarizace elementu při dopadu IR záření na jeho povrch.



Obrázek 2.1: Změna polarizace elementu

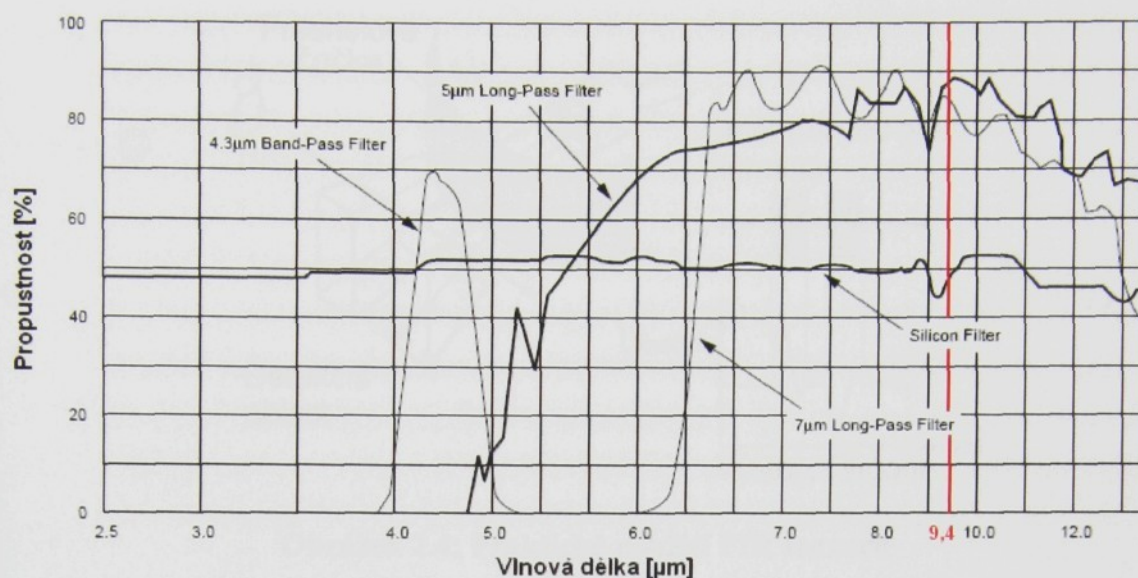
2.7.1 Konstrukce PIR senzorů

PIR senzory jako detektory pohybu obsahují více elementů, které reagují na IR záření. Tato energie je velmi malá, tudíž jednotlivé elementy se nabíjejí na velmi malé napětí. Toto napětí je na odporu, který je připojený na GATE vstupu unipolárního tranzistoru a je nutno ho zesílit. Každý PIR senzor obsahuje unipolární tranzistor J-FET, který zesiluje napětí na těchto elementech. Některé PIR senzory navíc obsahují filtrační kondenzátor pro odstranění vyšších frekvencí. Kompletní schéma vnitřního zapojení je znázorněno na obr. 2.2. Čidlo je uloženo v kovovém pouzdře s třemi vývody. Jedním z nich je GND (zemní bod), který je propojen s pouzdrem. Dále DRAIN (pro vstupní napětí unipolárního tranzistoru) a SOURCE (pro výstupní napětí unipolárního tranzistoru).



Obrázek 2.2: Vnitřní zapojení PIR senzoru se dvěma elementy

Aby mohlo IR záření dopadat na jednotlivé elementy je v kovovém pouzdře zabudované okénko, které propouští určité zvolené vlnové délky IR záření. Každý výrobce má své vlastní filtry pro vstupující IR záření. Na obr. 2.3 (lit. [4]) jsou znázorněné jednotlivé filtry pro PIR čidla od firmy muRATA [5].



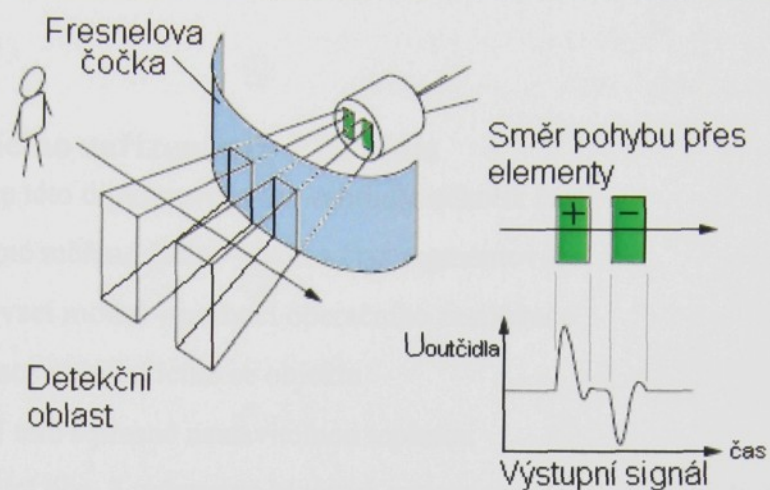
Obrázek 2.3: Vlnové délky pro jednotlivé filtry (okénka) PIR senzoru

Lidské tělo vyzařuje IR záření na vlnové délce $9,4 \mu\text{m}$.

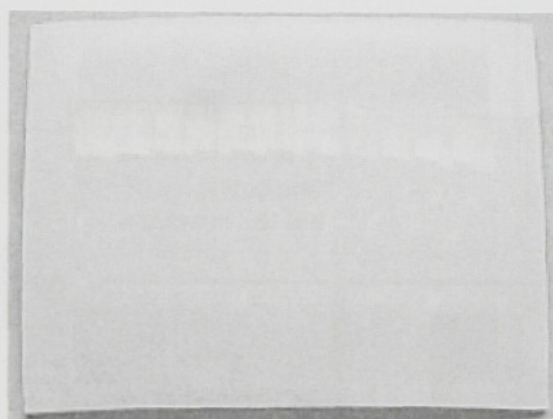
2.7.2 Funkce PIR senzorů v praxi

V reálném světě se pro detekci pohybu uplatňují PIR senzory se dvěma a více elementy. Samotné čidlo má velký zorný úhel a je prakticky nevyužitelné. Je zapotřebí IR záření z detekovaného okolí směřovat na jednotlivé elementy. To se provádí pomocí Fresnelovy čočky (obr. 2.5, lit. [6]). Následující obr. 2.4 [6] zobrazuje umístění Fresnelovy čočky před PIR senzor. Jedná se o velmi zjednodušený náčrt. Je zde znázorněna pouze jedna detekční oblast. Podrobnější informace jsou v kapitole 6.

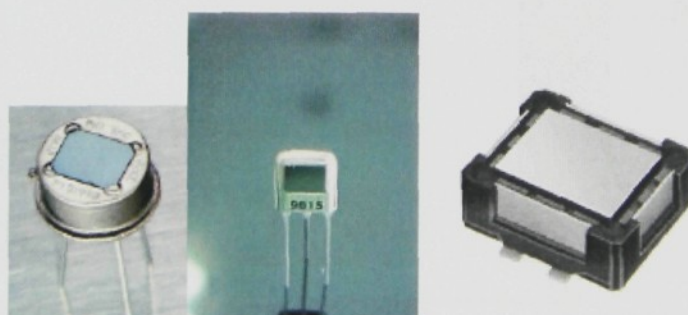
Pohyb je detekován pouze v případě, je-li zaznamenán přes oba elementy za sebou, tedy přes minimálně jednu detekční oblast. Každý PIR senzor má offset napětí. To je napětí $U_{\text{outčidla}}$, při kterém není žádná změna IR záření na jednotlivých elementech. Změna IR záření na elementech se pak projeví snížením nebo zvýšením offset napětí (obr. 2.4 - výstupní signál, lit. [6]). Tím je detekována přítomnost pohybujícího se objektu. To je způsobeno opačně polarizovanými elementy (obr. 2.2, elementy senzoru).



Obrázek 2.4: Praktické použití PIR senzoru



Obrázek 2.5: Fresnelova čočka pro PIR senzory



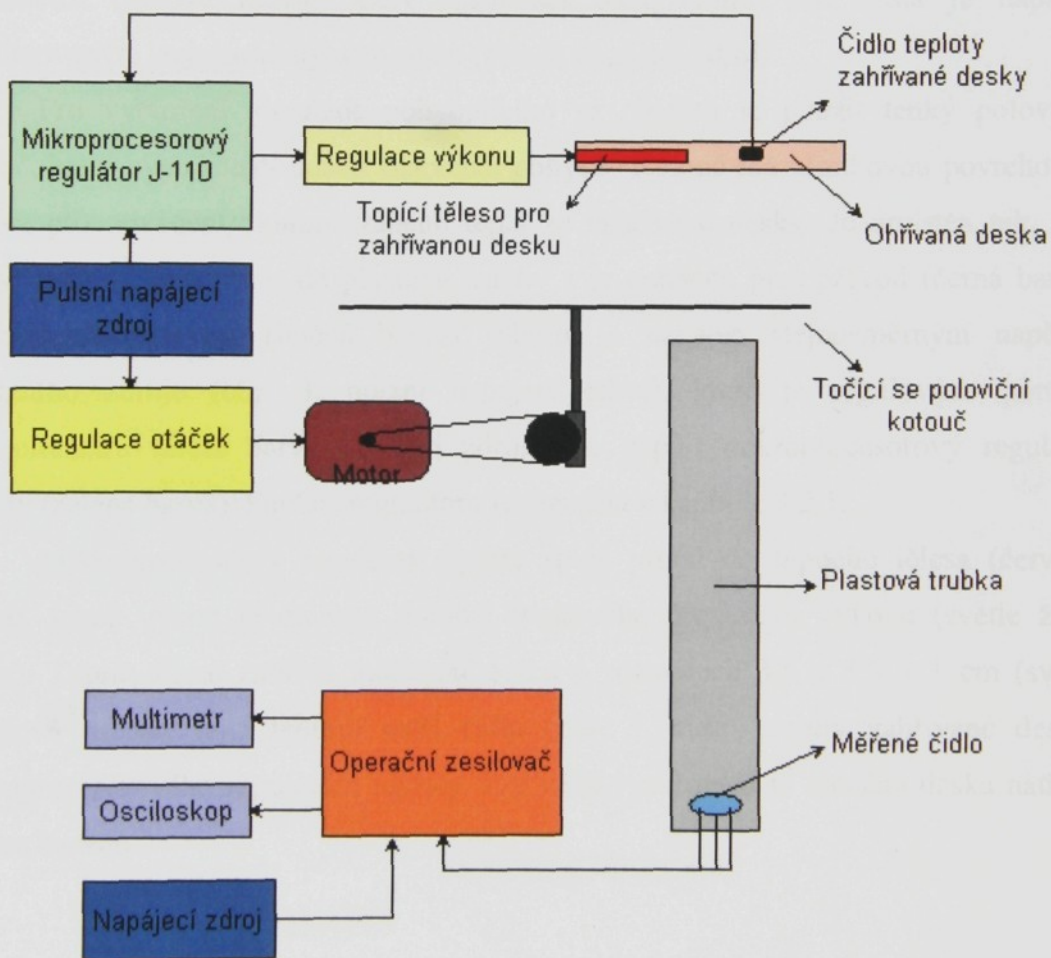
Obrázek 2.6: Provedení pouzder PIR senzorů

3. Popis měřicího zařízení pro PIR čidla

Hardware této diplomové práce zahrnuje několik částí:

- Samotné měřené čidlo – dvou a čtyř segmentové
- Zesilovací modul – pomocí operačního zesilovače
- Simulace pohybujícího se objektu
- Měřicí terč s přesně nastavitelnou teplotou

Následující obr. 3 zobrazuje blokové sestavení jednotlivých částí systému, které jsou barevně odlišeny.



Obrázek 3: Blokové sestavení jednotlivých částí systému

3.1 Blokové schéma rozmístění jednotlivých částí modulu

Kompletní blokové zapojení modulu pro měření detekčních charakteristik PIR čidel je znázorněno na obr. 3.

Měřené čidlo (světle modrá barva) je umístěno v plastové trubce (světle šedivá barva), která má hliníkový povrch pro odvádění tepla z materiálu, ze kterého je trubka vyrobena. Plastová trubka tudíž neakumuluje IR záření ze zahřívané desky. Funkce trubky je velice důležitá, neboť PIR čidla mají velký zorný úhel a mohly by vnímat i okolní IR záření. Plastová trubka IR záření z okolí pohltí a nahrazuje funkci čočky.

Výstupní signál z PIR čidla je přiváděn do operačního zesilovače (oranžová barva), který tento signál zesílí. Zesílený signál je zobrazen pomocí osciloskopu a multimetru (fialová barva). Celý zesilovací blok včetně PIR čidla je napájen stabilizovaným stejnosměrným zdrojem (obr. 3, napájecí zdroj).

Pro vytvoření simulace pohybujícího se objektu je použit tenký poloviční kotouč, který svou rotací udává frekvenci pohybu. Kotouč má hliníkovou povrchovou úpravu pro odvádění akumulovaného tepla ze zahřívané desky. Je umístěn tak, aby zakryl celý vstupní otvor do plastové trubky a je poháněn přes převod (černá barva) elektrickým motorem (hnědá barva). Motor je napájen stejnosměrným napětím z pulzního zdroje (obr. 3, pulzní napájecí zdroj), které je regulováno pomocí potenciometru (žlutá barva). Pulzní zdroj dále napájí mikroprocesorový regulátor teploty (zelená barva). Funkce regulátoru je popsána v kapitole 3.2.1.

Mikroprocesorový regulátor teploty spíná proud do topného tělesa (červená barva), jehož výkon je omezen pomocí triakového regulátoru výkonu (světle žlutá barva). Topné těleso zahřívá měděnou desku o rozměrech 3,5 x 3,5 x 1 cm (světle oranžová barva), jejíž teplotu měří čidlo (obr. 3, čidlo teploty zahřívané desky) mikroprocesorového regulátoru teploty. Pro větší vyzařování je měděná deska natřena černou barvou.

3.2 Měřicí terč s přesně nastavitelnou teplotou

Jelikož PIR čidla jsou velmi citlivá na IR záření, je zapotřebí měřicí terč přesně nastavit na požadovanou teplotu.

Jako regulátor teploty byl použit mikroprocesorový regulátor J-110 od firmy JABEL (obr. 3.1, lit. [8]).



Obrázek 3.1: Mikroprocesorový regulátor J-110

Pracovní rozsah teplot regulátoru je od $-30 \div +300$ °C. Pro měření detekčních charakteristik PIR čidel je teplotní rozsah dostačující. Napájecí napětí je 12 V DC, kde odebíraný proud je 300 mA. Přesnost měřené teploty je 0,1 °C. Výstupní kontakty jsou spínány relé (8A při 250V AC).

3.2.1 Funkce mikroprocesorového regulátoru J-110 a jeho nastavení

Pro přesné měření teploty je nutné provést kalibraci regulátoru pro 0 °C a 100 °C. Regulátor umožňuje nastavit hysterezi spínání/rozpínání kontaktu relé při dané teplotě. Tato vlastnost je pro přesné nastavení teploty nežádoucí a je nastavena na nulu. Dále je nutné nastavit teplotu, při které výstupní relé rozepne kontakt a topné těleso přestane zahřívat měděnou desku.

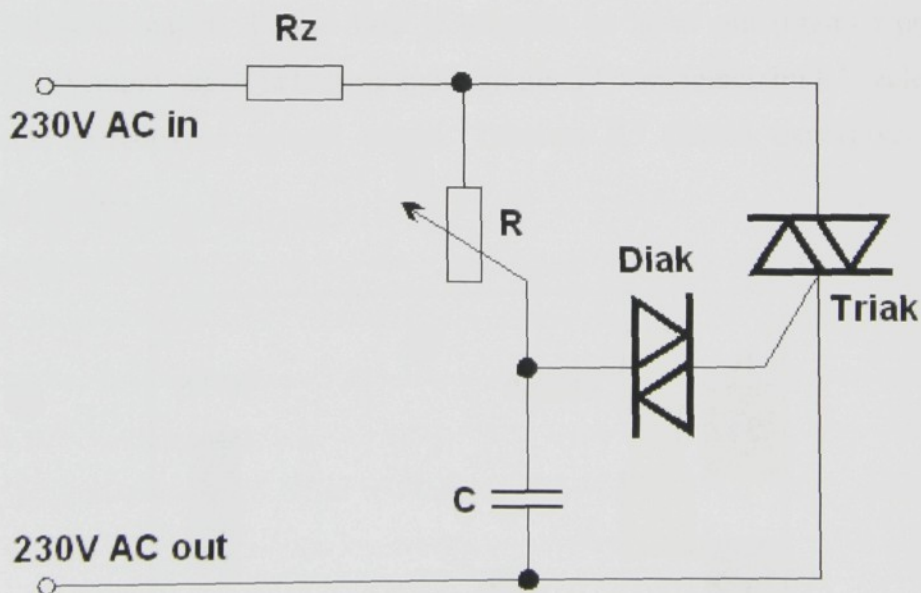
Mikroprocesorový regulátor zobrazuje pomocí LED-diod stav programování či aktuální stav chodu.

3.2.2 Triaková regulace výkonu pro topné těleso

Topné těleso bylo vybráno od firmy HASKO. Jmenovitý výkon topného tělesa je 230 W a je tedy zapotřebí ho snížit. V případě plného využití by se projevovало zpoždění reakce čidla teploty mikroprocesorového regulátoru, tudíž by vznikaly „tepelné překmity“ kolem požadované teploty, což je nežádoucí.

Pro regulaci výkonu byla zvolena triaková regulace. Pro poloviční výkon, než je u triakové regulace, lze použít tyristorovou regulaci. Jako další způsob snížení výkonu topného tělesa lze použít odpor pro snížení napětí na topném tělesu.

Triak se používá pro bezztrátovou regulaci výkonu. Jeho použití je zejména vhodné v obvodech střídavého napětí, neboť každý průchod napětí nulou automaticky vypne triak a ten čeká na další zapnutí. Jediné, co je zapotřebí k regulaci výkonu pomocí triaku, je zařízení, které „vyrobí“ spouštěcí pulz do triaku ve vhodné fázi periody střídavého napětí. Nejjednodušší je použít pro řízení fáze jednoduchého RC členu s měnitelnou časovou konstantou RC, např. pomocí proměnného odporu. Jednoduché zapojení triakové regulace s RC členem je na obr. 3.2.2.

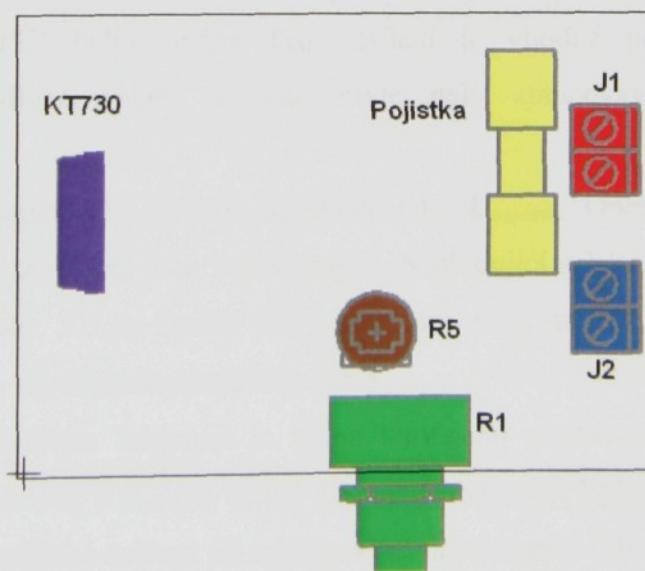


Obrázek 3.2.2: Triaková regulace s RC členem

Je-li odpor R (obr. 3.2.2) nastaven na nulu, spíná se triak prakticky okamžitě po průchodu napětí nulou, je-li odpor R nastaven na větší hodnotu, zpožďuje se napětí na kondenzátoru za napětím na tyristoru a ten se zapne až za určitý čas po průchodu napětí nulou, výkon na zátěži bude v tomto případě menší.

Pomalu vzrůstající napětí na řídicí elektrodě triaku může vést k jeho zapínání v ne zcela přesně určený časový okamžik. Proto je vhodné zařadit do obvodu ještě prvek, který změní pomalý průběh napětí na kondenzátoru ve strmý proudový impulz. Touto součástí je diak (obr. 3.2.2, diak), který si můžeme představit jako triak s nevyvedenou řídicí elektrodou. Po dosažení určitého napětí mezi anodou a katodou se diak spíná do malého odporu, a proto je ideální spínací součástí v obvodu řídicí elektrody triaku.

Kompletní schéma zapojení je v příloze A – elektrické zapojení triakového regulátoru. Na obr. 3.2.3 je rozmístění vybraných součástek, které jsou barevně odlišeny. Samotný triak je na kraji (fialová barva) a pro větší výkony nad 2A by měl být připevněn na chladič. Pojistka je vyznačena žlutou barvou. Konektor J1 (červená barva) je pouze pro propojení nulového vodiče. Konektor J2 je znázorněn modrou barvou a je pro fázi síťového napětí. Přívod fáze je připojen na horní pin (bráno z pohledu na obr. 3.2.3). Výstupní napětí je tedy na spodním pinu. Potenciometrem R1 (zelená barva) nastavujeme požadované spínací napětí. Trimrem R5 (hnědá barva) se nastavuje minimum výkonu.



Obrázek 3.2.3: Rozmístění součástek triakového regulátoru

3.3 Zesilovací modul s operačním zesilovačem MCP602

3.3.1 Výběr vhodného OZ pro PIR čidla

Rozdíly mezi různými operačními zesilovači jsou veliké, je ovšem důležité vybrat ten správný. Následující body zmenší výběr na dostačující OZ. Je tedy třeba si vybrat podle následujících specifikací:

- rozsah napájecího napětí které používáme (v tomto případě 5 V)
- počet OZ v pouzdře (v tomto případě dva OZ)
- velikost pouzdra (závisí na provedení a počtu integrovaných OZ)
- mezní hodnoty
- dostupnost
- napěťový drift
- offset

Pro experiment byl vybrán OZ od firmy Microchip MCP602 [7] (jako náhradu lze použít OZ MCP606/7). Jeho napájecí napětí je v rozmezí 2,5–5,5 V. Pouzdro je v provedení SMD s osmi vývody a obsahuje dva OZ. Mezní hodnoty jsou dostačující. Podrobnější informace o tomto OZ jsou v příloze C na CD.

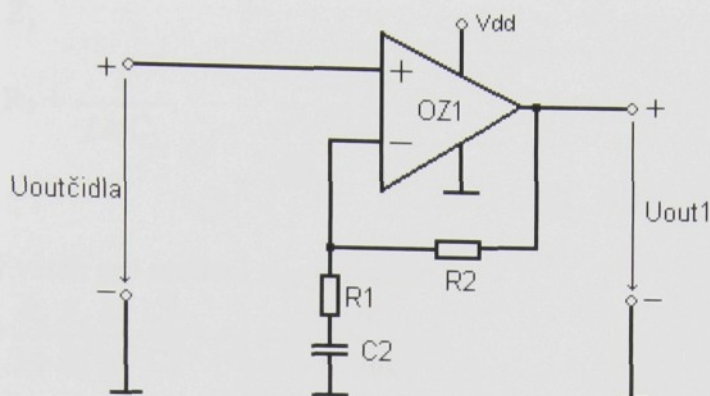
3.3.2 Zesilovací modul pro PIR čidlo

Samotné PIR čidlo má malé výstupní napětí, řádově milivolty. Je tedy nutné výstupní napětí PIR čidla zesílit. Pro zesílení je vhodné použít zapojení jako neinvertující. Zesílené napětí se pak bude dále zpracovávat osciloskopem a multimetrem.

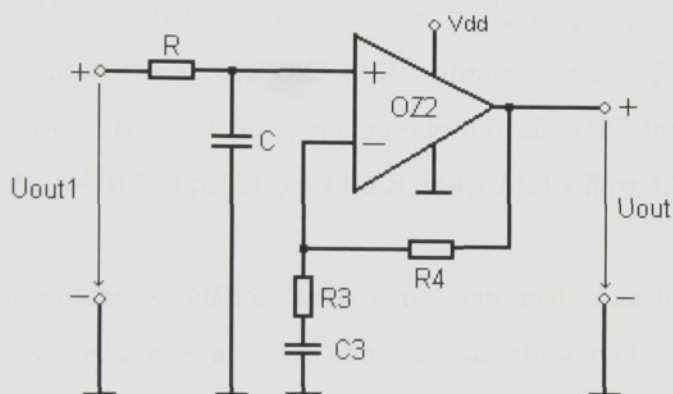
Výstupní napětí PIR čidla je označeno jako $U_{out\check{c}idla}$. Operační zesilovače jsou použity dva a to v zapojení jako neinvertující. Následující schéma zobrazuje zapojení PIR čidla k OZ (obr. 3.3.2). Druhý OZ s použitím dolní propusti pro filtraci vyšších frekvencí rušivých signálů zobrazuje obr. 3.3.3.

Dalším důležitým faktorem je volba vhodného zesilovacího činitele A_{u1} pro první operační zesilovač a A_{u2} pro druhý operační zesilovač. Byly zvoleny dvě zesílení a to z důvodu přesnějšího měření při malém výstupním napětí PIR senzoru $U_{out\check{c}idla}$ a při větším výstupním napětí PIR senzoru. Celkové zesílení bylo zvoleno 22krát a 121krát a

je plně dostačující pro měření dynamických charakteristik PIR čidel. OZ jsou zapojeny v sérii, tudíž se jejich zesílení násobí.



Obrázek 3.3.2: Schéma zapojení PIR čidla s prvním OZ MCP602



Obrázek 3.3.3: Schéma zapojení druhého OZ MCP602

Následující vzorce jsou použity pro výpočet mezní frekvence f_{mez} a zesílení A_{u1} a A_{u2} neinvertujícího OZ a OZ s dolnoproustním filtrem.

Pro výpočet zesílení A_{u1} a A_{u2} pro frekvence do f_{mez} je použit vzorec 3.3.4 a 3.3.7.

Zesílení A_{u1} je rovno:

$$A_{u1} = 1 + \frac{R_2}{Z_1}, \quad (3.3.2)$$

$$\text{kde } Z_1 = R_1 + \frac{1}{j\omega C_2}. \quad (3.3.3)$$

Výsledný vztah pro zesílení A_{u1} je roven:

$$A_{u1} = \left(1 + \frac{R_1 R_2 \omega^2 C_2^2}{1 + R_1^2 \omega^2 C_2^2}\right) + j \left(\frac{R_2 \omega C_2}{1 + R_1^2 \omega^2 C_2^2}\right). \quad (3.3.4)$$

Zesílení A_{u2} je rovno:

$$A_{u2} = 1 + \frac{R_4}{Z_3}, \quad (3.3.5)$$

$$\text{kde } Z_3 = R_3 + \frac{1}{j\omega C_3}. \quad (3.3.6)$$

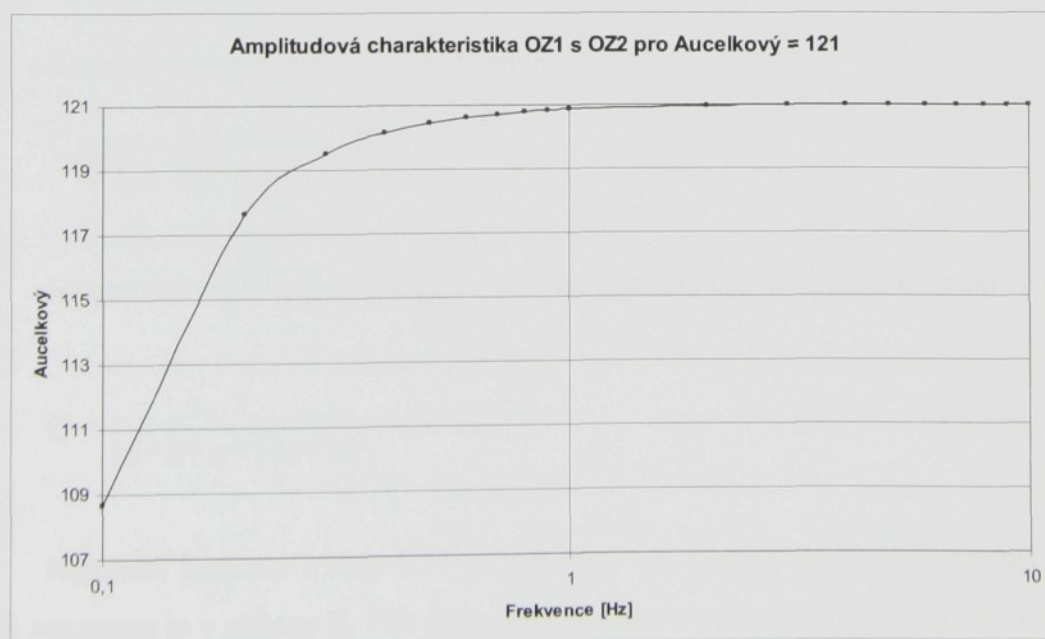
Výsledný vztah pro zesílení A_{u2} je roven:

$$A_{u2} = \left(1 + \frac{R_3 R_4 \omega^2 C_3^2}{1 + R_3^2 \omega^2 C_3^2}\right) + j \left(\frac{R_4 \omega C_3}{1 + R_3^2 \omega^2 C_3^2}\right). \quad (3.3.7)$$

U operačního zesilovače OZ1 (obr. 3.3.2) bylo zvoleno „pevné“ zesílení $A_{u1} = 11$. Pro operační zesilovač OZ2 (obr. 3.3.3) je zesílení $A_{u2} = 2$ nebo $A_{u2} = 11$.

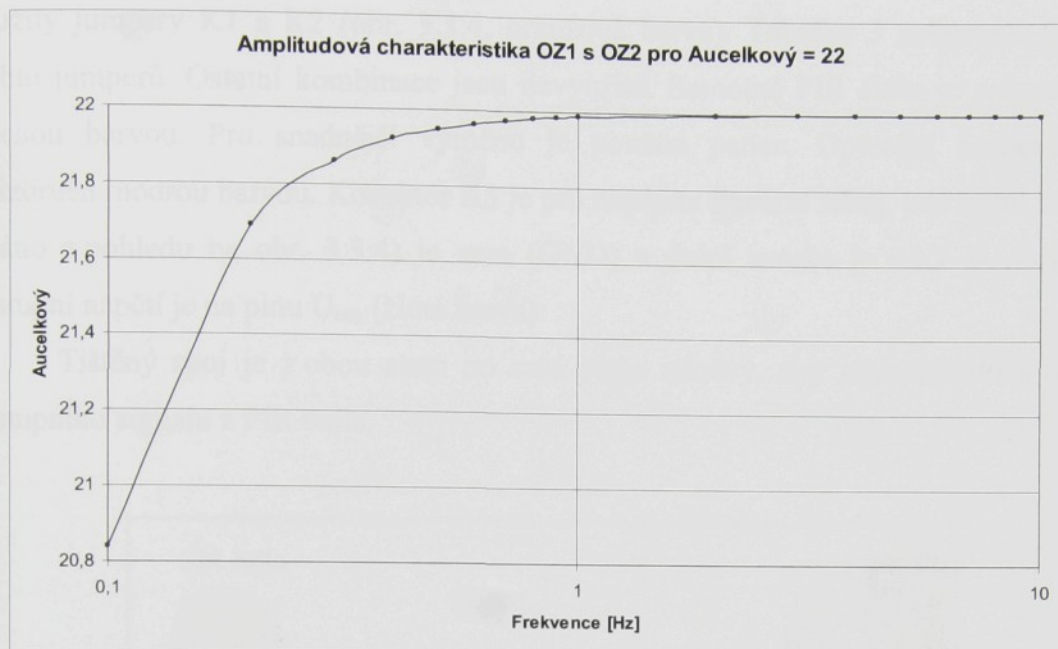
Odpory operačního zesilovače OZ1 byly vybrány z řady E24 $R_2 = 4,7 \text{ M}\Omega$ a $R_1 = 470 \text{ K}\Omega$ pro zesílení $A_{u1} = 11$. U operačního zesilovače OZ2 byly vybrány z řady E24 $R_4 = 4,7 \text{ M}\Omega$ a $R_3 = 470 \text{ K}\Omega$ pro $A_{u2} = 11$ a $R_4 = 4,7 \text{ M}\Omega$ a $R_3 = 4,7 \text{ M}\Omega$ pro zesílení $A_{u2} = 2$.

Odpory jsou voleny s většími hodnotami, aby nedocházelo ke zbytečnému zatěžování obvodu. Následující graf 3.3.4 zobrazuje amplitudovou charakteristiku pro frekvence od 0,1 Hz do 10 Hz pro celkové zesílení $A_{Ucelkový} = 121$.



Graf 3.3.4 – Amplitudová charakteristika pro $A_{Ucelkový} = 121$

Graf 3.3.5 zobrazuje celkové zesílení $A_{Ucelkový} = 22$.



Graf 3.3.5 – Amplitudová charakteristika pro $A_{Ucelkový} = 22$

Mezní frekvence dolní propusti pro neinvertující zapojení:

$$f_{mez} = \frac{1}{2 * \pi * R * C} \quad [\text{Hz}]. \quad (3.3.8)$$

Kapacita kondenzátoru C je tedy rovna:

$$C = \frac{1}{f_{mez} * 2 * \pi * R} \quad [\text{F}]. \quad (3.3.9)$$

Mezní frekvenci je zvolena $f_{mez} = 16 \text{ Hz}$, kapacita kondenzátoru C je tedy rovna:

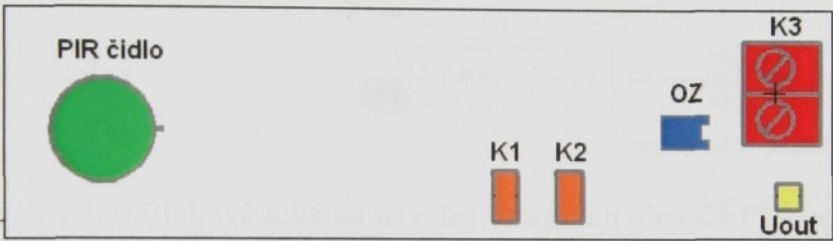
$$C = \frac{1}{16 * 2 * \pi * 100 * 10^3} = 99 \text{ nF}. \quad (3.3.10)$$

Nejbližší hodnota z řady E24 je tedy 100 nF. Celkové zapojení OZ MCP602 s PIR senzorem je v příloze B. PIR čidla byly použity v pouzdrech TO-5, SMD a FLAT PACK (obr. 2.6). Kompletní grafy 3.3.4 a 3.3.5 jsou v příloze L na CD. Podle hodnot z amplitudových charakteristik jsou přepočítány grafy dynamických charakteristik.

3.3.3 Návrh tištěného spoje zesilovacího modulu

Pro rychlou a snadnou změnu celkového zesílení zesilovacího modulu jsou použity jumpery K1 a K2 (obr. 3.3.4, oranžová barva). Tabulka 3 zobrazuje funkci těchto jumperů. Ostatní kombinace jsou nevyužité. Samotné PIR čidlo je znázorněno zelenou barvou. Pro snadnější výměnu je použita patice. Operační zesilovač je znázorněn modrou barvou. Konektor K3 je pro napájecí lineární zdroj, kde horní svorka (bráno z pohledu na obr. 3.3.4) je zem (GND) a dolní svorka je +4,7 V. Zesílené výstupní napětí je na pinu U_{out} (žlutá barva).

Tištěný spoj je z obou stran po celé ploše stíněný, aby nedocházelo k rušení výstupního signálu z PIR čidla.



Obrázek 3.3.4: Návrh tištěného spoje pro zesilovací modul

Jumper	Popis funkce
K1 – ON, K2 - OFF	$A_{ucelkový} = 121$
K1 – OFF, K2 - ON	$A_{ucelkový} = 22$

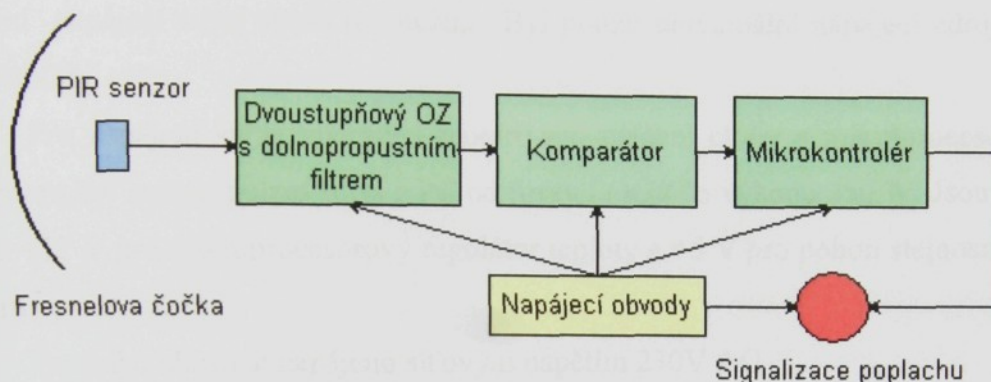
Tab. 3 – Popis funkce jumperů K1 a K2

3.3.4 Požadavky na vstupní obvody a detekční algoritmy PIR senzorů

Vstupní obvody PIR senzorů pro detekci pohybu by měly mít minimální zesílení $A_u = 100$, pro detekci na větší vzdálenosti by se hodnota zesílení měla pohybovat okolo $A_u = 1000$. Pro lepší filtrování vyšších frekvencí se k odporům R_2 a R_4 (obr. 3.3.2 a 3.3.3) paralelně připojí kondenzátor. Tím bude strmost dolnoproustního filtru dvojnásobná. Zesílený signál je vyhodnocován pomocí operačního zesilovače v zapojení jako komparátor a následně výstupní napětí tohoto zesilovače je zpracováváno mikrokontrolérem. Referenční napětí komparátoru by mělo být vhodně nastaveno, aby nedocházelo k planým poplachům. Mikrokontrolér zajišťuje

vyhodnocení poplachu až po třech detekcích pohybujícího se objektu za sebou. Tím je zajištěn minimální počet planých poplachů.

Blokové zapojení navrženého vstupního obvodu pro PIR senzor je znázorněno na obr. 3.3.5. Operační zesilovače pro zesílení signálu $U_{out\check{c}idla}$ a komparátor mohou být použity z kapitoly 3.3.1. Pro následné digitální zpracování signálu z komparátoru je použit mikrokontrolér PIC16F876.



Obrázek 3.3.5: Blokové schéma návrhu vstupních obvodů PIR senzoru

Mikrokontrolér je nastaven na vyhodnocování frekvencí pouze z odhadovaného frekvenčního pásma (viz tab. 5.3). Tím je zajištěna ignorace pohybujících se objektů vyšších nebo nižších frekvencí, na které by čidlo mohlo zareagovat.

3.4 Napájecí zdroje

Na obr. 3 jsou znázorněny tmavě modrou barvou napájecí zdroje. Aby nedocházelo k rušení měřeného PIR čidla, nesmí být použit k napájení tohoto čidla pulzní zdroj, neboť má malé výkyvy výstupního napětí, které by mohly zneprávesnit měření. Proto pro napájení PIR čidla byl zvolen lineární napájecí zdroj za použití transformátoru s diodovým usměrněním. Další výhodou je pevně dané výstupní napětí, neboť samotný zesilovací modul pro PIR senzor má velmi malý odběr proudu. Tudiž lineární napájecí zdroj skoro nezatěžuje. Byl použit univerzální napájecí zdroj model MW500GS.

Pro napájení stejnosměrného motoru pro otáčení clony a mikroprocesorového regulátoru byl zvolen pulzní zdroj z PC od firmy LOGIC o výkonu 350 W. Jsou využita napětí +12 V pro mikroprocesorový regulátor teploty a +5 V pro pohon stejnosměrného motoru.

Topicího těleso je napájeno síťovým napětím 230V AC.

3.5 Zobrazení

Pro detekci frekvence rotujícího kotouče byl použit multimetr od firmy Protek model D620. Jeho rozsah byl zvolen jednotky Hz s přesností na tisícinu Hz. Jelikož výstupní napětí U_{out} je i přes jeho zesílení malé a pulz nemá ostré čelní a týlové hrany, měří tento model až od frekvence 0,7 Hz. Nižší frekvence byly měřeny stopkami a počítány podle vzorce:

$$f = \frac{1}{T} \text{ [Hz]}, \quad (3.4.2)$$

kde T je měřený čas v sekundách.

Výstupní napětí bylo měřeno pomocí osciloskopu z důvodu rychlejší reakce na změny výstupního napětí U_{out} . Byly použity rozsahy 0,1 V/dílek a 0,2 V/dílek. Každý dílek je rozdělen na 5 menších dílků. Osciloskop byl použit od firmy HUNG CHANG model 5504 (do 40MHz).

4. Měřené PIR senzory

Jednotlivé PIR senzory se liší v provedení pouzdra, závislosti na teplotě, reakci na různé vlnové délky a v dynamických vlastnostech. PIR senzory nemusí mít stejné offset napětí. Následující grafy 4.3.3 až 4.7.5 jsou naměřeny dvěma způsoby měření (viz kapitola 4.1 a 4.2).

Byly změřeny typy PIR senzorů:

- RE200B
- LHI878
- IRS-A200ST01-R1
- CSL-051
- LHI1128

4.1 Způsob měření dynamických vlastností PIR senzoru

Princip měřicí metody spočívá v otáčení kotoučem, který svým pohybem udává frekvenci pohybu měřeného objektu. PIR senzor na tento pohyb reaguje a jeho výstup je formou malých napěťových pulzů, které musí být zesíleny. Zesílené pulzy jsou přiváděny na osciloskop a následně odečteny. Teplota měděné desky byla zahřívána na teplotu lidského těla 36,5 °C. Teplota okolí byla 23,5 °C. Naměřené hodnoty byly pro frekvenci pohybu v rozmezí 0,1 Hz až 2,5 Hz. Vzdálenost zahřívané měděné desky od optického filtru PIR senzoru je 20 cm. Blokové sestavení experimentu je na obr. 3.

Každé měření je jedinečné a vznikají zde chyby při odečtu hodnot z osciloskopu a multimetru. Při nízkých frekvencích vzniká problém nalezení zlomu při přechodu ze zastíněného senzoru na nezastíněný a naopak. Při vysokých frekvencích zobrazoval multimetr hodnoty v rozmezí až $\pm 0,02$ Hz. Byl tedy vždy brán průměr těchto hodnot.

Elementy jsou označeny jako kladné a záporné. Záporný je ten, který je zápornou elektrodou připojen na gate vstup tranzistoru J-FET (obr. 4.1.1, elementy senzoru – horní).

4.2 Způsob měření teplotních vlastností elementů PIR senzoru

Charakteristika teplotních závislostí elementů byla měřena při určité frekvenci pohybu. Při této frekvenci má PIR senzor největší výstupní napětí $U_{out\check{idla}}$. Měření bylo provedeno v rozsahu teplot 26 °C až 50 °C ($\pm 0,1$ °C).

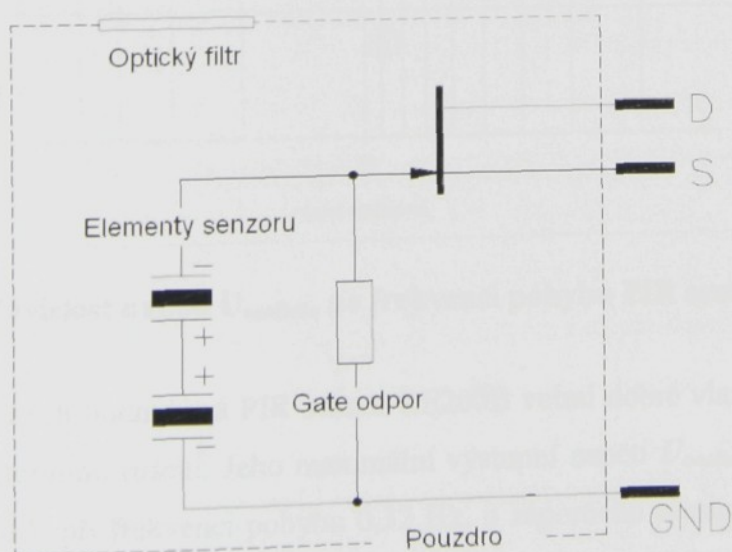
4.3 PIR senzor RE200B

Senzor RE200B je v provedení TO-5 (obr. 2.6, první zleva). Je vyráběn firmou NIPPON CERAMIC CO., LTD. Následující tabulka 4.3.1 zobrazuje souhrn některých důležitých parametrů udávané výrobcem. Dokument k tomuto senzoru je v příloze D na CD.

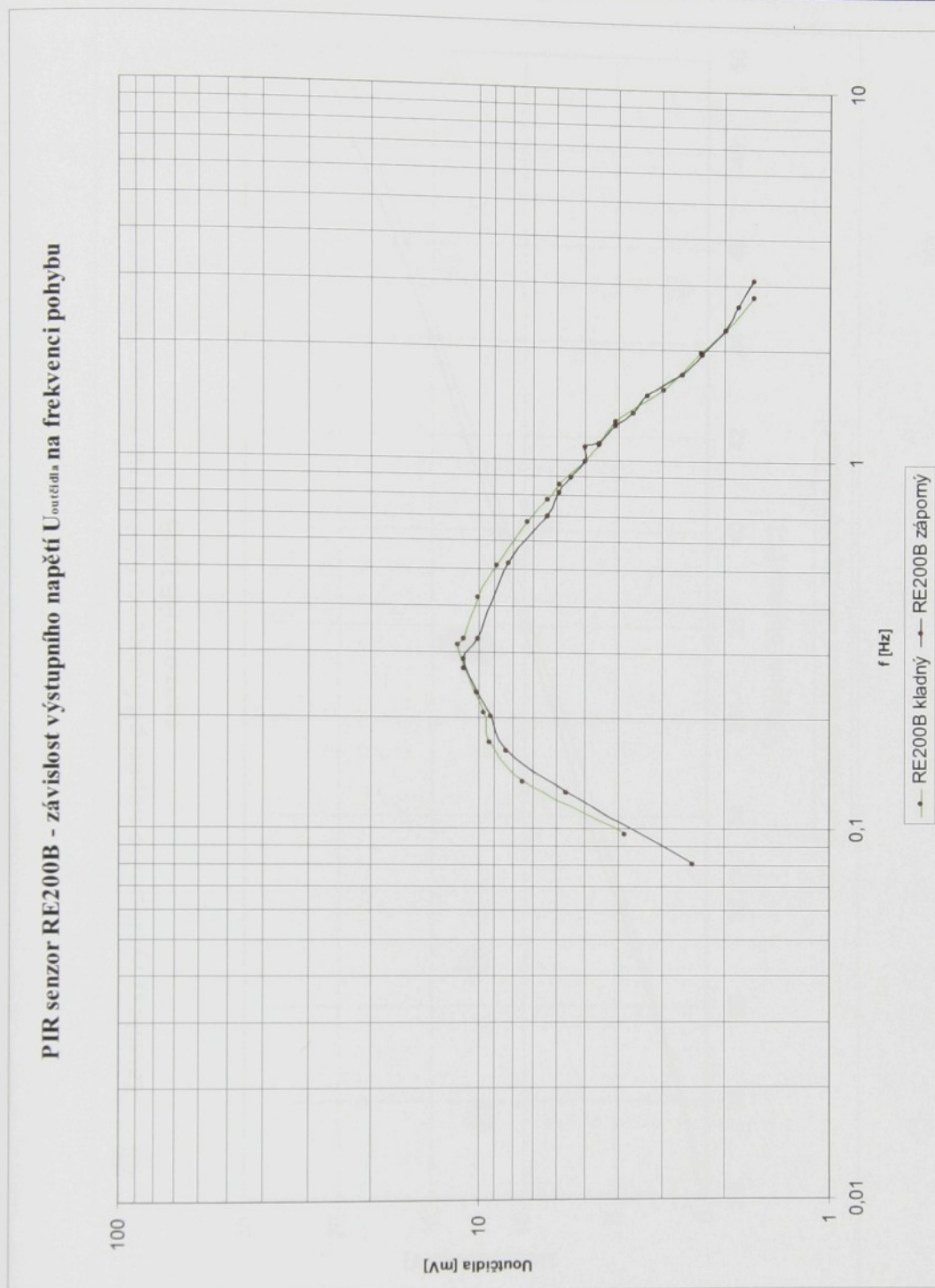
Napájecí napětí	3 až 10 V DC
Offset napětí při 4,7 V DC	0,7 V
Reaguje na frekvenci	0,3 až 3 Hz
Offset napětí v rozsahu napájecího napětí	0,3 až 1,5 V
Provozní teplota	-30 až +70 °C
Plocha elementu	2 x 1 mm ²
Horizontální zorný úhel	138 °
Vertikální zorný úhel	125 °

Tab. 4.3.1 – Parametry PIR senzoru RE200B

Vnitřní zapojení PIR senzoru RE200B je na obr. 4.3.2. Podrobnější popis je v kapitole 2.7.1.

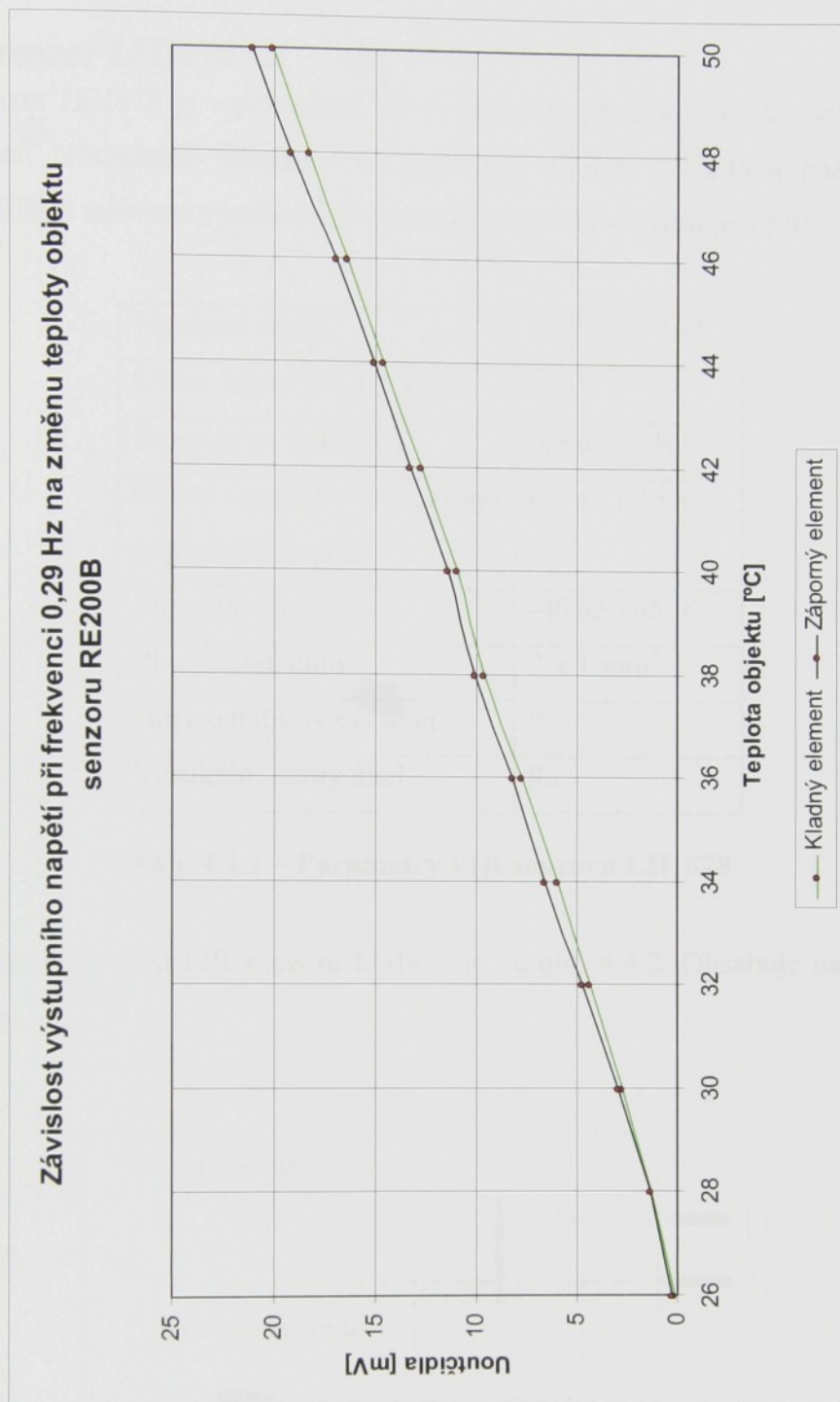


Obrázek 4.3.2: Vnitřní zapojení PIR senzoru RE200B



Graf 4.3.3 – Závislost napětí $U_{outčidla}$ na frekvenci pohybu PIR senzoru RE200B

Z naměřených hodnot má PIR senzor RE200B velmi dobré vlastnosti. Je dobře odstíněn vůči externímu rušení. Jeho maximální výstupní napětí $U_{outčidla}$ je u kladného elementu 11,36 mV při frekvenci pohybu 0,32 Hz, u záporného elementu 10,9 mV při frekvenci 0,29 Hz. Podrobnější graf je v příloze D na CD (dynamické vlastnosti).



Graf 4.3.4 – Závislost napětí $U_{outčidla}$ na změně teploty objektu PIR senzoru RE200B

Závislost výstupního napětí $U_{outčidla}$ PIR senzoru RE200B na teplotě objektu je téměř lineární (graf 4.3.4). U kladného elementu je přibližně $0,83 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$, u záporného $0,86 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$. Měřeno při frekvenci pohybu $0,29 \text{ Hz}$. Podrobnější informace o grafu 4.3.4 jsou v příloze D na CD (změna teploty objektu).

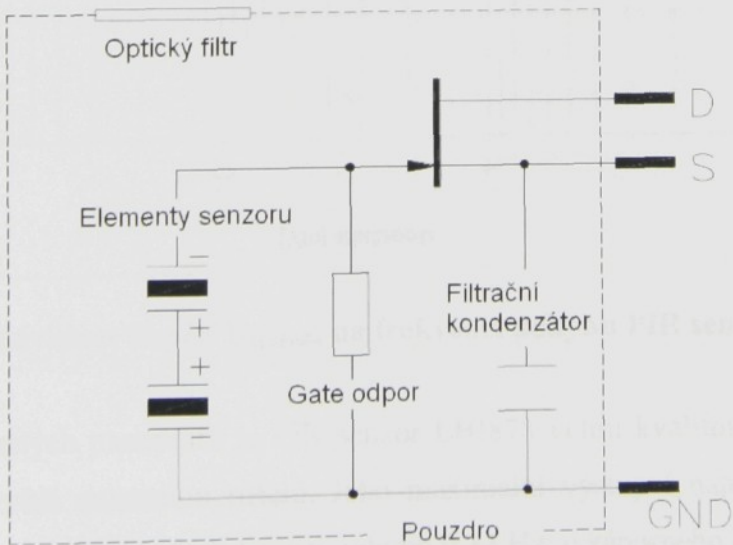
4.4 PIR senzor LHI878

Senzor LHI878 je v provedení TO-5 (obr. 2.6, první zleva). Je vyráběn firmou PerkinElmer. Následující tabulka 4.4.1 zobrazuje souhrn důležitých parametrů PIR senzoru LHI878 udávané výrobcem. Dokument k tomuto senzoru je v příloze E na CD.

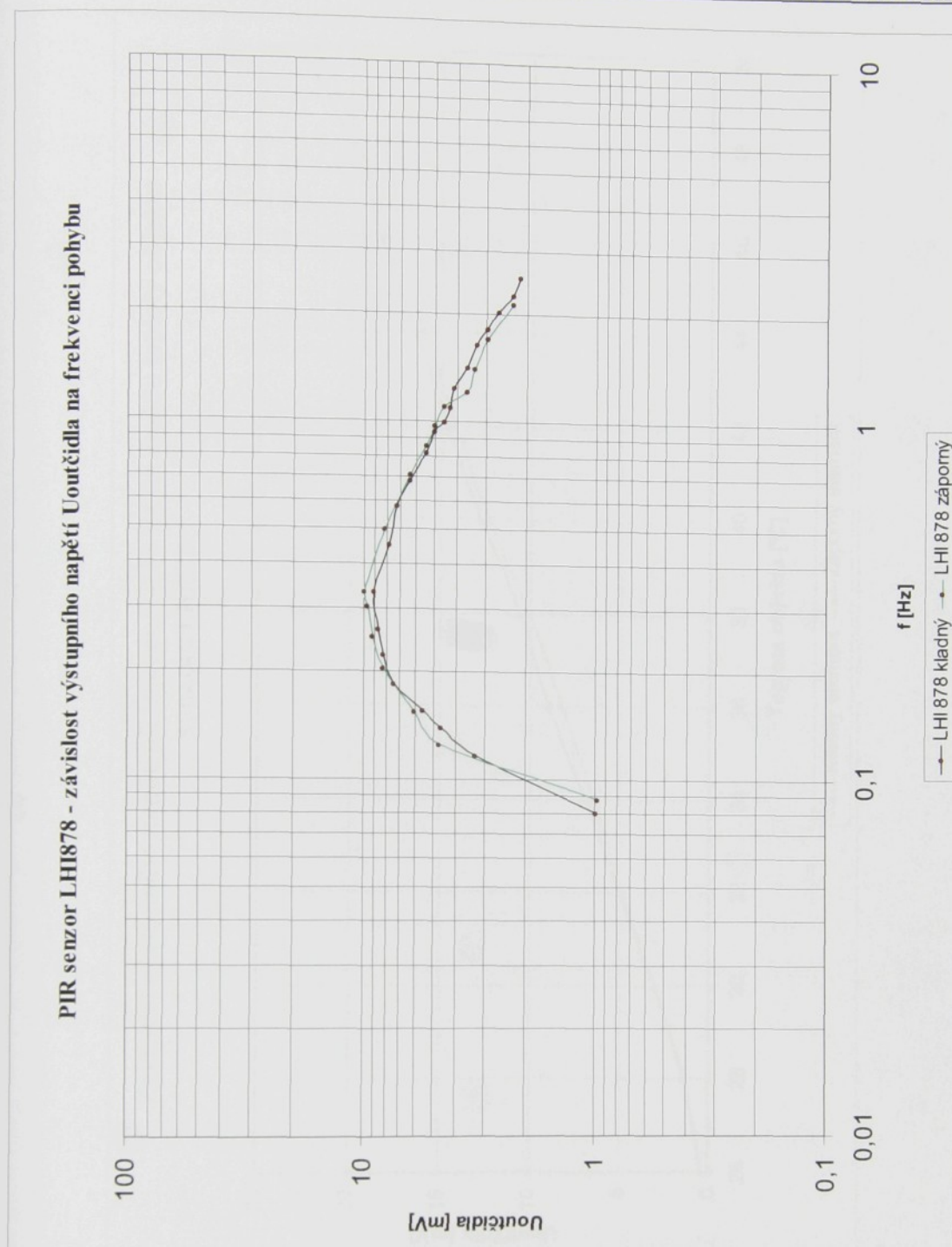
Napájecí napětí	2 až 15 V DC
Offset napětí při 4,7 V DC	0,7 V
Reaguje na frekvenci	0,3 až 10 Hz
Offset napětí v rozsahu napájecího napětí	0,2 až 1,55 V
Provozní teplota	-40 až +85 °C
Plocha elementu	2 x 1 mm ²
Horizontální zorný úhel	95 °
Vertikální zorný úhel	90 °

Tab. 4.4.1 – Parametry PIR senzoru LHI878

Vnitřní zapojení PIR senzoru LHI878 je na obr. 4.4.2. Obsahuje navíc filtrační kondenzátor.

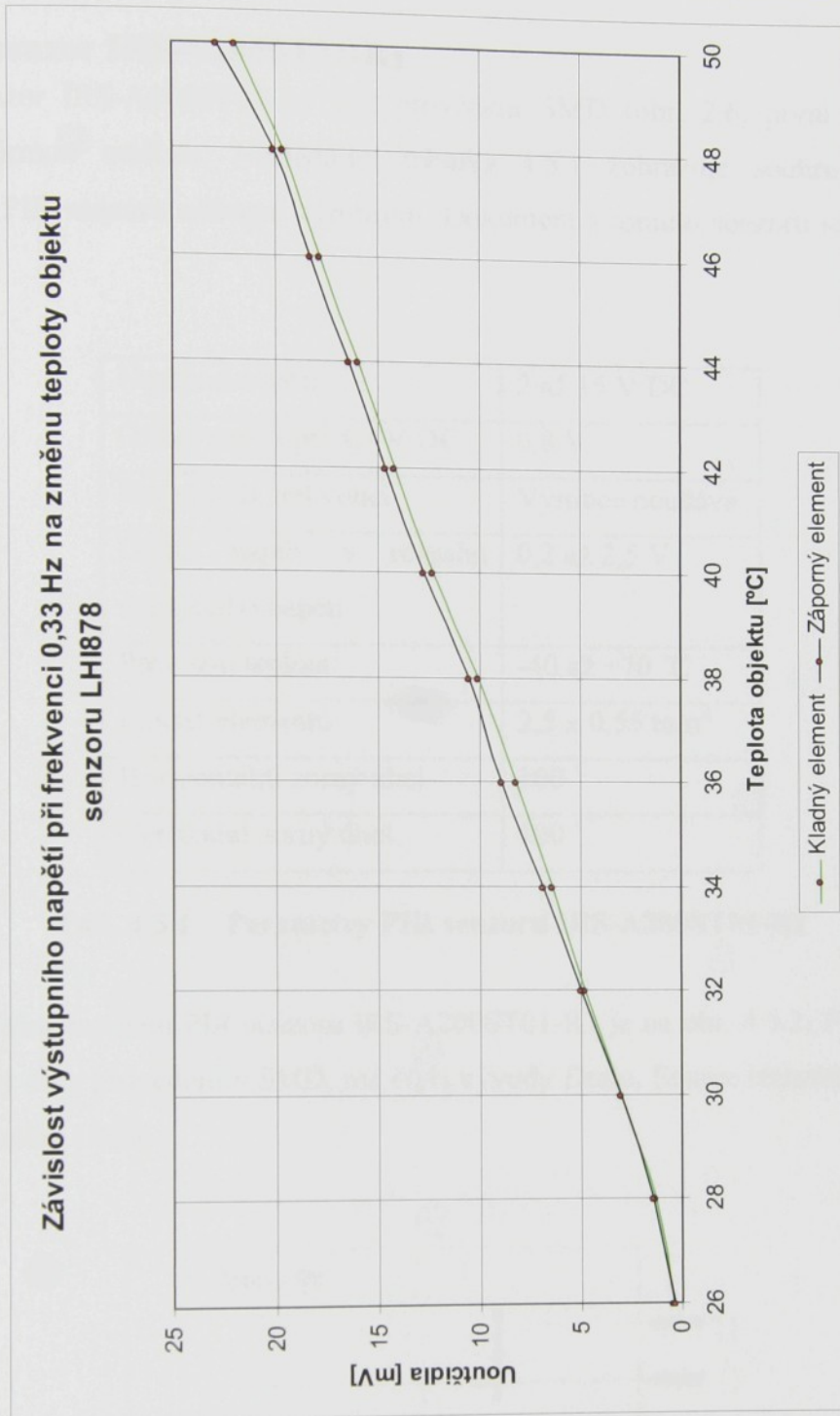


Obrázek 4.4.2: Vnitřní zapojení PIR senzoru LHI878



Graf 4.4.3 – Závislost napětí $U_{\text{outčidla}}$ na frekvenci pohybu PIR senzoru LHI878

Z naměřených parametrů je PIR senzor LHI878 velmi kvalitní čidlo pohybu a dobře odstíněn vůči externímu rušení. Jeho maximální výstupní napětí $U_{\text{outčidla}}$ je u kladného elementu 9,1 mV při frekvenci pohybu 0,33 Hz, u záporného elementu 10 mV při frekvenci 0,33 Hz. Podrobnější graf je v příloze E na CD (dynamické vlastnosti).



Graf 4.4.4 – Závislost napětí $U_{\text{outčidla}}$ na změně teploty objektu PIR senzoru LHI878

Závislost výstupního napětí $U_{\text{outčidla}}$ PIR senzoru LHI878 na teplotě objektu je též lineární (graf 4.4.4). U kladného elementu je přibližně $0,89 \text{ mV/}^{\circ}\text{C}$, u záporného $0,93 \text{ mV/}^{\circ}\text{C}$. Měřeno při frekvenci pohybu $0,33 \text{ Hz}$. Podrobnější informace o grafu 4.4.4 jsou v příloze E na CD (změna teploty objektu).

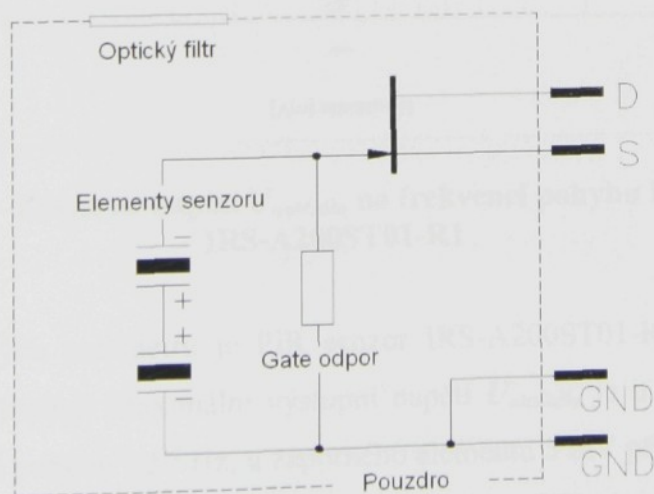
4.5 PIR senzor IRS-A200ST01-R1

Senzor IRS-A200ST01-R1 je v provedení SMD (obr. 2.6, první zprava). Je vyráběn firmou muRata. Následující tabulka 4.5.1 zobrazuje souhrn důležitých parametrů PIR senzoru udávané výrobcem. Dokument k tomuto senzoru je v příloze F na CD.

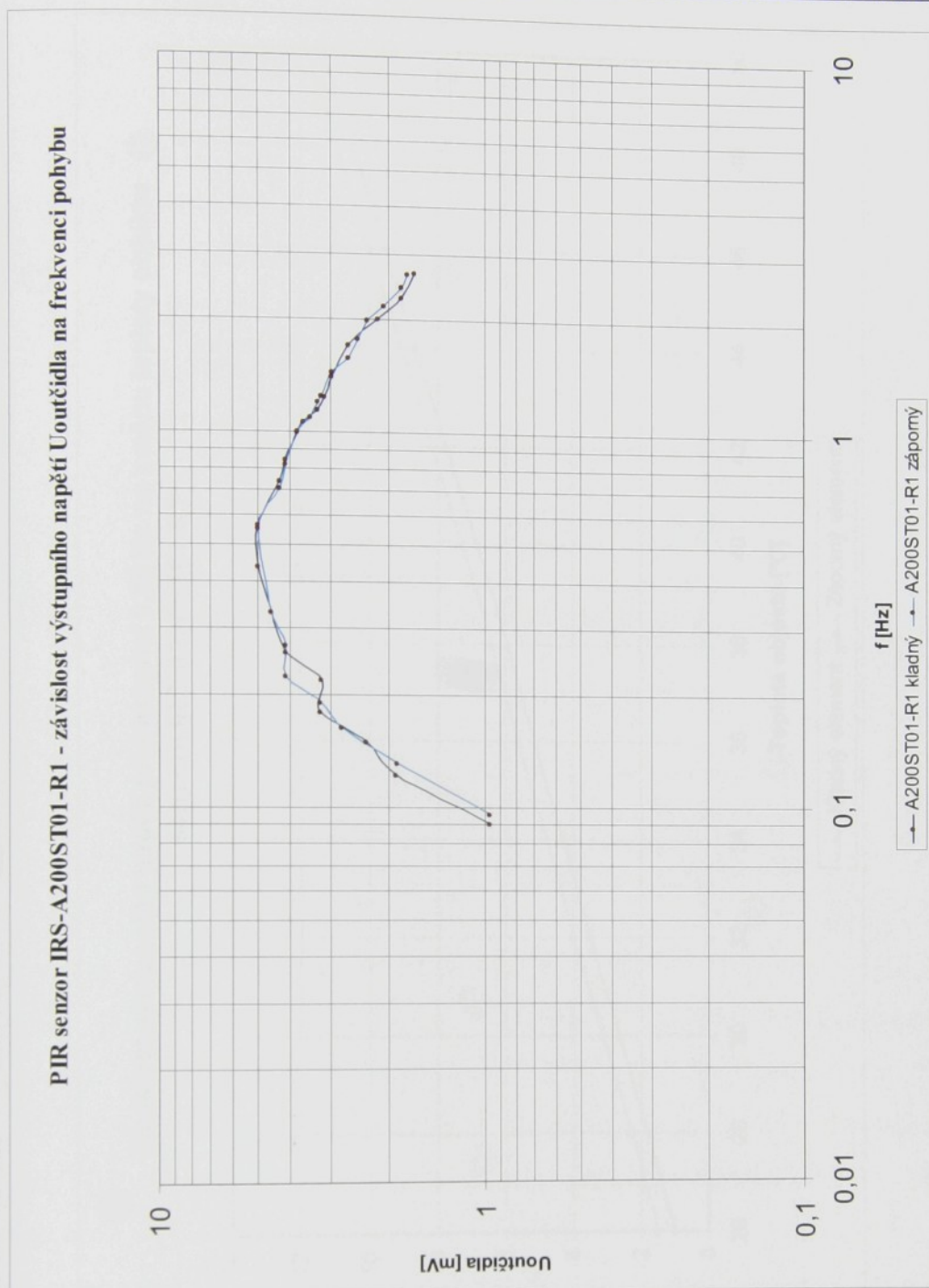
Napájecí napětí	2 až 15 V DC
Offset napětí při 4,7 V DC	0,8 V
Reaguje na frekvenci	Výrobce neudává
Offset napětí v rozsahu napájecího napětí	0,2 až 2,5 V
Provozní teplota	-40 až +70 °C
Plocha elementu	2,5 x 0,55 mm ²
Horizontální zorný úhel	100 °
Vertikální zorný úhel	100 °

Tab. 4.5.1 – Parametry PIR senzoru IRS-A200ST01-R1

Vnitřní zapojení PIR senzoru IRS-A200ST01-R1 je na obr. 4.5.2. PIR senzor je velice malý díky provedení v SMD, má čtyři vývody Drain, Source tranzistoru J-FET a 2krát uzemnění GND.

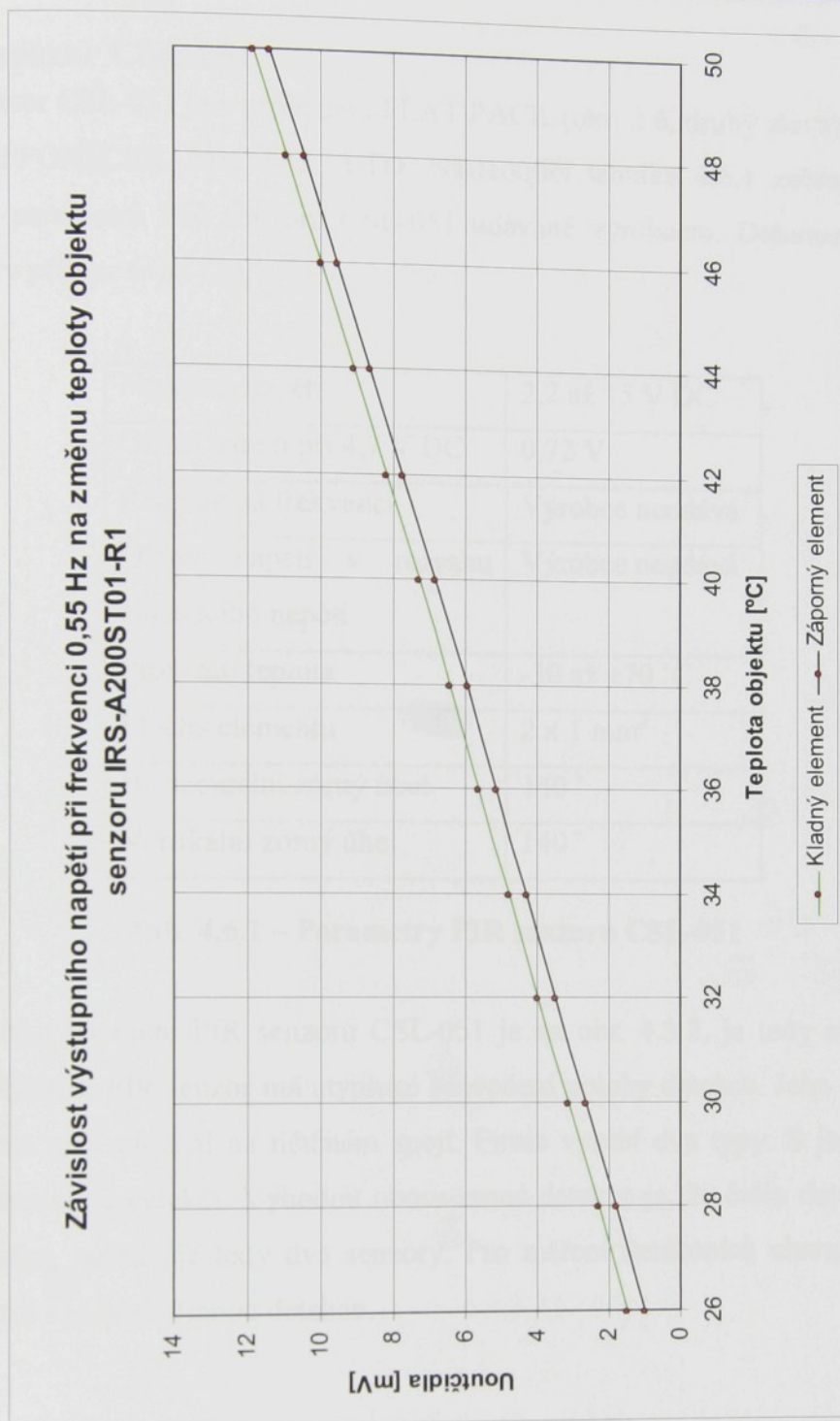


Obrázek 4.5.2: Vnitřní zapojení PIR senzoru IRS-A200ST01-R1



Graf 4.5.3 – Závislost napětí $U_{outčidla}$ na frekvenci pohybu PIR senzoru IRS-A200ST01-R1

Z naměřených parametrů je PIR senzor IRS-A200ST01-R1 méně kvalitní a snadno externě rušitelný. Maximální výstupní napětí $U_{outčidla}$ je u kladného elementu 5 mV při frekvenci pohybu 0,57 Hz, u záporného elementu 5 mV při frekvenci 0,56 Hz. Velikost výstupního napětí $U_{outčidla}$ je oproti ostatním PIR senzorům malá. Je to způsobeno malými rozměry elementů. Podrobnější graf je v příloze F na CD (dynamické vlastnosti).



Graf 4.5.4 – Závislost napětí $U_{outčidla}$ na změně teploty objektu PIR senzoru IRS-A200ST01-R1

Závislost výstupního napětí $U_{outčidla}$ PIR senzoru IRS-A200ST01-R1 na teplotě objektu je lineární (graf 4.5.4). U kladného elementu je přibližně 0,43 mV/°C, u záporného 0,43 mV/°C. Měřeno při frekvenci pohybu 0,55 Hz. Podrobnější informace o grafu 4.5.4 jsou v příloze F na CD (změna teploty objektu).

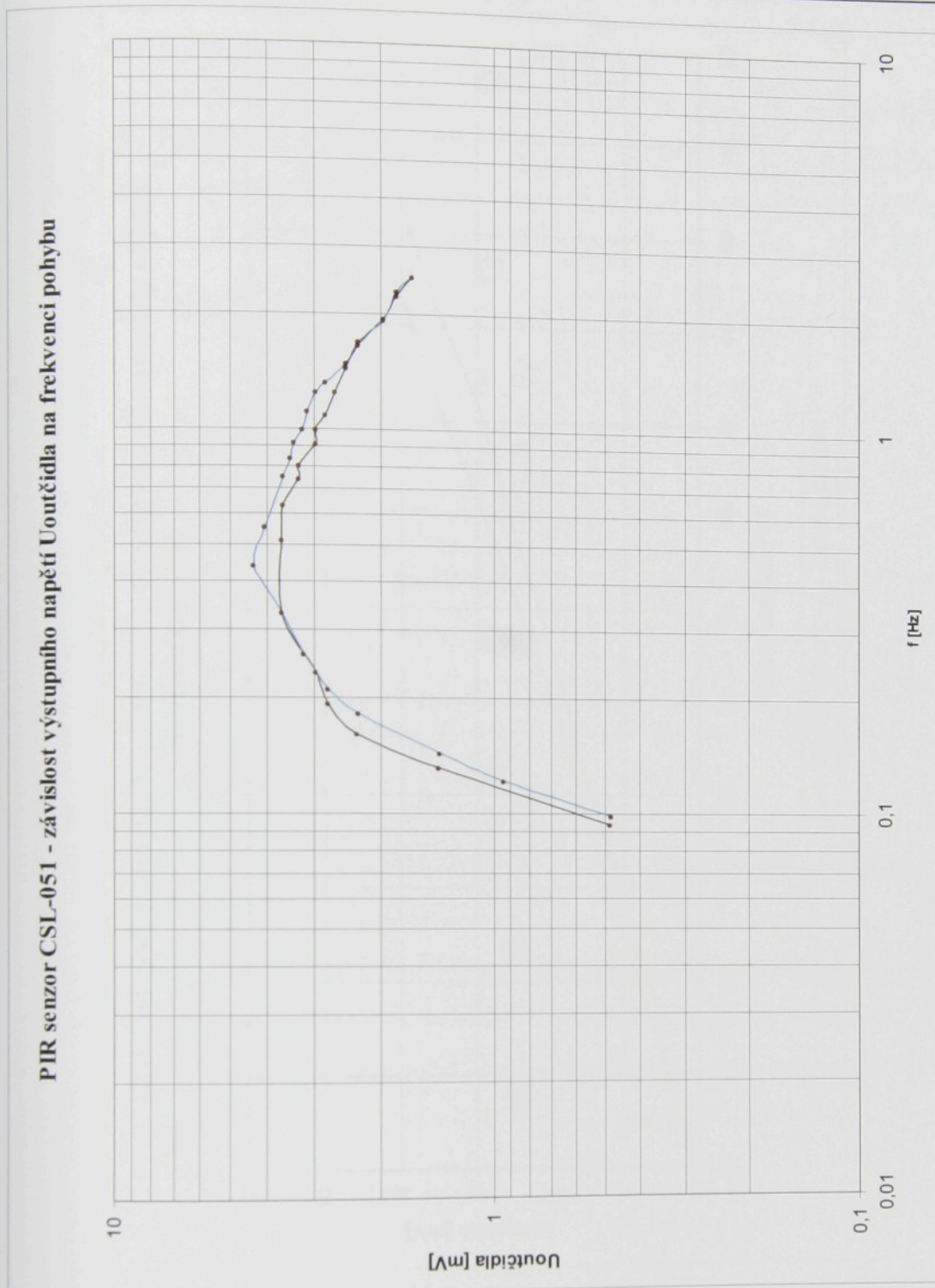
4.6 PIR senzor CSL-051

Senzor CSL-051 je v provedení FLAT PACK (obr. 2.6, druhý zleva). Je vyráběn firmou NIPPON CERAMIC CO., LTD. Následující tabulka 4.6.1 zobrazuje souhrn důležitých parametrů PIR senzoru CSL-051 udávané výrobcem. Dokument k tomuto senzoru je v příloze G na CD.

Napájecí napětí	2,2 až 15 V DC
Offset napětí při 4,7 V DC	0,72 V
Reaguje na frekvenci	Výrobce neudává
Offset napětí v rozsahu napájecího napětí	Výrobce neudává
Provozní teplota	-30 až +70 °C
Plocha elementu	2 x 1 mm ²
Horizontální zorný úhel	140 °
Vertikální zorný úhel	140 °

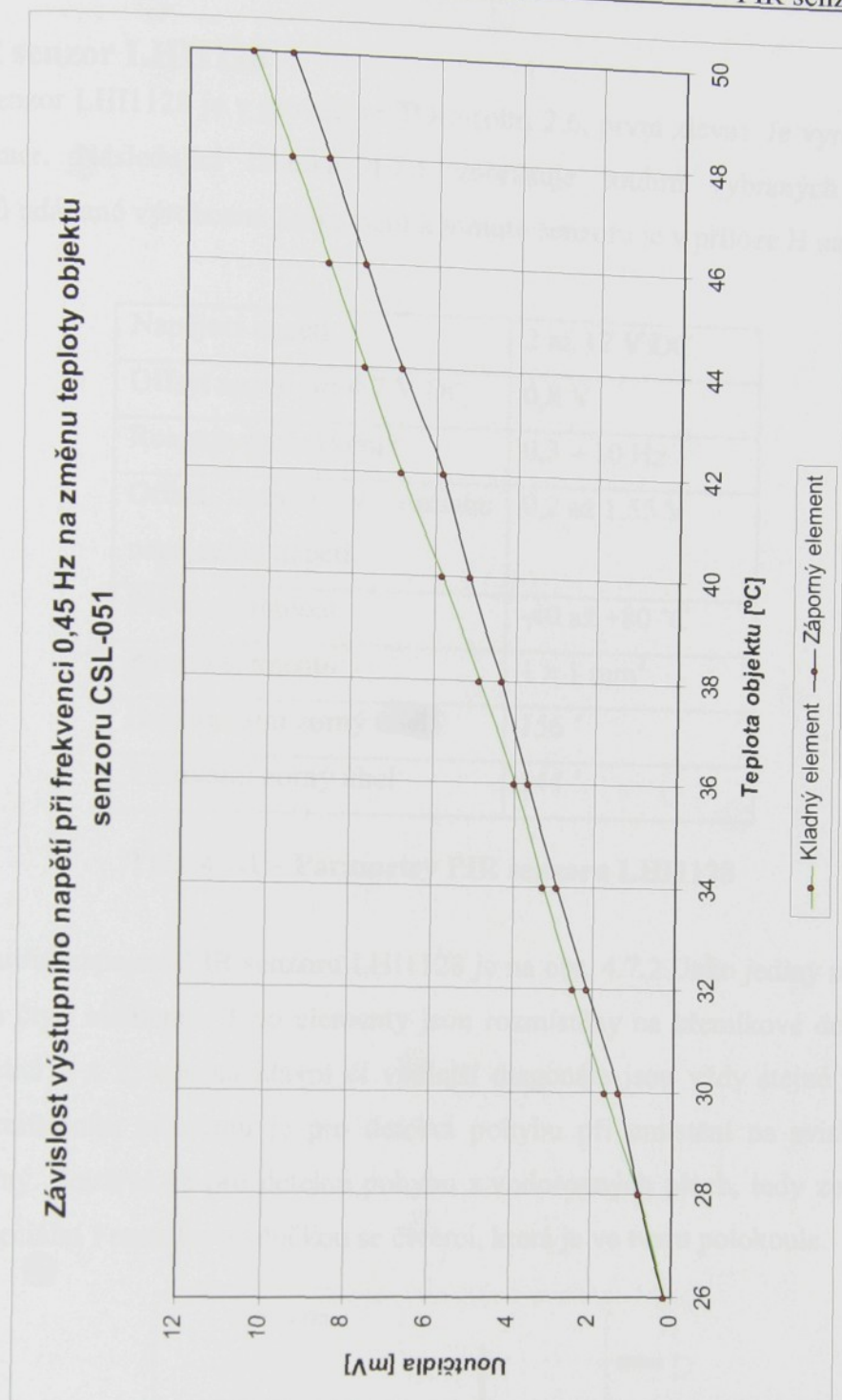
Tab. 4.6.1 – Parametry PIR senzoru CSL-051

Vnitřní zapojení PIR senzoru CSL-051 je na obr. 4.3.2, je tedy stejné jako u senzoru RE200B. PIR senzor má atypické provedení polohy detekce. Jeho detekce je o 90 ° otočena vůči uložení na tištěném spoji. Firma vyrábí dva typy. S jednostrannou nebo oboustrannou detekcí. Výhodou oboustranné detekce je, že čidlo detekuje objekt před i za ním, nahrazuje tedy dva senzory. Pro měření detekčních charakteristik byl zvolen pouze s jednou stranou detekce.



Graf 4.6.3 – Závislost napětí $U_{outčidla}$ na frekvenci pohybu PIR senzoru CSL-051

Z naměřených parametrů je PIR senzor CSL-051 méně kvalitní a snadno externě rušitelný. Maximální výstupní napětí $U_{outčidla}$ je u kladného elementu 4,3 mV při frekvenci pohybu 0,44 Hz, u záporného elementu 3,6 mV při frekvenci 0,51 Hz. Podrobnější graf je v příloze G na CD (dynamické vlastnosti).



Graf 4.6.4 – Závislost napětí $U_{outčidla}$ na změně teploty objektu PIR senzoru CSL-051

Závislost výstupního napětí $U_{outčidla}$ PIR senzoru CSL-051 na teplotě objektu je lineární (graf 4.6.4). U kladného elementu je přibližně $0,43 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$, u záporného $0,39 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$. Měřeno při frekvenci pohybu $0,45 \text{ Hz}$. Podrobnější informace o grafu 4.6.4 jsou v příloze G na CD (změna teploty objektu).

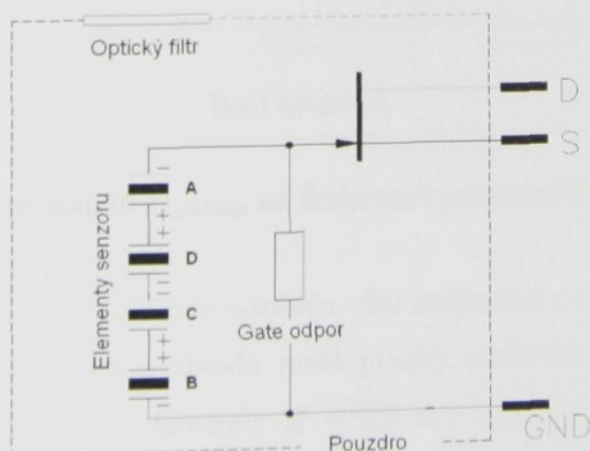
4.7 PIR senzor LHI1128

Senzor LHI1128 je v provedení TO-5 (obr. 2.6, první zleva). Je vyráběn firmou PerkinElmer. Následující tabulka 4.7.1 zobrazuje souhrn vybraných důležitých parametrů udávané výrobcem. Dokument k tomuto senzoru je v příloze H na CD.

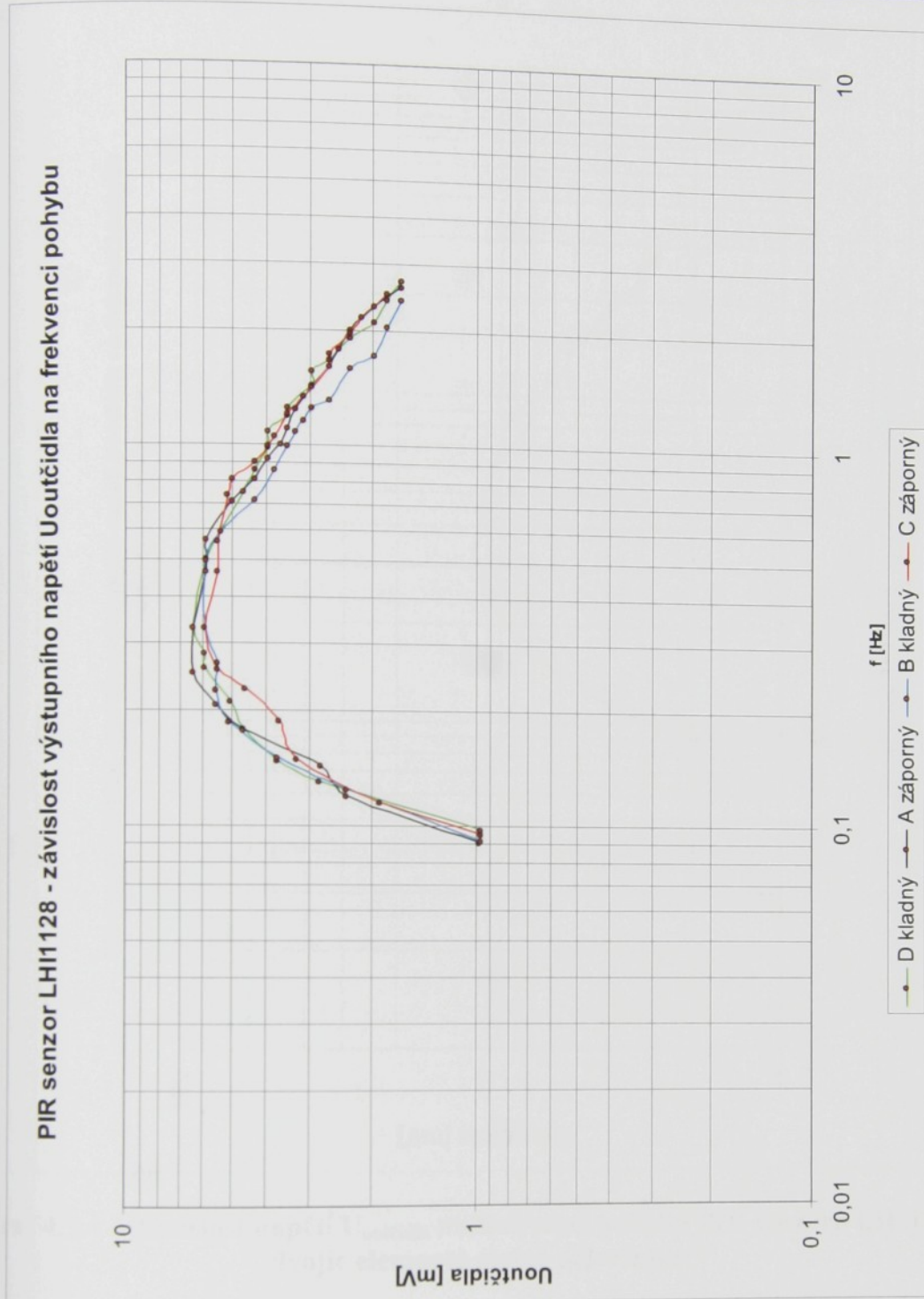
Napájecí napětí	2 až 12 V DC
Offset napětí při 4,7 V DC	0,8 V
Reaguje na frekvenci	0,3 – 10 Hz
Offset napětí v rozsahu napájecího napětí	0,2 až 1,55 V
Provozní teplota	-40 až +80 °C
Plocha elementu	1 x 1 mm ²
Horizontální zorný úhel	156 °
Vertikální zorný úhel	144 °

Tab. 4.7.1 – Parametry PIR senzoru LHI1128

Vnitřní zapojení PIR senzoru LHI1128 je na obr. 4.7.2. Jako jediný měřený PIR senzor má čtyři elementy. Tyto elementy jsou rozmístěny na křemíkové destičce jako čísla v matici 2 x 2, kde na hlavní či vedlejší diagonále jsou vždy stejné polarizace. Tímto rozmístěním elementů je pro detekci pohybu při umístění na svislou plochu nepoužitelný. Používá se pro detekci pohybu z vodorovných ploch, tedy ze stropu. Je opatřen speciální Fresnelovou čočkou se čtverci, která je ve tvaru polokoule.

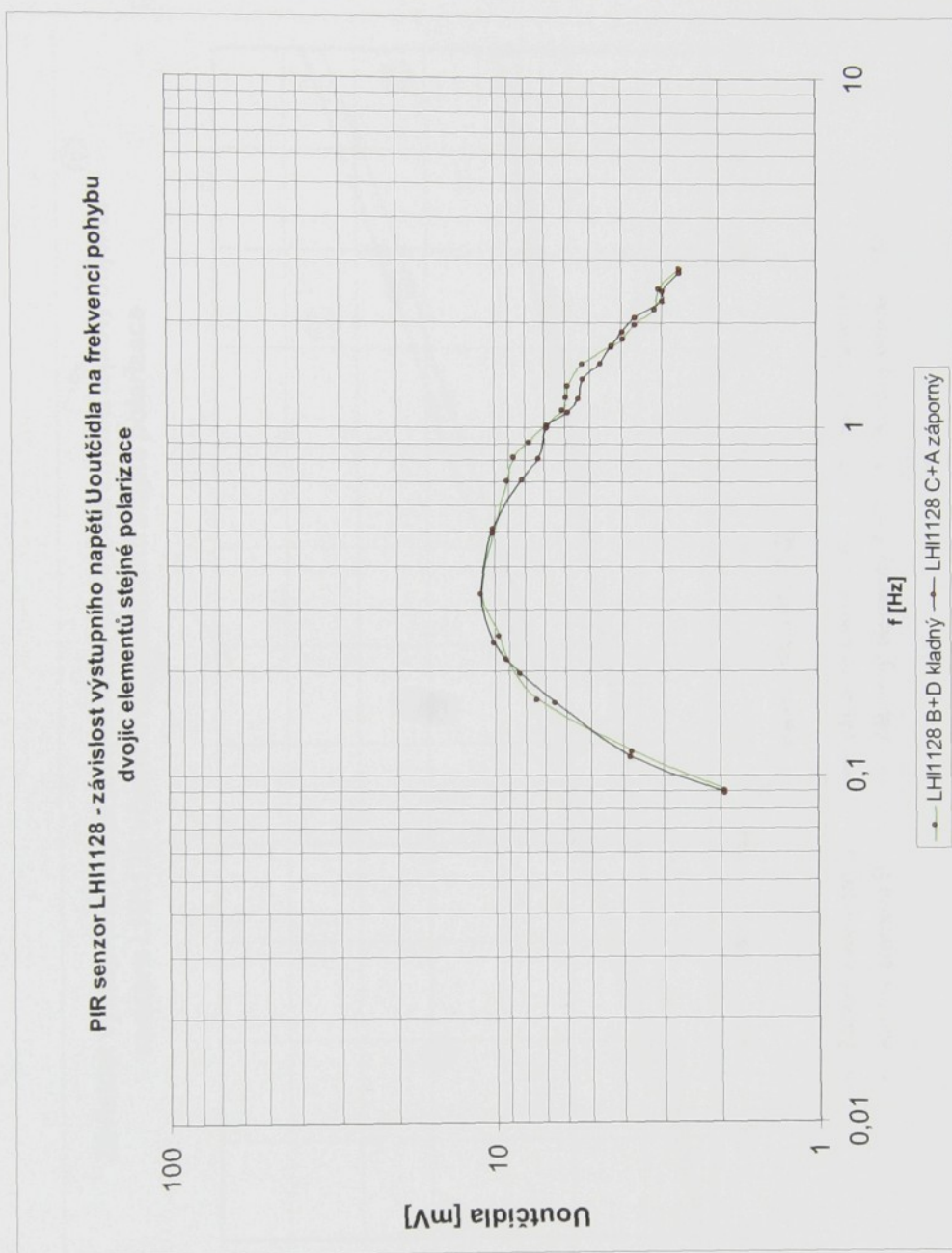


Obrázek 4.7.2: Vnitřní zapojení PIR senzoru LHI1128



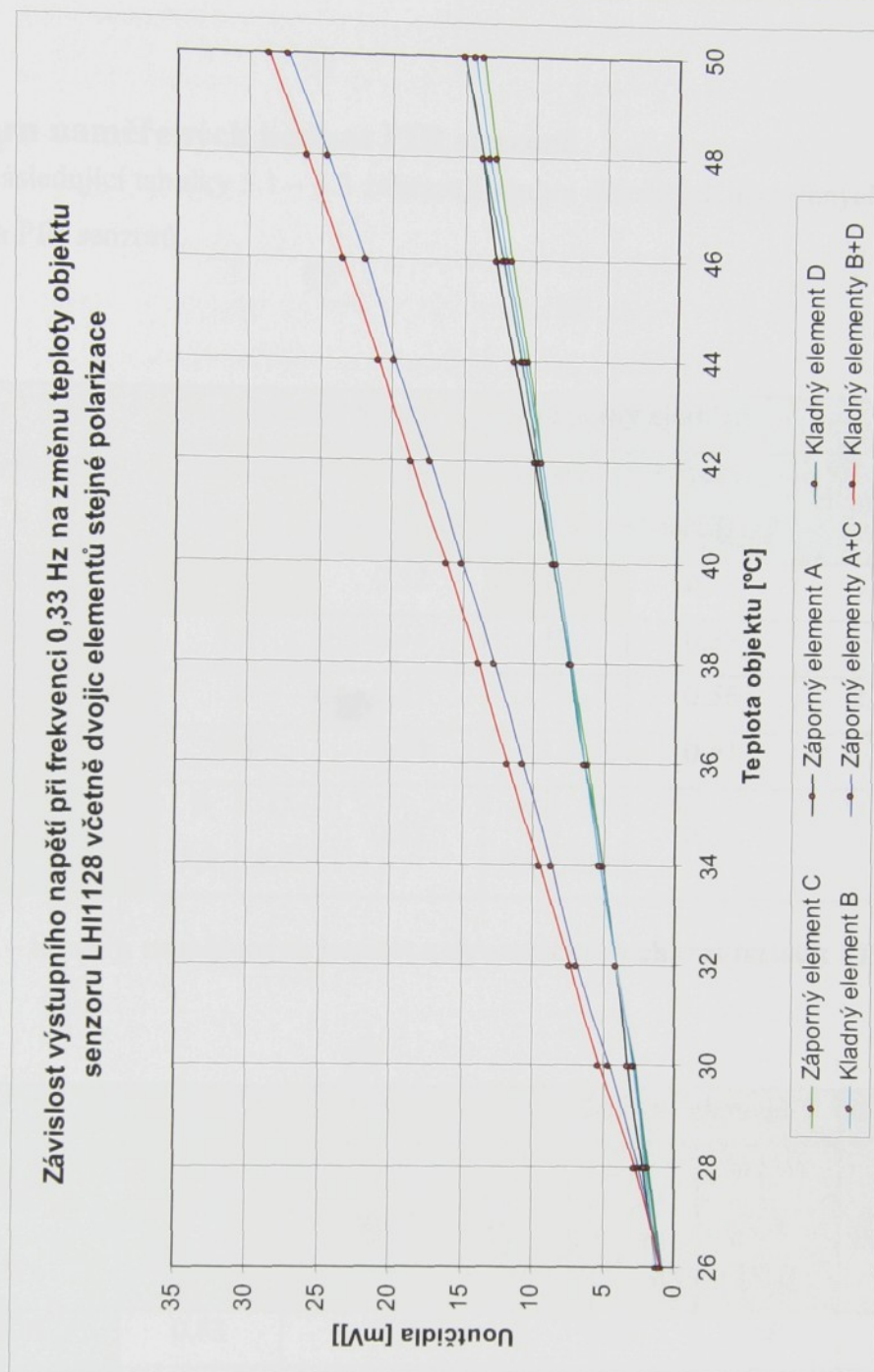
Graf 4.7.3 – Závislost napětí $U_{outčidla}$ na frekvenci pohybu PIR senzoru LHI1128

PIR senzor LHI1128 je dobře odstíněn vůči externímu rušení. Jeho spolehlivost je v praktickém použití malá z důvodu malé plochy elementů. Maximální výstupní napětí $U_{outčidla}$ je u kladných elementů: $B = 5.9 \text{ mV}$ a $D = 6.4 \text{ mV}$, u záporných elementů: $A = 6.4 \text{ mV}$ a $C = 5.9 \text{ mV}$ při frekvenci 0.33 Hz . I přes malé plochy elementů je výstupní napětí $U_{outčidla}$ vysoké v poměru s ostatními plochami jiných senzorů. Podrobnější graf je v příloze H na CD (dynamické vlastnosti ABCD).



Graf 4.7.4 – Závislost napětí $U_{outčidla}$ na frekvenci pohybu PIR senzoru LHI1128 dvojic elementů stejné polarizace

Z grafu 4.7.4 je patrné, že dvojice elementů stejné polarizace mají přibližně dvojnásobné výstupní napětí při frekvenci pohybu 0,33 Hz. U dvojic kladných i záporných elementů je maximální výstupní napětí $U_{outčidla}$ 10,9 mV, což je 88,6 % oproti součtu výstupních napětí $U_{outčidla}$ elementů stejné polarizace z grafu 4.7.3. To je způsobeno sériovým zapojením elementů, napětí se tedy sčítají. Vznikají zde ovšem ztráty nedokonalým zakrytím druhé dvojice elementů a tedy pokles napětí o 11,4 %. Využití jakýchkoliv dvojic elementů v praxi je nemožné. Podrobnější graf je v příloze H na CD (dynamické vlastnosti dvojic).



Graf 4.7.5 – Závislost napětí U_{outcidla} na změně teploty objektu PIR senzoru LHI1128 včetně dvojic elementů stejné polarizace

Závislost výstupního napětí U_{outcidla} PIR senzoru LHI1128 na teplotě objektu je u všech elementů lineární (graf 4.7.5). U kladných elementů je přibližně: $B = 0,55 \text{ mV/}^{\circ}\text{C}$, $D = 0,59 \text{ mV/}^{\circ}\text{C}$ a $B+D = 1,16 \text{ mV/}^{\circ}\text{C}$. U záporných elementů: $C = 0,53 \text{ mV/}^{\circ}\text{C}$, $A = 0,57 \text{ mV/}^{\circ}\text{C}$ a $A+C = 1,1 \text{ mV/}^{\circ}\text{C}$. Měřeno při frekvenci pohybu 0,33 Hz. Podrobnější informace o grafu 4.7.5 jsou v příloze H na CD (změna teploty objektu).

5. Souhrn naměřených hodnot PIR senzorů

Následující tabulky 5.1 – 5.3 zobrazují souhrn důležitých naměřených parametrů měřených PIR senzorů.

PIR senzor	Kladný element		Záporný element		Plocha elementu [mm ²]
	U _{outčidla} [mV]	Frekv. poh. [Hz]	U _{outčidla} [mV]	Frekv. poh. [Hz]	
RE200B	11,36	0,32	10,9	0,29	2 x 1
LHI878	9,1	0,33	10	0,33	2 x 1
IRS-A200ST01-R1	5	0,57	5	0,56	2,5 x 0,55
CSL-051	4,3	0,44	3,6	0,51	2 x 1
LHI1128	B 5,9	D 6,3	0,33	A 6,4 C 5,9	0,33 1 x 1

Tab. 5.1 – Souhrn naměřených hodnot z dynamických charakteristik PIR senzorů

PIR senzor	Kladný element		Záporný element		Plocha elementu [mm ²]
	U _{outčidla} [mV/°C]	Frekv. poh. [Hz]	U _{outčidla} [mV/°C]	Frekv. poh. [Hz]	
RE200B	0,83	0,29	0,86	0,29	2 x 1
LHI878	0,89	0,33	0,93	0,33	2 x 1
IRS-A200ST01-R1	0,43	0,55	0,43	0,55	2,5 x 0,55
CSL-051	0,43	0,45	0,39	0,45	2 x 1
LHI1128	B 0,55	D 0,59	0,33	A 0,57 C 0,53	0,33 1 x 1

Tab. 5.2 – Souhrn naměřených hodnot ze statických charakteristik PIR senzorů

V níže uvedené tabulce 5.3 jsou hodnoty pouze odhadovány z naměřených hodnot. Lze je tedy brát jen pro informaci. Modrou barvou je zvýrazněno odhadované frekvenční pásmo pro oba elementy. Je zde bráno vždy vyšší číslo pro dolní frekvence a nižší číslo pro horní frekvence. Tím je zaručena detekce objektu v tomto pásmu pro oba elementy.

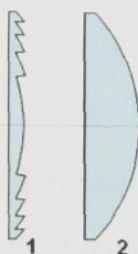
Frekvenční pásmo u PIR senzorů je bráno při poklesu o 6 dB, tedy poloviční napětí proti maximálnímu $U_{outčidla}$, které je uvedeno v tabulce 5.1. Zobrazovaná frekvence je pouze pro jeden element, je to tedy jen půlvlna. Modře zvýrazněná část je frekvence pro oba elementy, tedy dvojnásobná.

PIR senzor	Kladný element		Záporný element		Odhadované frekv. pásmo [Hz]
	Frekv. pásmo [Hz]		Frekv. pásmo [Hz]		
RE200B	0,12 – 0,90		0,13 – 0,90		0,26 – 1,80
LHI878	0,13 – 1,11		0,15 – 0,94		0,30 – 1,88
IRS-A200ST01-R1	0,16 – 1,80		0,15 – 1,70		0,32 – 3,40
CSL-051	0,16 – 1,80		0,15 – 2,22		0,32 – 3,60
LHI1128	B	D	A	C	0,32 – 2,50
	0,14 – 1,25	0,15 – 1,30	0,16 – 1,30	0,13 – 1,40	

Tab. 5.3 – Frekvenční pásmo PIR senzorů při poklesu o 6 dB

6. Fresnelova čočka

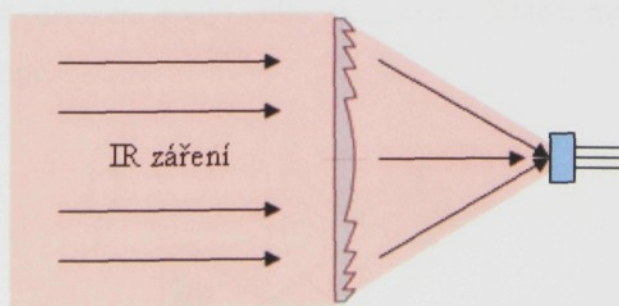
Byla pojmenována podle francouzského vědce a fyzika Augustina-Jeana Fresnela, který odebral z „běžné“ čočky materiál, který se nepodílí na lámání světla. Čočka má horší parametry oproti běžné čočce, její váha je ovšem několikanásobně menší. Patrný rozdíl v tloušťce čoček je zobrazen na obr. 6, lit. [10], kde pod číslem jedna je Fresnelova čočka, číslo dvě – běžná optická čočka.



Obrázek 6: Fresnelova a běžná optická čočka

6.1 Princip Fresnelových čoček

Fresnelova čočka stejně jako běžná optická čočka soustřeďuje IR záření (světlo) do ohniska (obr. 6.1). Umožňuje detekci pohybu na vzdálenosti až desítek metrů. V plastovém provedení se dají ohýbat a jejich úhel detekce je pak větší než 90 °.



Obrázek 6.1: Lom světla (IR záření) Fresnelovou čočkou

6.2 Druhy Fresnelových čoček

Fresnelovy čočky mají všeobecné možnosti použití. Jejich použití je např. u okenních tabulí, kde v létě odrážejí světlo (IR záření) a v zimě ho naopak propouští (regulují klima v objektu). Největší sortiment se nachází v oblasti „běžné“ čočky (lupy).

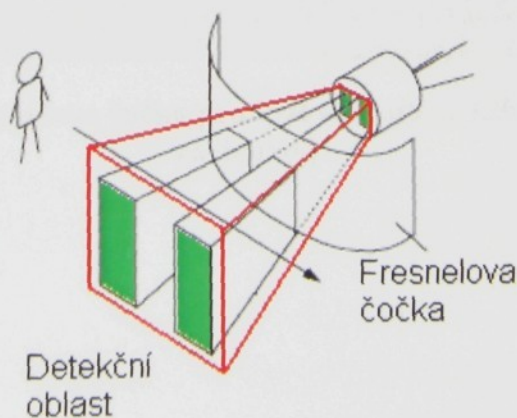
Jejich nesmírnou výhodou je tloušťka. Méně viditelná oblast použití je u PIR senzorů. Jsou zhotoveny z plastového nebo skleněného materiálu.

Pro detektory pohybu jsou čočky členité jak v horizontálním tak i ve vertikálním směru. Druhy těchto čoček se liší v:

- počtu záclon (vějířů) – členitost v horizontálním směru
- počtu detekčních oblastí – členitost ve vertikálním směru
- úhlu detekce – až 150°
- tvaru a velikosti
- použití pro vodorovnou nebo svislou záclonu

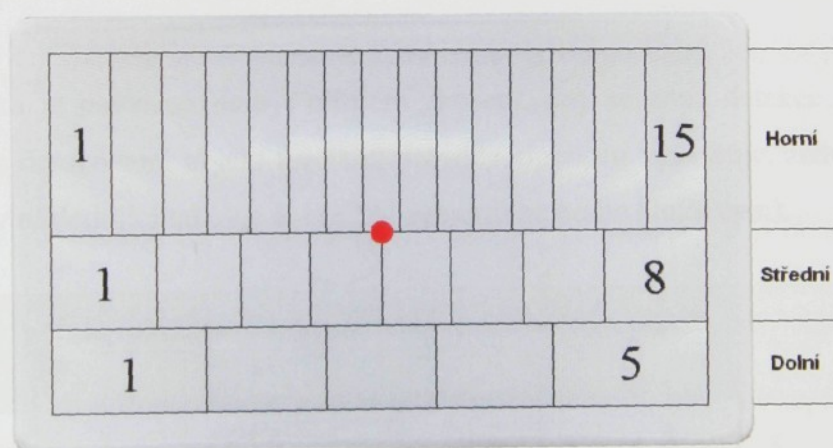
6.3 Teoretický rozbor vlastností Fresnelovy čočky s PIR senzorem

Každý PIR senzor má z důvodu absence čočky (obsahuje pouze filtr pro IR záření) velký zorný úhel. Je tedy zapotřebí IR záření směřovat na jednotlivé elementy z velké vzdálenosti (jednotky až desítky metrů). Aby IR záření z detekovaného objektu vygenerovalo na senzoru signál s určitou periodou, je Fresnelova čočka rozdělena ve vertikálním směru na několik bloků (rozdělení v horizontálním směru tvoří tzv. záclony). Každý blok (detekční oblast) je jedna čočka. Každá detekční oblast směřuje IR záření na oba elementy (viz obr. 6.3, zvýrazněno červenou barvou). Zelenou barvou je zvýrazněné „vytažení“ obou elementů do určité vzdálenosti. Průchod přes tyto „vytažené“ elementy (detekční zóny) čidlo zaznamená. Kolem nich jsou hluché zóny, na které čidlo nereaguje.



Obrázek 6.3: Detekční oblast Fresnelovy čočky

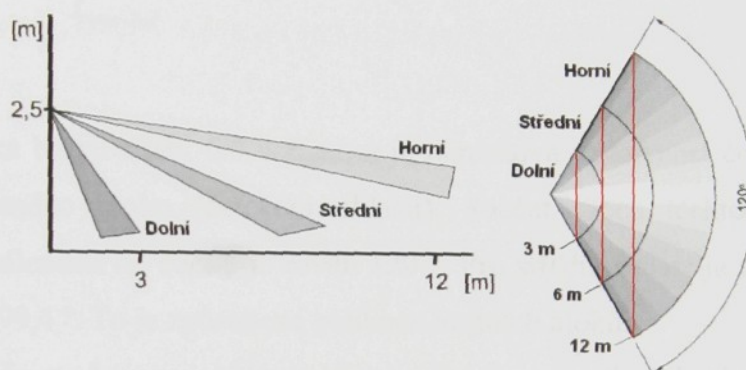
Fresnelovy čočky mají detekčních oblastí až desítky, počet závisí na velikosti čočky a vzdálenosti detekovaného objektu. Zde se vyskytuje problém, kdy detekovaný objekt se pohybuje v těsné blízkosti kolem čočky. Fresnelova čočka poté přenáší IR záření zleva doprava a naopak přes elementy vysokou rychlostí a čidlo nestačí zareagovat. Z tohoto důvodu je Fresnelova čočka pro PIR senzory rozdělena na více vějířů (záclony). Následující obr. 6.3.1 znázorňuje Fresnelovu čočku se třemi vějíři. Horní je pro největší vzdálenosti, dolní pak detekuje objekty v těsné blízkosti čočky. Jednotlivé obdélníky (detekční oblasti) každého vějíře mají jiný rozměr z důvodu zakřivení čočky do kulového tvaru v horizontální rovině. Ve vertikální rovině je zakřivení provedeno posunutím středů jednotlivých čoček (obr. 6.3.1, znázorněno odleskem). Umístění PIR senzoru zobrazuje červená tečka (obr. 6.3.1). Detekční oblast vyobrazeného typu čočky (obr. 6.3.1) je 120° (od středu první do středu poslední detekční oblasti horní řady). Aby se rychlost pohybu objektu vyzařujícího IR záření, které se přesune z jednoho elementu na druhý snížila, musí se jednotlivé detekční oblasti prodloužit (ve vertikálním směru). Tím se ovšem sníží počet těchto oblastí.



Obrázek 6.3.1: Fresnelova čočka pro PIR senzory se 120° detekce a třemi záclonami

6.4 Praktický rozbor vlastností Fresnelovy čočky

Výrobce udává jen nepatrné informace ve formě obrázku (obr. 6.4, lit. [9] – výrobek JA-80P). Aby bylo možné zjistit podrobnější informace, je nutné znát ohniskovou vzdálenost čočky a rozměry jednotlivých obdélníků (detekčních oblastí). Každá čočka je symetrická, aby nebylo mnoho hluchých zón, je horní záclona tvořena lichým počtem detekčních oblastí, střední sudým a dolní opět lichým. Tím je zaručena eliminace hluchých oblastí v místech průniku aspoň dvou záclon, tedy do šesti metrů.



Obrázek 6.4: Výrobce udávané informace o Fresnelově čočce

Čočka je navíc uložena v mírném zkosení, aby se zóna detekce nasměrovala dolů, kde se detekovaný objekt s velkou pravděpodobností vyskytuje. Jednotlivé délky bloků jsou v následující tabulce 6.4 („s“ – symetrické podle bloku osm).

Typ vějíře	Číslo bloku, rozměr bloku [mm]														
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.
Horní	5,75	4,66	4,1	3,7	3,56	3,46	3,4	3,36	S	S	S	S	S	S	S
Střední	9,82	7,52	6,64	6,28	6,28	6,64	7,52	9,82							
Dolní	14,44	10,8	10,06	10,8	14,44										

Tab. 6.4 – Velikosti bloků Fresnelovy čočky

Dle výpočtů (viz příloha J na CD) je ohnisková vzdálenost čočky 26,14 mm. Ohnisková vzdálenost byla zvolena tak, aby úhel detekce byl 120 ° (bráno od středů krajních bloků). Fresnelova čočka je od okénka PIR senzoru 30 mm (dáno výrobcem). Ohnisko je tedy 3,86 mm před senzorem, tím je zaručeno pokrytí celého okénka detekční oblastí, neboť se oblast za ohniskem rozbíhá.

Člověk jako detekovaný objekt se pohybuje nejpravděpodobněji po přímce (nemusí-li se něčemu vyhýbat). Pro zjednodušení experimentu je přímka zvolena jako tětiva při 120° (obr. 6.4, znázorněno červenou čarou) pro každý vějíř a zároveň pokrývá celou detekční oblast. Tím se ovšem jednotlivé detekční zóny prodlužují. Jejich délka se vypočítá dle vzorců:

$$\alpha = \left(\arctg \frac{\frac{L_B}{2}}{L_{ohn-čoč}} \right) * 2 \quad [^\circ], \quad (6.4)$$

kde L_B je délka bloku z tab. 6.4 a $L_{ohn-čoč}$ je ohnisková vzdálenost čočky. Úhel α je zorný úhel daného bloku (detekční oblasti). Součet všech těchto úhlů při dané ohniskové vzdálenosti od čočky je roven 120° . Pro střední oblast je úhel $110,4^\circ$, pro dolní je roven $99,4^\circ$. To je způsobené velikostí krajních bloků.

Aby bylo možné vypočítat vzdálenost hranic jednotlivých bloků od středu, je nutné jednotlivé zorné úhly sečíst. Musí být brán ohled na sudý nebo lichý počet bloků. Dle vzorce (6.5) se vypočítá vzdálenost hranic bloků od středu.

$$L_{vzd} = \frac{L_{ohn-obj}}{\tg(90^\circ - \alpha_c)} \quad [\text{m}], \quad (6.5)$$

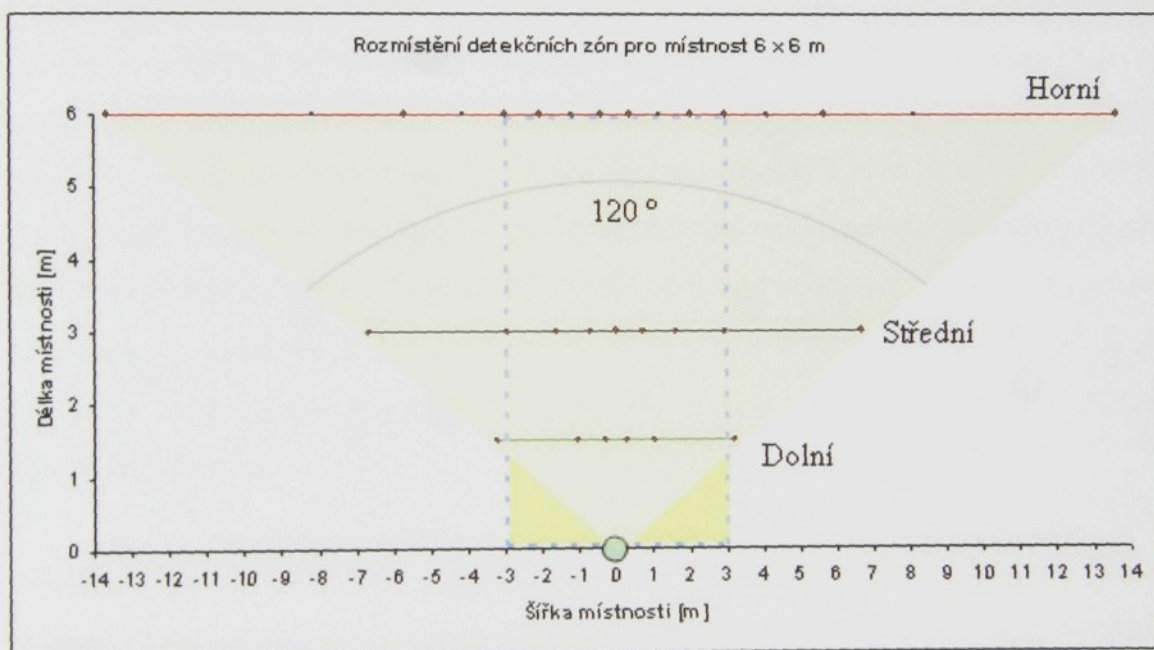
kde L_{vzd} je vzdálenost od středu k hranici detekční oblasti, $L_{ohn-obj}$ je vzdálenost objektu od ohniska (v tomto případě pro horní hranici 6 m, střední 3 m a dolní 1,5 m). Úhel od středu po jednotlivé hranice detekčních oblastí je α_c .

Rozdílem jednotlivých vzdáleností od středu získáme velikost jednotlivých detekčních oblastí L_{do} . Velikosti vypočtených délek pro jednotlivé vějíře jsou v tabulce 6.5 („s“ – symetrické podle bloku osm).

Typ vějíře	Číslo bloku, rozměr detekční oblasti L_{do} [m]								
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9. – 15.
Horní pro 6 m	5,48	2,47	1,57	1,14	0,96	0,85	0,79	0,77	S
Střední pro 3 m	3,73	1,35	0,88	0,73	0,73	0,88	1,35	3,73	
Dolní pro 1,5 m	2,21	0,73	0,58	0,73	2,21				

Tab. 6.5 – Velikosti detekčních oblastí v dané vzdálenosti jednotlivých vějířů

Následující graf 6.6 zobrazuje velikosti detekčních oblastí ve vzdálenostech 6 m, 3 m a 1,5 m pro horní, střední a dolní vějíř. Modrou barvou je znázorněna místnost 6 x 6 m. Detektor je umístěn v hodnotě nula na ose x (zelená barva).



Graf 6.6 – Rozsah detekčního pole v místnosti 6 x 6 m

Maximální a minimální rychlost pohybu pro danou detekční oblast se vypočítá dle jednoduchého vztahu (6.6).

$$v = L_{do} \cdot f \text{ [m/s]}, \quad (6.6)$$

kde v je rychlost pohybu detekovaného objektu, L_{do} je rozměr detekční oblasti.

Za f je dosazena minimální a maximální frekvence z odhadovaného pásma (viz tab. 5.3). Výsledkem je interval rychlosti pohybujícího se objektu pro danou detekční oblast, kde objekt je senzorem zaznamenán.

Detekční zóny jsou omezeny místností 6 x 6 m. Tím je rozsah detekčního pole snížen na 5. až 11. blok horního vějíře, 2. až 7. blok středního vějíře a kompletní oblast dolního vějíře (graf 6.6) v daných vzdálenostech. Z důvodu rozptylu Fresnelovy čočky nebyly uvažovány „hluché“ oblasti, kde čidlo nereaguje na daný pohyb.

Vypočtené hodnoty minimální a maximální rychlosti jsou graficky zobrazeny pro horní vějíř (příloha C a D), pro střední vějíř (příloha E a F), pro dolní vějíř (příloha G a H). Grafy jsou omezeny na místnost 6 x 6 m. Kompletní souhrn informací je v příloze K na CD.

7. Závěr

Z výsledných naměřených hodnot je patrné, že elementy jsou vyráběny stejnou technologií. Jsou zkonstruovány pro detekci pohybujícího se objektu – člověka nebo zvířete. Reagují tedy na chůzi či běh lidské bytosti, která se pohybuje přibližně od 0,5 až po 1,5 m/s.

Jednotlivé hodnoty výstupního napětí $U_{outčidla}$ se liší pouze v jednotkách či desetínách mV. To je způsobeno různými druhy optických filtrů a chybou při odečítání hodnot. Významnými faktory jsou i „čistota“ materiálu a způsob dotace polovodičů.

PIR senzory jsou čidla reagující na IR záření. Jejich detekční vlastnosti jsou v praxi velmi závislé na emisivitě objektu, tedy na oblečení detekované osoby. Dalším důležitým faktorem je vzdálenost detekovaného objektu od senzoru. Vyzařovaná IR energie od objektu klesá s druhou mocninou. Je tedy zapotřebí použít Fresnelovy čočky pro usměrnění IR záření na elementy a tedy zvětšení citlivosti.

Senzor RE200B je svými parametry pro detekci pohybujícího se objektu od 0,5 až 1,5 m/s nejvíce vyhovující (viz tab. 5.1, zvýrazněno oranžovou barvou). Není zde brán ohled na velikosti elementů, čímž je senzor LHI1128 méně citlivý i přes to, že na plochu $1 \times 1 \text{ mm}^2$ generuje větší výstupní napětí $U_{outčidla}$ než senzor RE200B o stejném detekčním povrchu.

Nejmenší reakci na změnu teploty objektu mají senzory CSL-051 a IRS-A200ST01-R1 (viz tab. 5.2, zvýrazněno oranžovou barvou). Mají téměř poloviční hodnotu směrnice vůči senzoru RE200B. Frekvenční pásma těchto senzorů jsou nejširší a detekují i velmi rychlý pohyb (až 2,7 m/s). Frekvenční pásma ostatních senzorů jsou ovšem dostačující a vzhledem k jejich velké reakci na IR záření (nejdůležitější vlastnost) jsou nejpoužívanější.

U charakteristik závislosti výstupního napětí $U_{outčidla}$ na změně teploty objektu je vždy graf jednoho elementu posunut o desetiny mV. To je způsobeno měřeními, která probíhala za sebou. Při měření druhého elementu zůstal první element elektricky nabitý (zbytkové napětí) a hodnotu výstupního napětí $U_{outčidla}$ pro aktuálně měřený element snižoval. Výstupní napětí $U_{outčidla}$ měřených PIR senzorů se pohybovalo v rozmezí 0,4 až 0,9 mV/°C.

Rychlost detekovaného objektu do 1,5 m/s zaznamenají téměř všechny senzory v horním vějíři (viz příloha C). Senzor RE200B je těsně pod hranicí, ovšem v praktickém použití bude objekt detekován (v krajních detekčních oblastech). Pro rychlost od 0,5 m/s je v tomto vějíři úspěšnost 100 % (viz příloha D). Detekce pro malé rychlosti pohybujícího se objektu je u senzoru RE200B již od 0,2 m/s. Pro střední vějíř vyhovují senzory RE200B pouze do 1,32 m/s a LHI878 do 1,37 m/s ostatní jsou plně vyhovující (viz příloha E). I přes větší odchylku od 1,5 m/s bude objekt senzory detekován. Pro nízké rychlosti od 0,5 m/s vyhovují všechny senzory (senzor RE200B již od 0,19 m/s). Pro nejkratší vzdálenosti od detektoru, kde se objekt detekuje přes dolní vějíř, jsou nevyhovující senzory pro rychlosti do 1,5 m/s RE200B (detekce objektu je do 1,04 m/s), LHI878 (detekce objektu je do 1,09 m/s) a LHI1128, kde čtyřelementový senzor je těsně pod hranicí této hodnoty. U senzorů RE200B a LHI878 by objekt už nemusel být detekován za použití pouze dolního vějíře.

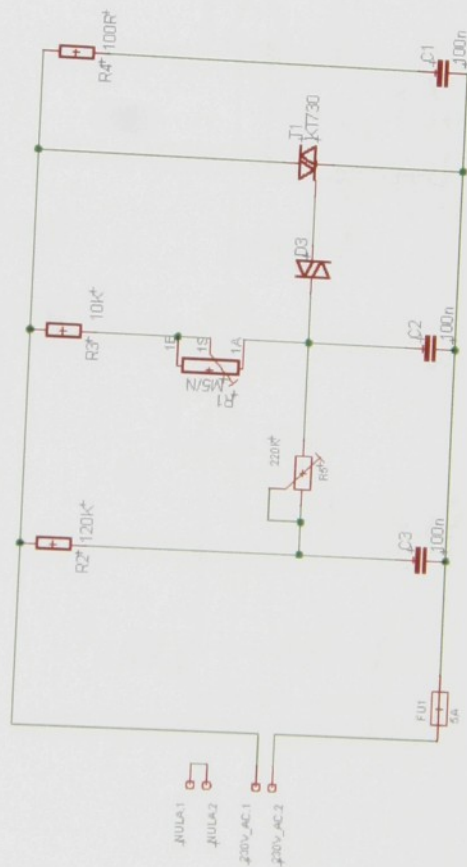
Při umístění detektoru uprostřed místnosti vznikají dva nedetekované rohy (graf 6.6, zvýrazněno žlutě). Je tedy výhodnější umístit detektor do rohu místnosti. Poté detekční zóna pokrývá celou místnost.

Výsledky naměřených charakteristik jsou korektní. Následně by mohlo být provedeno měření teplotní závislosti PIR senzorů pro změnu teploty pouzdra nebo měření dynamických charakteristik s Fresnelovou čočkou, které jsou díky rozptylu čočky obtížně měřitelné.

Použitá literatura

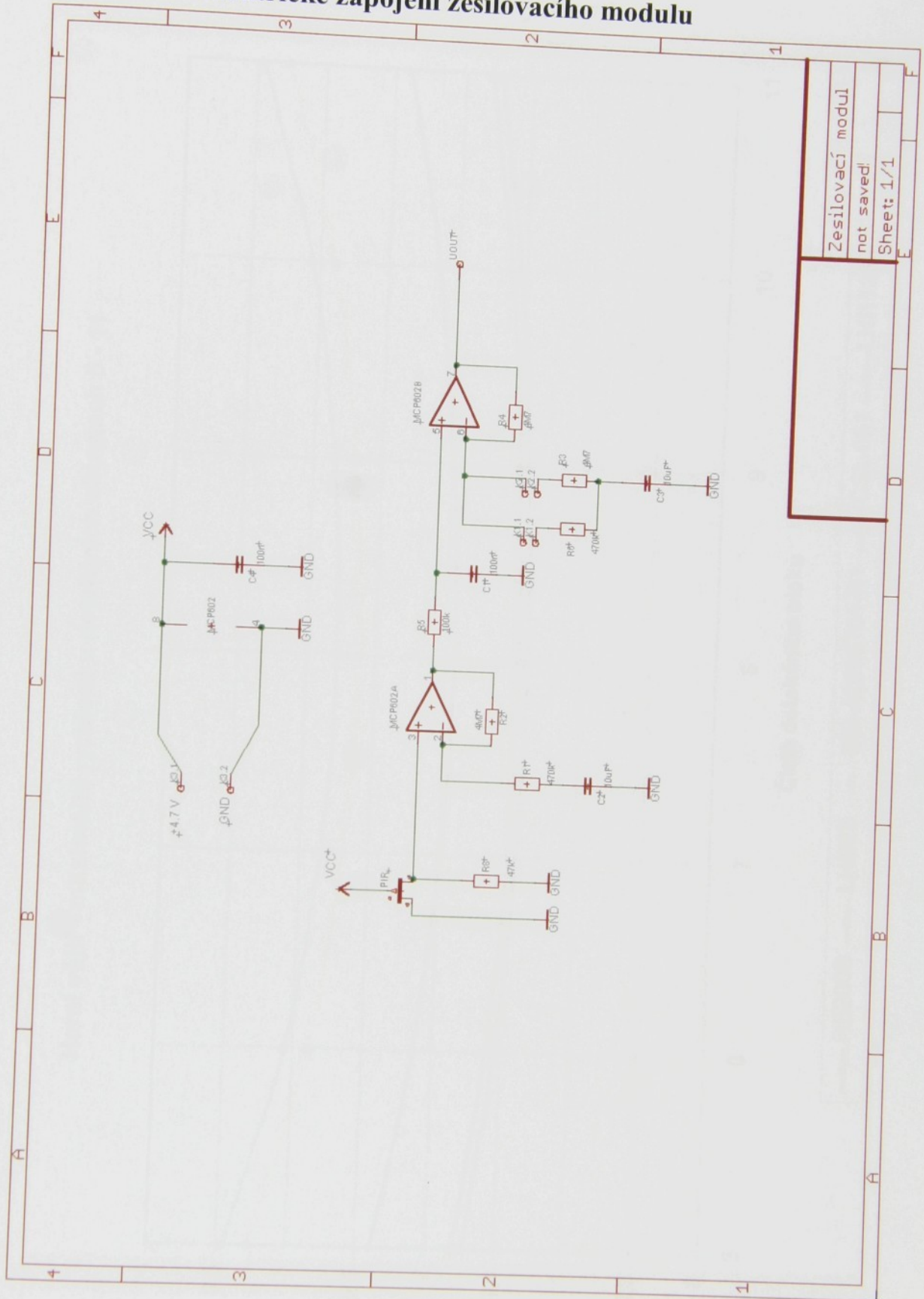
- [1] Đađ'o, S., Kreidl, M.: Senzory a měřící obvody. ČVUT, Praha, 2001
- [2] Lysenko, V.: Detektory pro bezdotykové měření teplot. BEN, Praha 2005
- [3] Vaško, A.: Infračervené záření a jeho užití. SNTL, Praha 1963
- [4] Příloha A na CD
- [5] www.murata.com
- [6] Příloha B na CD
- [7] www.microchip.com
- [8] www.jabel.com.pl
- [9] www.jablotron.cz
- [10] www.wikipedia.cz

Příloha A – Elektrické zapojení triakové regulace výkonu



triaková regulace
01.05.2008 21:46:50
Sheet: 1/1

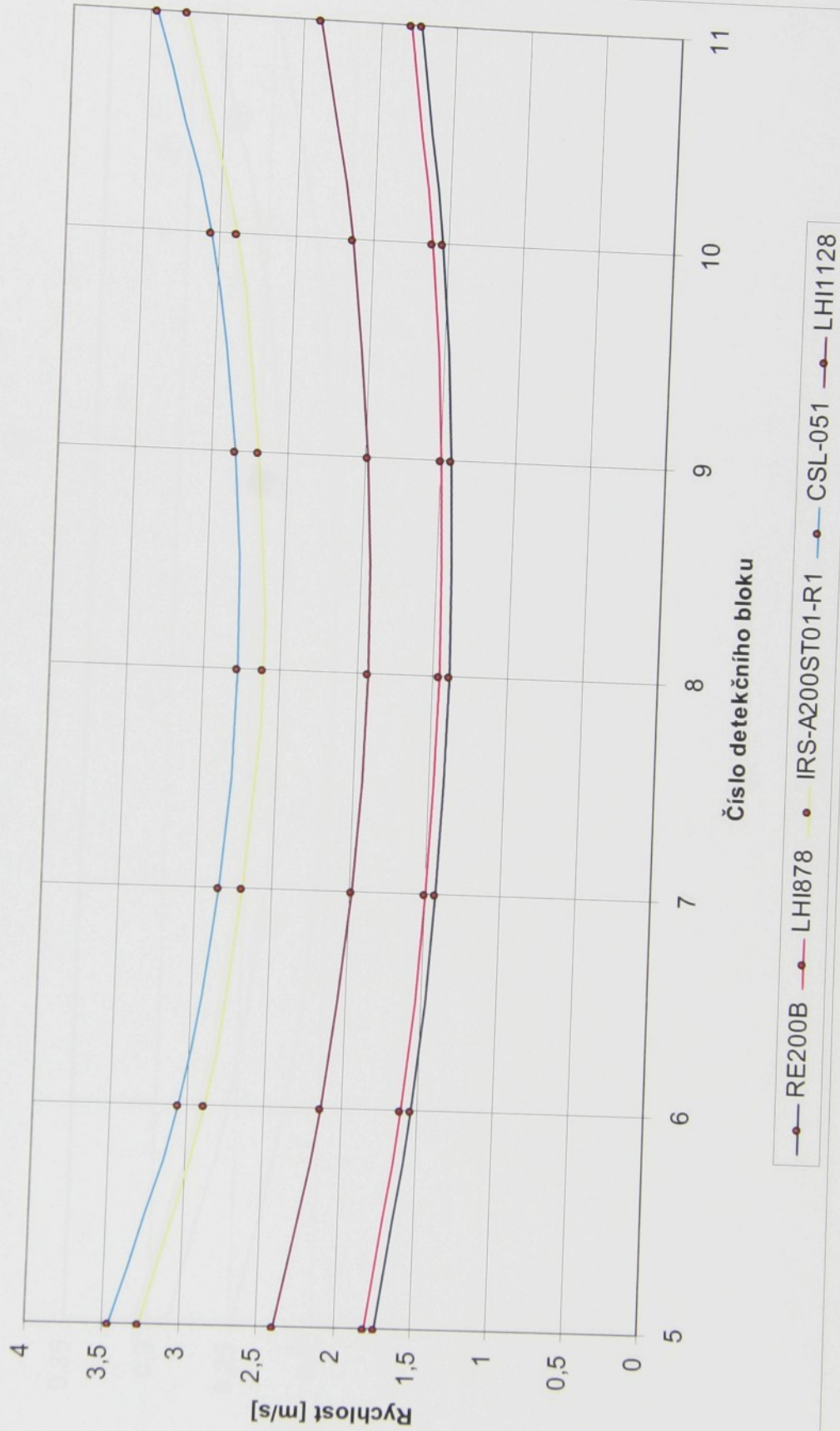
Příloha B – Elektrické zapojení zesilovacího modulu



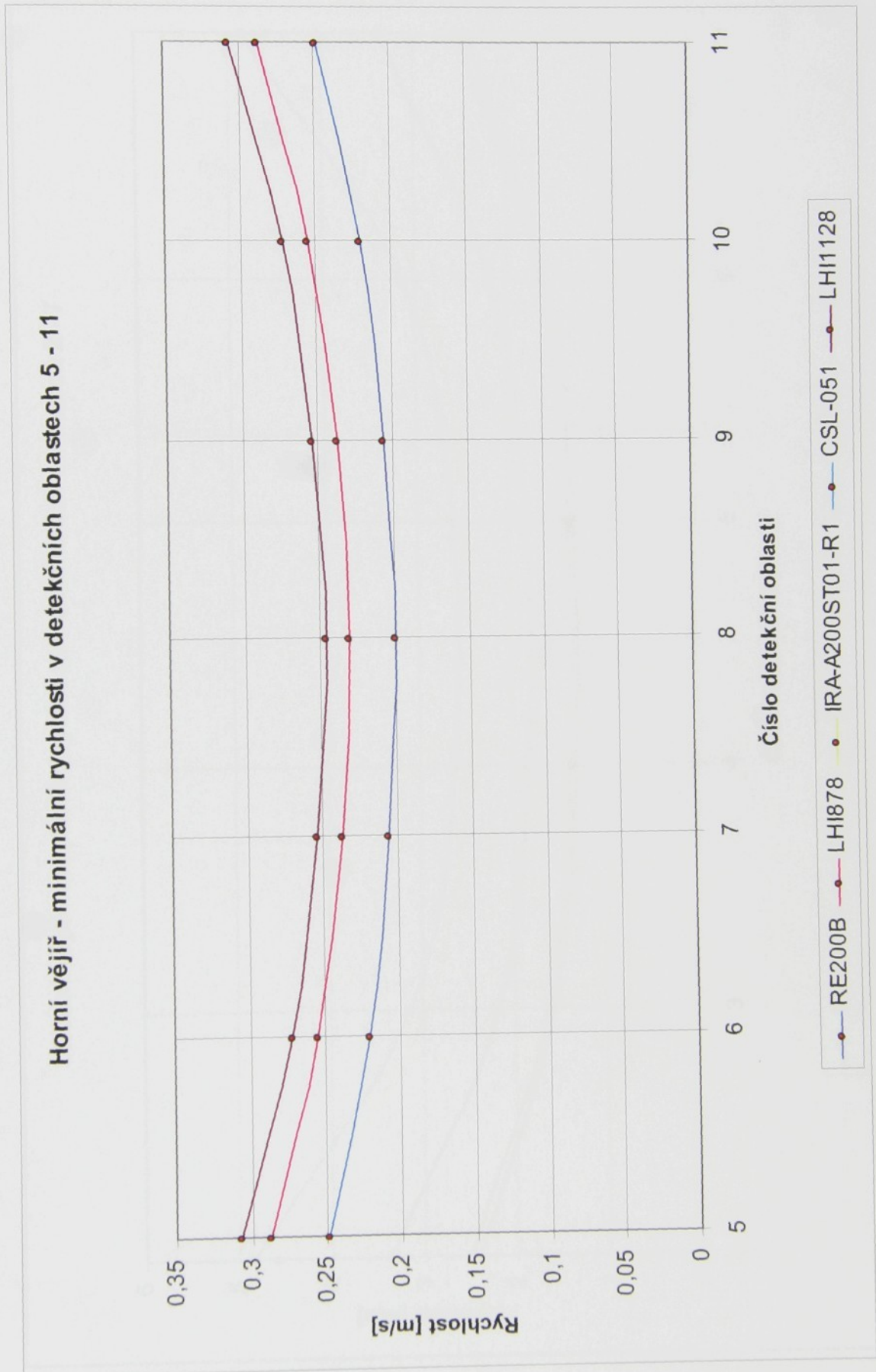
Zesilovací modul
not saved
Sheet: 1/1

Příloha C – Horní vějíř – maximální rychlosti

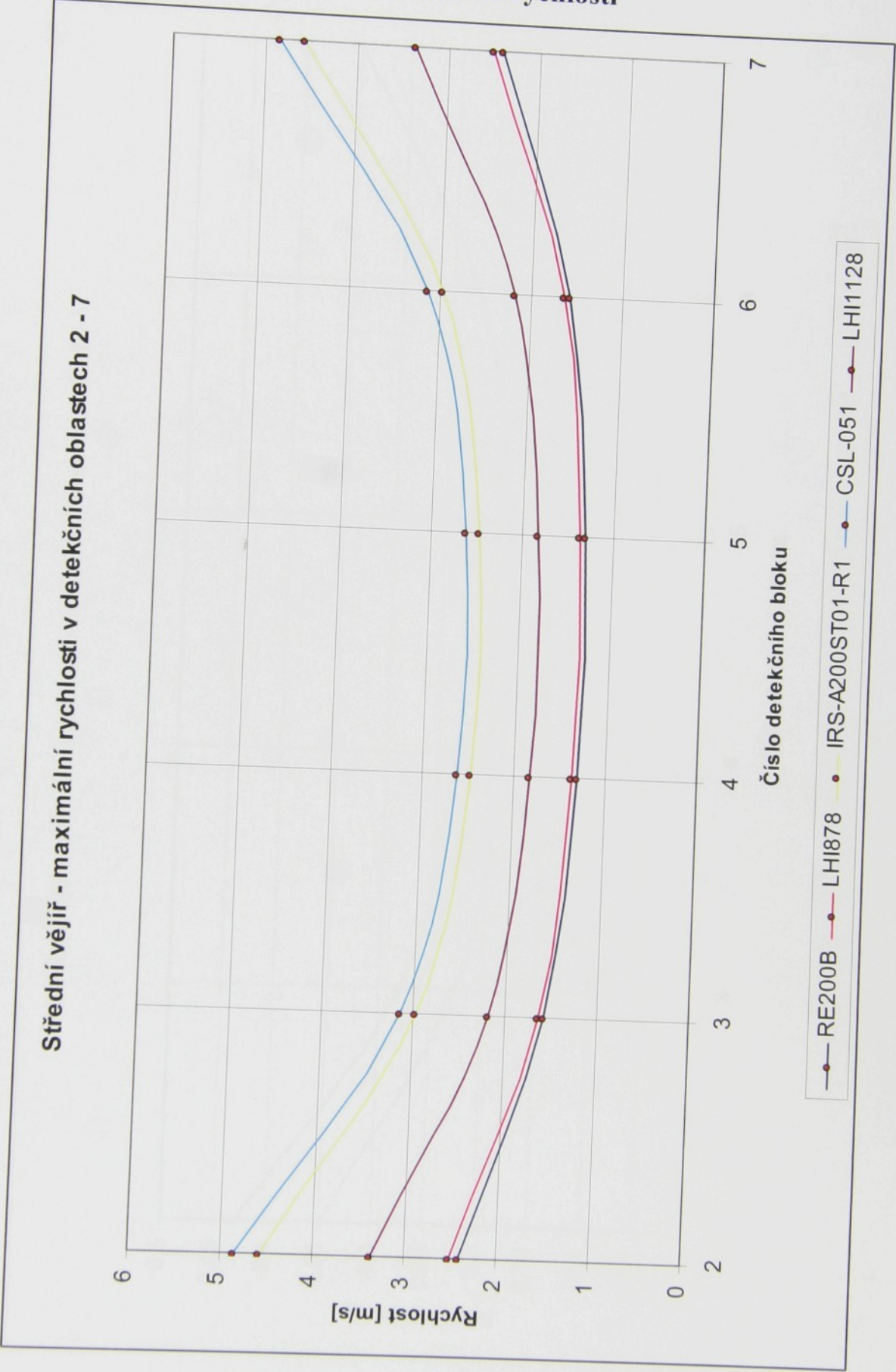
Horní vějíř - maximální rychlosti v detekčních oblastech 5 - 11



Příloha D – Horní vějíř – minimální rychlosti

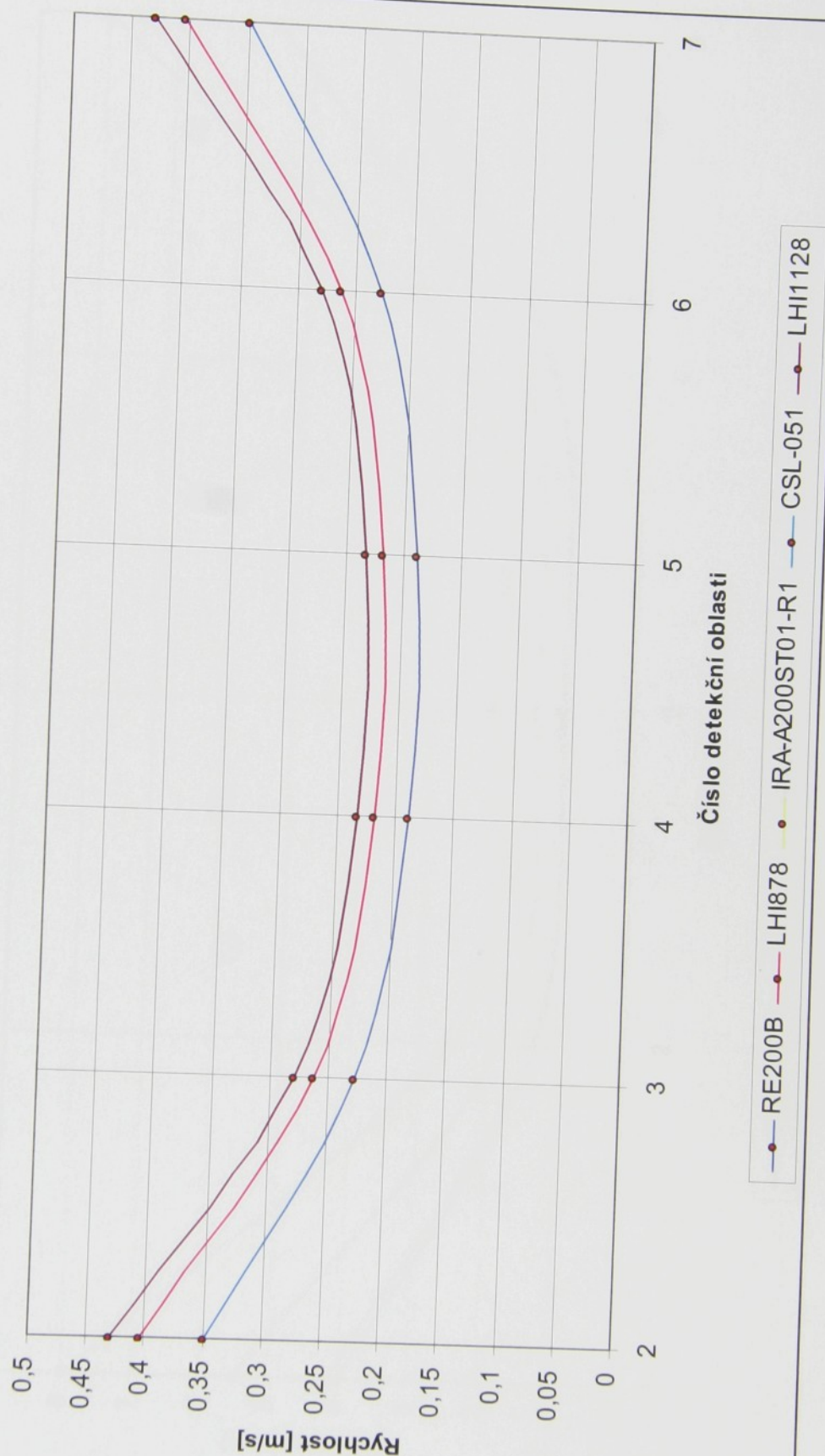


Příloha E – Střední vějíř – maximální rychlosti

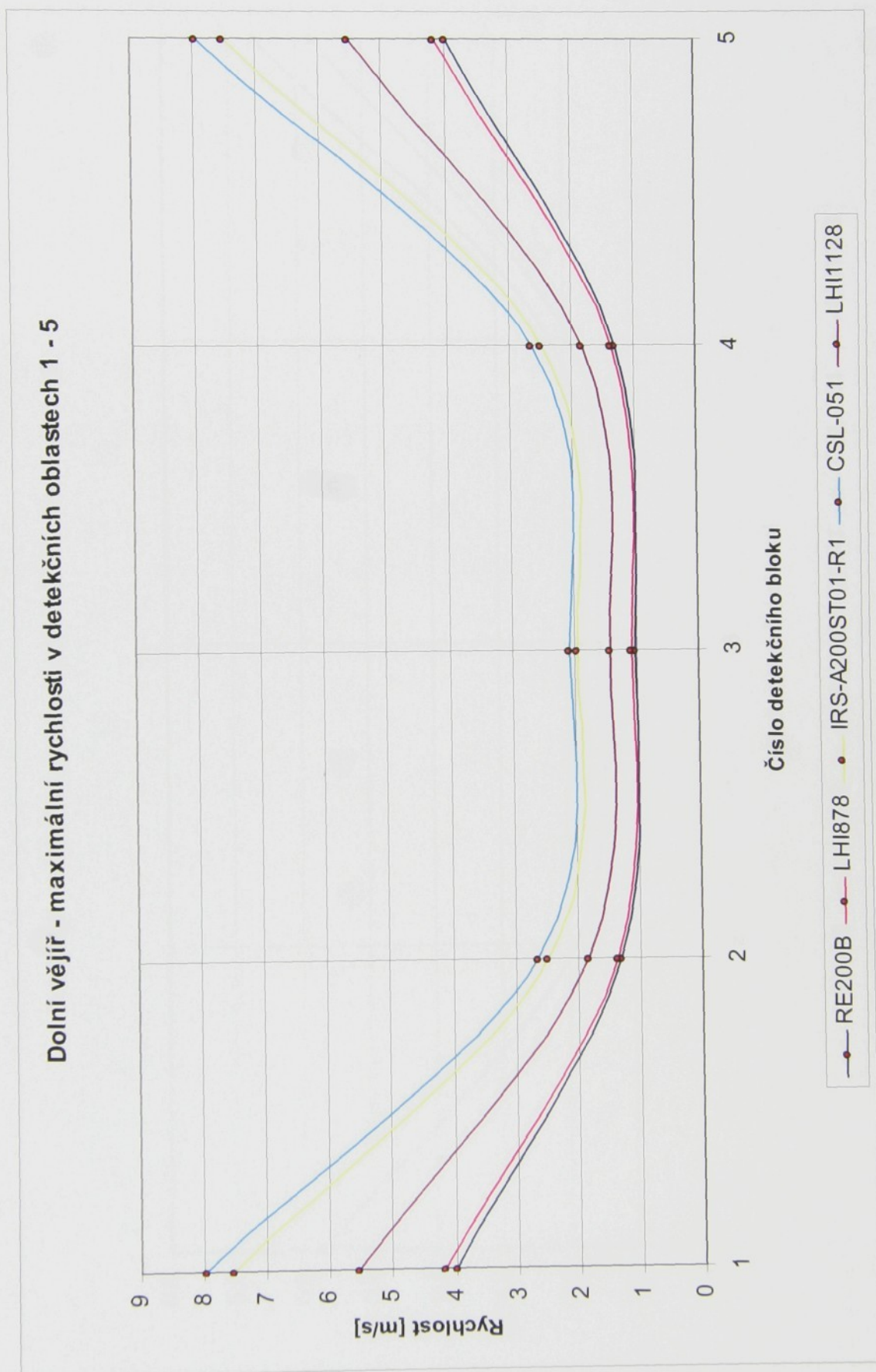


Příloha F – Střední vějíř – minimální rychlosti

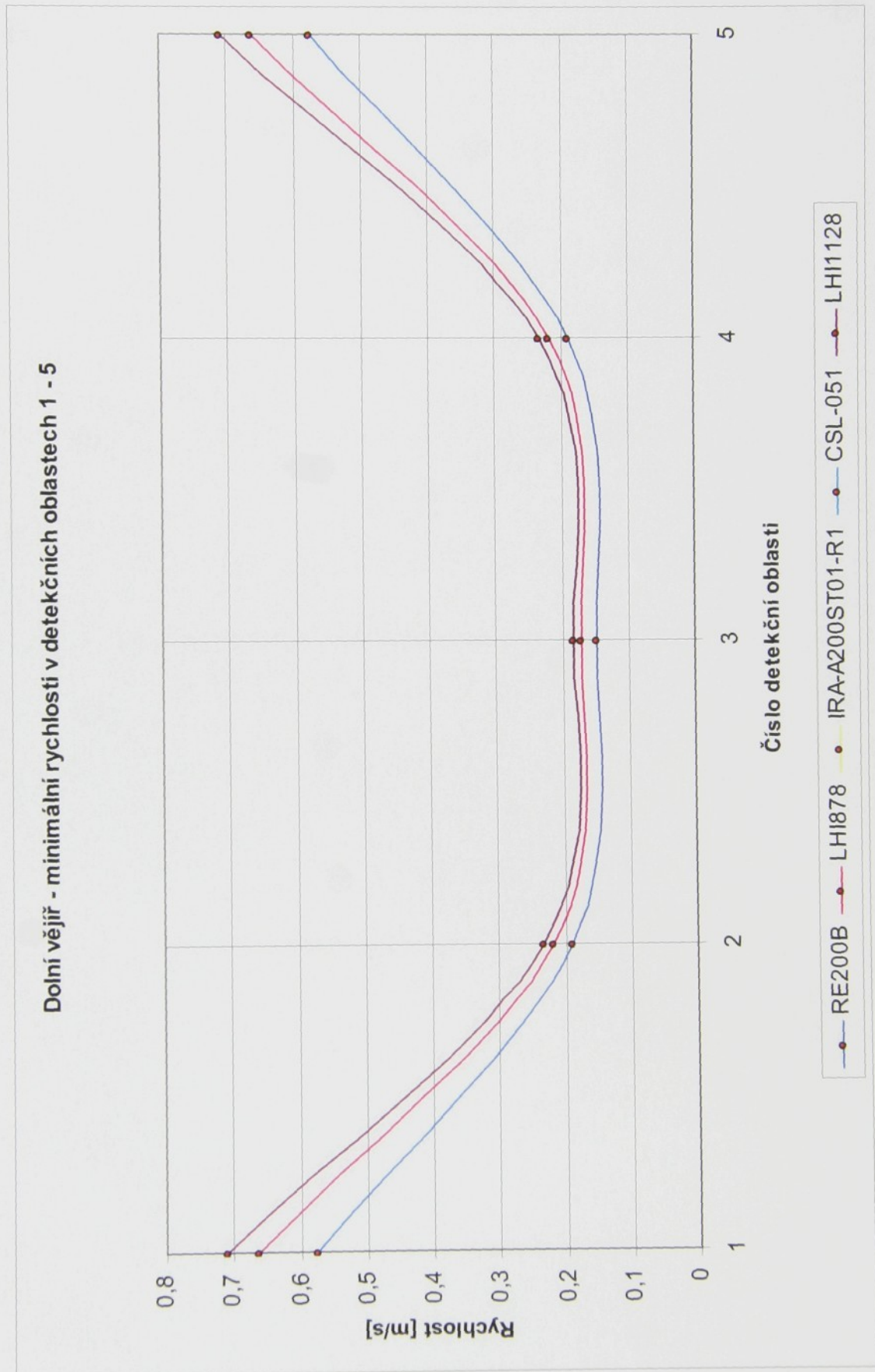
Střední vějíř - minimální rychlosti v detekčních oblastech 2 - 7



Příloha G – Dolní vějíř – maximální rychlosti



Příloha H – Dolní vějíř – minimální rychlosti



V26/08M
+ CD