

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích  
Pedagogická fakulta

---

# **Realizace zařízení pro optické snímání a digitální záznam psaného textu a grafiky**

**Bakalářská práce**

Ivan Štancl

Vedoucí práce: doc. PaedDr. Petr Adámek, Ph.D.

České Budějovice 2006

## **Anotace**

Tato práce se zabývá návrhem elektronické části experimentální elektronické tabule sloužící pro bezdotykové snímání psaného textu a grafiky pomocí laserového skenování. Řešení je zaměřeno především na digitalizaci běžné školní tabule, tedy na možnost záznamu textu a grafiky za použití běžné křídy či značkovačů na pasivní psací ploše. Důraz je kladen na konstrukční jednoduchost snímacího systému a minimalizaci nákladů.

## **Abstract**

This work deals with the design of the electronic part of the experimental electronic chalkboard for contactless handwriting recording using the laser scanning method. The solution is focused in particular to the common school chalkboard digitization, i.e. the possibility to record the handwriting using ordinary chalk or markers on the passive working surface. The design emphasises the simplicity of the sensor system and costs reduction.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně, a že jsem všechny použité prameny uvedl v seznamu literatury.

V Českých Budějovicích 20. 12. 2006

.....

Děkuji vedoucímu práce doc. Adámkovi za cenné rady a připomínky i za velkou dávku trpělivosti. Rovněž děkuji ing. Šerému za připomínky k práci a pomoc při dokončování práce.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod a cíle práce</b>	<b>11</b>
1.1	Úvod . . . . .	11
1.2	Cíle práce . . . . .	12
<b>2</b>	<b>Digitalizace rukopisného textu a grafiky</b>	<b>14</b>
2.1	Technologie snímání rukopisu . . . . .	14
2.2	Příklady existujících zařízení . . . . .	15
2.2.1	Interaktivní tabule Smart Board . . . . .	16
2.2.2	Mimio Xi . . . . .	16
2.2.3	ACECAD DigiMemo . . . . .	16
2.2.4	Anoto . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Analýza</b>	<b>19</b>
3.1	Volba metody snímání – úvodní úvahy . . . . .	19
3.2	Předmět snímání . . . . .	21
3.2.1	Psací pomůcky . . . . .	21
3.2.1.1	Křída . . . . .	21
3.2.1.2	Značkovač pro suchou tabuli . . . . .	21
3.2.2	Rukopis . . . . .	21
3.2.2.1	Charakteristiky rukopisu v časové a frekvenční oblasti	21
3.2.2.2	Držení a poloha pera . . . . .	22
3.3	Navrhované zařízení . . . . .	25
3.3.1	Blokové schéma . . . . .	25
3.3.2	Snímací systém . . . . .	26
3.3.2.1	Optické metody měření polohy . . . . .	26
3.3.2.2	Varianty řešení snímacího systému . . . . .	29
3.3.2.3	Volba varianty řešení . . . . .	30
3.3.2.4	Parametry snímání . . . . .	30
3.3.2.5	Radiometrická rozvaha . . . . .	31
3.3.2.6	Selektivní fotodetekce . . . . .	36
3.3.2.7	Modulační frekvence laseru . . . . .	38
3.3.2.8	Vlnová délka laseru . . . . .	39
3.3.2.9	Detekce dvojice laserových svazků jediným fotode- tektorem . . . . .	41
3.3.3	Zpracování snímaných dat . . . . .	42
3.3.3.1	Transformace souřadnic . . . . .	42
3.3.3.2	Určení polohy pera z obrazových dat . . . . .	44
3.3.4	Chyby měření a jejich korekce . . . . .	46
3.3.4.1	Chyby měření . . . . .	46
3.3.4.2	Korekce systematických chyb pomocí kalibrace . . . .	50

<b>4</b>	<b>Návrh zařízení</b>	<b>52</b>
4.1	Koncepce zařízení . . . . .	52
4.1.1	Uspořádání snímacího systému . . . . .	52
4.1.1.1	Počet a poloha scannerů . . . . .	52
4.1.1.2	Počet a poloha fotodetektorů . . . . .	52
4.1.2	Konstrukční řešení . . . . .	53
4.1.3	Blokové schéma . . . . .	54
4.2	Elektronická část . . . . .	55
4.2.1	Modul zpracování signálu a řízení . . . . .	55
4.2.1.1	Blokové schéma . . . . .	56
4.2.1.2	Obvodové řešení modulu . . . . .	57
4.2.1.3	Mikrokontrolér . . . . .	57
4.2.1.4	Časová základna . . . . .	58
4.2.1.5	Řídící logika . . . . .	58
4.2.1.6	Obvody rozhraní . . . . .	59
4.2.1.7	Napájecí obvody . . . . .	60
4.2.1.8	Budoucí rozšíření . . . . .	60
4.2.2	Scanner . . . . .	61
4.2.2.1	Blokové schéma . . . . .	61
4.2.2.2	Požadavky na zdroj laserového záření . . . . .	61
4.2.2.3	Volba typu laseru . . . . .	62
4.2.2.4	Buzení laseru . . . . .	62
4.2.2.5	Ověřovací zapojení budiče laseru . . . . .	64
4.2.2.6	Chlazení laseru . . . . .	66
4.2.2.7	Rozmítání laserového svazku . . . . .	66
4.2.2.8	Snímání polohy laserového svazku . . . . .	67
4.2.2.9	Uspořádání mechanických částí scanneru . . . . .	68
4.2.2.10	Řízení a synchronizace scannerů . . . . .	69
4.2.2.11	Konečné obvodové řešení modulu scanneru . . . . .	71
4.2.3	Fotodetektor . . . . .	71
4.2.3.1	Blokové schéma . . . . .	71
4.2.3.2	Fotodetekční prvek . . . . .	72
4.2.3.3	Optická soustava . . . . .	72
4.2.3.4	Zesilovač fotodiody . . . . .	73
4.2.3.5	Řízení zesílení . . . . .	74
4.2.3.6	Synchronní detektor . . . . .	76
4.2.3.7	Ověření funkce fotodetektoru . . . . .	76
4.2.3.8	Konečné obvodové řešení fotodetektoru . . . . .	77
<b>5</b>	<b>Realizace</b>	<b>80</b>
5.1	Výroba speciálních dílů a jejich kompletace . . . . .	80
5.2	Výroba desek plošných spojů a jejich osazení . . . . .	80
5.3	Oživení . . . . .	81

5.3.1	Modul zpracování signálu a řízení . . . . .	81
5.3.2	Modul scanneru . . . . .	82
5.3.3	Modul fotodetektoru . . . . .	83
5.3.3.1	Optická soustava . . . . .	83
5.3.3.2	Stínění . . . . .	84
5.3.3.3	Modifikace zapojení . . . . .	84
5.3.4	Testovací tabule . . . . .	85
<b>6</b>	<b>Dosažené výsledky</b>	<b>86</b>
6.1	Realizované zařízení . . . . .	86
6.2	Funkce modulů . . . . .	87
6.3	Cena komponentů . . . . .	88
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>92</b>
	<b>Literatura</b>	<b>94</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>100</b>
<b>A</b>	<b>Schémata zapojení modulů</b>	<b>101</b>
<b>B</b>	<b>Výpis definičního souboru IC7 desky zpracování signálu a řízení</b>	<b>108</b>

## Seznam obrázků

1	Elektromagnetický princip snímání polohy pera . . . . .	15
2	Uspořádání senzorů inerciálního pera . . . . .	16
3	ACECAD DigiMemo A502 . . . . .	17
4	Nokia Digital Pen SU-1B . . . . .	18
5	Geometrie snímání plochy . . . . .	20
6	Značkovač Centropen 8559 . . . . .	22
7	Polohy ruky při psaní křídou – boční pohled . . . . .	23
8	Ukázka polohy ruky při psaní křídou – horní pohled . . . . .	24
9	Ukázka polohy ruky při psaní značkovačem . . . . .	24
10	Blokové schéma zařízení a jeho interakce s okolím . . . . .	25
11	Geometrie snímání polohy bodu v rovině . . . . .	27
12	Optické metody měření vzdálenosti – porovnání dosahu a rozlišení . . . . .	28
13	Problém korespondence . . . . .	29
14	Schéma laserového scanneru . . . . .	30
15	K rozlišení polohy . . . . .	32
16	K rozboru radiometrických poměrů snímání pera . . . . .	32
17	Závislost proudu fotodiody na vzdálenosti $l_2$ ( $0,1 \text{ m} < l_2 < 0,8 \text{ m}$ ) . . . . .	34
18	Závislost proudu fotodiody na vzdálenosti $l_2$ ( $0,8 \text{ m} < l_2 < 1,5 \text{ m}$ ) . . . . .	35
19	Synchronní detektor . . . . .	37
20	Relativní spektrální citlivost vybraných polovodičů . . . . .	40
21	Relativní spektrální citlivost křemíkové fotodiody BPW34 . . . . .	41
22	Kartézské a polární souřadnice pracovní plochy . . . . .	44
23	Segmentace obrazových dat pomocí histogramu . . . . .	46
24	Vliv sklonu pera na určení jeho polohy . . . . .	48
25	Simulace šíření chyb – triangulační základna 1400 mm . . . . .	49
26	Simulace šíření chyb – triangulační základna 1000 mm . . . . .	50
27	Geometrické zkreslení obrazu psací plochy a jeho korekce . . . . .	51
28	Příklady možného pokrytí pracovní plochy zornými poli fotodetektorů . . . . .	53
29	DIN lišta a montážní svorky . . . . .	54
30	Vnitřní uspořádání prvků zařízení - boční pohled . . . . .	54
31	Blokové schéma zařízení . . . . .	55
32	Modul zpracování signálu a řízení – blokové schéma . . . . .	57
33	Modul scanneru - blokové schéma . . . . .	62
34	Laserový modul F-Laser 1 mW 6 mm . . . . .	63
35	Watt-ampérová charakteristika laserové diody . . . . .	63
36	Budič laserového modulu - zjednodušené schéma testovacího zapojení . . . . .	65
37	Schéma scanování šikmým zrcadlem . . . . .	67
38	Clonka pro snímání polohy . . . . .	68
39	Sestava motoru s držákem zrcadla a clonkou . . . . .	68
40	Motor SFF-K10WA uložený ve dvojici průchodek KDF8 . . . . .	69
41	Držák motoru . . . . .	69



42	Synchronizace rozmítání laserových paprsků . . . . .	70
43	Modul fotodetektoru - blokové schéma . . . . .	72
44	Čočka RTX-LI 16 . . . . .	73
45	Transimpedanční zesilovač fotodiody . . . . .	74
46	Transimpedanční zesilovač s potlačením signálu pozadí . . . . .	75
47	Zesilovač s přepínatelným zesílením . . . . .	75
48	Aktivní spínačový detektor s OZ . . . . .	76
49	Zapojení ověřovacího prototypu fotodetektoru . . . . .	77
50	Testování zorného úhlu prototypu fotodetektoru . . . . .	78
51	Upravené uspořádání fotodiody . . . . .	84
52	Modul zpracování signálu a řízení . . . . .	86
53	Modul scanneru . . . . .	86
54	Modul fotodetektoru . . . . .	87
55	Detail testovací tabule . . . . .	88
56	Signál *START scanneru . . . . .	89
57	Signál *SCANCLK scanneru . . . . .	89
58	Ukázka výstupu fotodetektoru - prsty ruky . . . . .	90
59	Ukázka výstupu fotodetektoru - křída a prst . . . . .	90
60	Ukázka výstupu fotodetektoru - křída . . . . .	91
61	Schéma scanneru . . . . .	102
62	Schéma fotodetektoru . . . . .	103
63	Schéma fotodetektoru po úpravách během stavby a ožívování . . . . .	104
64	Schéma modulu zpracování signálu a řízení – list 1 . . . . .	105
65	Schéma modulu zpracování signálu a řízení – list 2 . . . . .	106
66	Schéma modulu zpracování signálu a řízení – list 3 . . . . .	107

## Seznam tabulek

1	Frekvence signálů časové základny . . . . .	59
2	Měření parametrů laserového modulu F-Laser 1 mW 6 mm . . . . .	65
3	Frekvence signálů časové základny po úpravách . . . . .	83
4	Ceny komponentů, DPS a montážního materiálu . . . . .	88

# 1 Úvod a cíle práce

## 1.1 Úvod

Komunikace mezi lidmi má jen stěží vyčíslitelné množství podob. Ačkoli k prostému dorozumění postačuje obvykle znalost společného jazyka<sup>1</sup>, efektivita mnohých způsobů komunikace je závislá na využití bohatšího spektra komunikačních prostředků. Chceme sdělovat více, rychleji, oslovovat více posluchačů a hledáme pro svoje úsilí oporu ve více či méně sofistikovaných technologiích a metodách.

Jedním z nejvýznamnějších komunikačních prostředků je školní tabule, jakkoli by se takové tvrzení mohlo na první pohled zdát přehnané. Každý z nás, kdo absolvoval školní docházku v obvyklém rozsahu, má za sebou několik tisíc<sup>2</sup> hodin výměny informací prostřednictvím školní tabule; ta tak alespoň v určitém období života představuje komunikační médium významem srovnatelné například s televizí.

Ačkoli tabule a křída je užívána ve výuce již několik set let a v průběhu 19. století doznala hromadného rozšíření [1], její podoba ani způsob použití se v podstatě nezměnily. To svědčí o tom, že tabule je pomůckou, která vcelku uspokojivě plní funkce, které od ní očekáváme - umožňuje velmi rychle a názorně vyjádřit myšlenky jednoduchým způsobem bez nároku na zvláštní dovednosti a sdělit je najednou relativně velkému počtu posluchačů.

Ovšem v dnešní době, která bouřlivě mění chápání toho, co je komfortní a efektivní komunikace, se výrazně rýsují i omezení tradiční tabule. Zatímco vytvoření obsahu je jednoduché, jeho snímání, zpracování a uložení je obtížné. Žáci a studenti tak i ve 21. století zaznamenávají obsah tabule stejným způsobem, jakým to dělali jejich předchůdci před desítkami a stovkami let. Její těžkopádnost ji tedy ve funkci samostatného komunikačního prostředku znevýhodňuje oproti modernějším nástrojům; naopak intuitivnost a přirozenost jejího používání z ní činí potenciálně velmi zajímavý prostředek pro interakci člověk–počítač a pro vstup grafických dat.

Snahy o snímání rukopisného textu nejsou nového data. První pokusy o konstrukci zařízení připomínajících dnešní tablety se objevují na přelomu 50. a 60. let a jsou zaměřeny především na dálkový přenos dat [2, 3]. S pozdějším rozšířením počítačů v 80. letech získaly tyto snahy novou motivaci – snímaná data bylo možné dále zpracovávat a ukládat. Rozvoj elektroniky a pokles cen elektronických prvků také posunul zájem inovátorů od původně malých přístrojů k velkoformátovým řešením. Od té doby se objevila dlouhá řada více či méně sofistikovaných reinkarnací oné tradiční černé či zelené desky.

Navzdory tomu ona zdánlivě jednoduchá úloha zaznamenat texty a kresby psané na tabuli nemá doposud ideální řešení. Jedním z důvodů tohoto stavu je skutečnost, že k uspokojivému řešení problému je třeba kompromisně skloubit řadu protichůd-

<sup>1</sup>ať už je jím jazyk verbální či nonverbální

<sup>2</sup>Např. při 13 letech školní docházky, 9 měsících výuky ročně s průměrně 22 pracovními dny měsíčně po 5 hodinách výuky denně a s odhadnutým využitím tabule v hodině 30% by šlo o  $13 \times 9 \times 22 \times 5 \times 0,3 = 3861$  hodin.

ných požadavků, jako je dostatečná velikost snímané plochy, odpovídající rozlišení a rychlost snímání, odolnost a životnost psací plochy, ergonomické požadavky či přijatelné náklady na pořízení a provoz. To dává tušit, že má smysl hledat spíše řešení optimalizovaná pro konkrétní aplikace než univerzálně použitelný koncept.

Přestože si v posledních letech elektronické tabule pozvolna nacházejí svou cestu do škol, jejich využití ve výuce je dosud spíše sváteční událostí než každodenní samozřejmostí. Zájem se soustřeďuje především na interaktivní tabule, které však jejich vysoká cena<sup>3</sup> a často velmi složitá ovládání staví do role speciální techniky, často instalované v učebnách se zvláštním režimem.

V současnosti nejběžnější metody snímání polohy pera využívají aktivních elektromagnetických nebo rezistivních povrchů, které jsou ve velkém formátu velmi nákladné, nebo speciálních aktivních per, která vyžadují bateriové napájení a bývají obvykle ergonomicky poněkud nevhodná. Jejich použití často vyžaduje poněkud nestandardní techniky psaní (zvětšený tlak na pero, zvláštní polohu pera při psaní, omezenou rychlost pohybu pera). Takováto řešení vyhovují pro zařízení typu interaktivních tabulí, kde je akcentována schopnost interakce s uživatelem a spolupráce s programovým vybavením, vysoké rozlišení a multimediální charakter aplikace.

Jiné oblasti použití, kde je spíše než interakce cílem velkoformátový záznam textu bez ergonomických omezení s minimálními náklady, se však vyznačují odlišnými požadavky na technické řešení. Předmětem zájmu této práce je především záznam textu a grafiky při každodenním několikahodinovém nasazení ve výuce.

## 1.2 Cíle práce

Vývojové úsilí směřující k vytvoření jednoduché, intuitivně použitelné elektronické tabule pro záznam textu a grafiky zahrnuje několik etap. Tato práce se zabývá první etapou projektu, která spočívá v návrhu a realizaci hardwarové části experimentální elektronické tabule. Hlavním záměrem práce je navrhnout a ověřit koncept nízkonákladového řešení pro snímání a záznam textu a grafiky, který by v dalších etapách vývoje posloužil jako platforma pro vývoj programového vybavení a jako základ pro konstrukční řešení budoucího produktu určeného pro sériové nasazení.

Tato práce si klade za cíl:

- (c1) Provést analýzu úlohy a navrhnout vhodnou metodu snímání, která by vyhovovala dále formulovaným požadavkům na zařízení.
- (c2) Navrhnout strukturu zařízení, obvodové řešení a základní mechanické prvky zařízení.
- (c3) Zkonstruovat prototyp navrženého zařízení.
- (c4) Ověřit funkci prvků zařízení a posoudit vhodnost volby metody a navrženého řešení pro daný účel.
- (c5) Identifikovat problémové oblasti návrhu, na něž by se měl zaměřit další vývoj a zdokonalení v následujících fázích projektu.

---

<sup>3</sup>V současnosti se běžná cena interaktivních tabulí bez projektoru pohybuje v rozmezí zhruba 50 000 až 100 000 korun.

Hlavní požadované vlastnosti zařízení vyvíjeného v první etapě projektu lze shrnout do následujících bodů:

- (p1) možnost použití obyčejné křídly nebo standardních popisovačů;
- (p2) možnost provedení jako přídavné zařízení pro běžnou tabuli nebo jinou pasivní plochu
- (p3) pracovní plocha s úhlopříčkou alespoň 1,5 m
- (p4) připojení k PC některým ze standardních rozhraní
- (p5) nízká cena – náklady na komponenty prototypu nepřesahující 6000 Kč;
- (p6) jednoduchá konstrukce používající (až na opodstatněné výjimky) běžně dostupné nebo snadno vyrobitelné komponenty.
- (p7) kompaktnost řešení.

## 2 Digitalizace rukopisného textu a grafiky

Zařízení, která využívají snímání psaného textu<sup>4</sup> a jeho převod do elektronické podoby, existují v široké škále provedení a slouží k řadě účelů – např. k interakci člověka s počítačem, k záznamu poznámek, k výuce, k nácviku psaní, v lékařské diagnostice apod.

Podle provedení je možné zařízení umožňující převod rukopisného textu do elektronické podoby rozdělit do několika skupin:

**Elektronické a interaktivní tabule** – velkoplošná zařízení s úhlopříčkou od 1 m až do zhruba 2,5 m; slouží především k výuce a prezentačním účelům, interaktivnímu ovládání aplikací, skupinové interakci apod.

**Elektronické zápisníky** (tzv. *Writing Pads*) – lehká přenosná zařízení malého formátu (obvykle A4 nebo A5) pro pořizování poznámek bez připojení k počítači. Obvykle je možné pořizování poznámek na běžný papír.

**Grafické tablety** – počítačové periférie menšího formátu, obvykle A5 až A3, určené pro digitalizaci výkresů, ale i psaného textu.

**Digitizéry** – počítačové periférie zpravidla vysokého rozlišení a velkého formátu (A3 až A0); používají se pro náročné aplikace v kartografii, strojírenství apod. Nejsou sice primárně určené pro snímání textu, ale umožňují jej; některé elektronické tabule se velkým digitizérům konstrukčně dosti podobají.

**Elektronická pera** – zařízení se systémem pro snímání pohybů či polohy ruky uloženým ve vlastním tělese pera. Zpravidla ke své funkci nevyžadují žádný další prvek mimo vlastního pera, existují však i řešení využívající opticky snímaný papír se speciálním rastrem.

**Dotykové displeje a obrazovky** – zařízení kombinující výstupní zobrazovací zařízení s vstupním zařízením (obvykle na rezistivním nebo elektromagnetickém principu). Používají se pro jednoduchou interakci člověk-počítač, ale mnohdy umožňují díky vysokému rozlišení i vstup psaného textu.

### 2.1 Technologie snímání rukopisu

Ačkoli možných způsobů řešení převodu rukopisu do elektronické podoby je celá řada, prakticky se ustálilo používání několika převládajících technologií:

**Rezistivní** – souřadnice jsou určovány pomocí závislosti odporu snímací vrstvy na poloze.

**Elektromagnetická** – souřadnice jsou stanoveny pomocí polohové závislosti napětí indukovaného díky elektromagnetické vazbě mezi perem a sítí vodičů snímací plochy; podle provedení může být aktivním zdrojem elektromagnetického pole pero nebo plocha.

---

<sup>4</sup>Snímáním psaného textu bude v této práci myšlena jeho *on-line* verze, tj. záznam polohy a trajektorie v reálném čase, nikoli *off-line* digitalizace, tedy např. snímání obrazu písma scannerem.

**Ultrazvuková/infračervená** – poloha je vypočtena na základě časového rozdílu šíření impulzu vyslaného perem současně pomocí ultrazvukového vlnění a infračerveného záření.

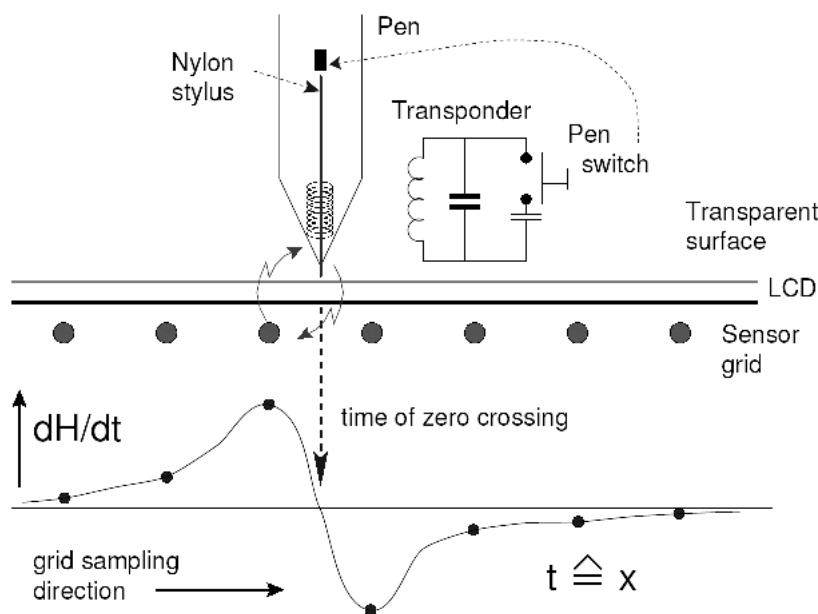
Mezi méně často používané technologie patří:

**Optická** – využívá se několika různých principů optického snímání, např. laserového měření polohy pera, stereoskopického snímání pracovní plochy kamerami, optického snímání rastru podložky perem apod.

**Kapacitní** – k určení souřadnic je využito polohové závislosti kapacitní vazby mezi perem a snímací vrstvou.

**Inerciální** – souřadnice pera jsou získány pomocí senzorů akcelerace a natočení, zabudovaných v samotném peru.

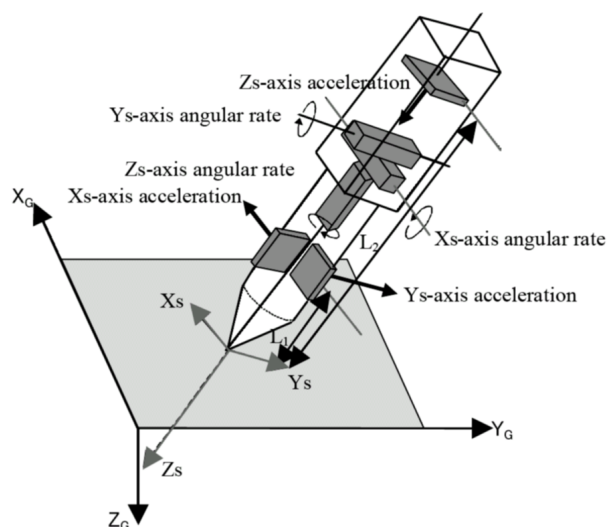
Následující obrázky ukazují dva ze zmíněných principů snímání rukopisu. Obr. 1 zachycuje uspořádání zařízení využívajícího elektromagnetické technologie snímání. Na obr. 2 je patrné uspořádání snímačů inerciálního pera.



Obr. 1. Elektromagnetický princip snímání polohy pera  
převzato z [4]

## 2.2 Příklady existujících zařízení

V následujícím textu je pro ilustraci přiblíženo několik současných zařízení sloužících k digitalizaci psaného textu.



Obr. 2. Uspořádání senzorů inerciálního pera  
převzato z [5]

### 2.2.1 Interaktivní tabule Smart Board

Interaktivní tabule SMART Board je příkladem velkoplošné elektronické tabule umožňující ve spojení s LCD projektorem využití jako interaktivní tabule [6]. K dispozici je několik provedení lišících se velikostí pracovní plochy; např. model 560 má pracovní plochu o velikosti přibližně 122 cm × 91 cm s rozlišením 2000 *times* 2000 bodů. Používá rezistivní technologii snímání; citlivou vrstvu tvoří dvojice odporových fólií oddělená vzduchovou mezerou. Povrch tabule tvoří tvrzená polyesterová fólie s optickými vlastnostmi umožňujícími projekci obrazu. K tabuli jsou dodávány speciální popisovače, ovšem povrch je citlivý i na dotyk prstu.

### 2.2.2 Mimio Xi

Přídavné zařízení umožňující snímat polohu speciálního aktivního pera na běžné tabuli. Využívá rozdílné doby šíření ultrazvukového (40 kHz) a infračerveného (880 nm) signálu vysílaného synchronně aktivním perem. Výrobce udává rozlišení 100 bodů na palec a rychlost snímání 87 Hz. Pracovní plocha modelu mimio Xi je 2,4 m × 1,2 m [7].

### 2.2.3 ACECAD DigiMemo

Rodina produktů DigiMemo od firmy ACECAD je zastoupena modely A501/A502 a a 692. Ty se liší velikostí pracovní plochy (A5 a 6 × 9"). Pracují na elektromagnetickém principu a podle údajů výrobce je snímání funkční do vzdálenosti 12 mm od plochy, je tedy možné popisovat i poměrně silný poznámkový blok či sešit. Rozlišení výrobce neudává; podle recenze v [8] je čitelné i poměrně malé písmo vysoké kolem



3 mm. Zařízení je napájeno ze čtyř alkalických článků velikosti AAA, které postačují na zhruba 100 hodin provozu, pero dodávané se zařízením je napájené 1 knoflíkovým článkem s životností až 14 měsíců. Zápisník DigiMemo je vybaven rozhraním USB a vnitřní pamětí o velikosti 16 MB (model A501) nebo 32 MB (modely A502 a 692). Paměť může být rozšířena instalací paměťové karty Compact Flash. Dokumenty jsou ukládány v proprietárním formátu DHW. Výrobce udává paměťové nároky přibližně 200 kB na uložení 1 strany A5. Pomocí aplikace DigiMemo Manager je možný export do obvyklých grafických formátů (JPG, GIF, PNG, CIF). Další detaily a specifikaci je možné nalézt na webové stránce produktu [9].



Obr. 3. ACECAD DigiMemo A502  
převzato z [9]

#### 2.2.4 Anoto

Technologie Anoto Digital Pen švédské firmy Anoto Group AB využívá optického snímání trajektorie pera a speciálního papíru nesoucího zakódovanou informaci o poloze. Perem je možné normálně psát a na první pohled se příliš neliší od plnicího pera. Poblíž hrotu je umístěn obrazový snímač, který snímá speciální referenční značky vytištěné na papíře. Systém značek, který výrobce označuje jako Anoto Pattern, je tvořen body o průměru přibližně  $100\ \mu\text{m}$ , v jejichž umístění na papíře je zakódována absolutní poloha. Toho je dosaženo určitým posunutím bodu vůči vztažné mřížce s roztečí 0,3 mm. Pero snímá v infračervené části spektra plochu  $6 \times 6$  bodů frekvencí mezi 50 a 100 Hz a dekodováním snímaného obrazu je schopno určit svoji absolutní polohu vůči papíru [10, 11].

V referenčním vzoru může být také zakódována kontextová informace, takže určité oblasti mohou sloužit jako aktivní zóny; dotykem pera v místě aktivní zóny se mohou aktivovat předem definované procedury, např. operace asociované s for-

mulářem nebo jeho datovým polem. Referenční vzor může být na papír předtištěn nebo vytištěn na laserové tiskárně.

Na základě technologie Anoto jsou vyráběny licenční produkty jako je Nokia Digital Pen SU-1B [12, 11]. Pero SU-1B disponuje pamětí 1 MB (postačující na uložení 100 stran formátu A5); prostřednictvím rozhraní Bluetooth umožňuje propojení s mobilními telefony a přenos pořízených poznámek či kreseb ve formě MMS.



Obr. 4. Nokia Digital Pen SU-1B  
převzato z [12]

Mezi další licenční produkty založené na technologii Anoto patří Logitech io Pen [13] nebo Maxell Digital Pen [14].

## 3 Analýza

Cílem této kapitoly je provést rozbor úlohy, diskutovat možná řešení navrhovaného zařízení a shrnout teoretické poznatky nutné pro vlastní návrh.

### 3.1 Volba metody snímání – úvodní úvahy

V kapitole 2 byly uvedeny příklady metody snímání používané v současnosti v zařízeních pro digitalizaci psaného textu a grafiky. Je zřejmé, že každá z dostupných metod má celou řadu výhod i nevýhod. Kritérií výběru, která ten či onen způsob řešení zvýhodňují či naopak znevýhodňují v určitém kontextu, je nepřeborné množství. Pro další úvahy a rozbor je vhodné okruh úvah omezit na určitou podmnožinu možných řešení.

#### Omezení první: snímací metoda

Aby byly naplněny vytýčené cíle práce, mezi kterými byl stanoven požadavek použití pasivního pera i psací plochy, musí použitá metoda umožňovat bezdotykové snímání polohy pera. To může být zprostředkováno třemi druhy energie [15, str. 154]:

- elektromagnetickým zářením
- zářením částic
- akustickým vlněním.

Metody měření a zobrazování pomocí elektromagnetického záření ve viditelné či blízké části elektromagnetického spektra mají z pohledu této práce oproti jiným metodám řadu výhod, jako je:

- dobrá dostupnost a cena komponentů (zdroje záření, detektory)
- vysoká dosažitelná přesnost
- velký dosah
- široká škála ověřených řešení a propracovaných technik.

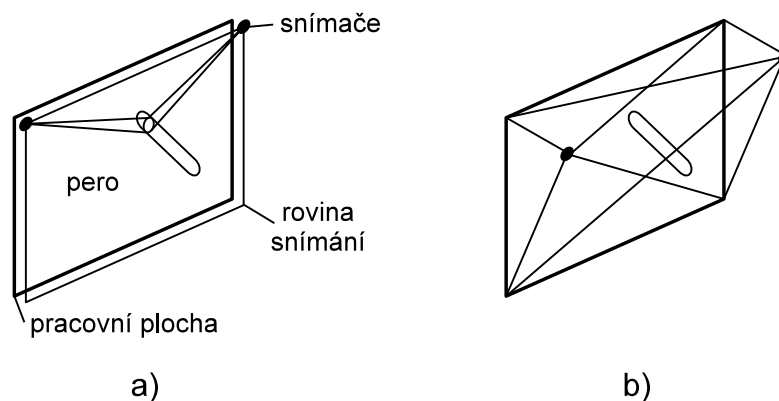
Z těchto důvodů bylo pro realizaci navrhovaného zařízení zvoleno optické snímání polohy pera. I takto vymezený okruh preferovaných řešení je však velmi rozsáhlý. Učinně tedy další omezení z hlediska geometrického uspořádání snímací soustavy:

#### Omezení druhé: geometrické uspořádání

Vzájemné uspořádání snímací soustavy a pracovní plochy může mít v zásadě dvojí podobu:

- snímání v rovině pracovní plochy (přesněji jde o snímání v rovině rovnoběžné s pracovní plochou v malé vzdálenosti)
- snímání nad pracovní plochou.

Situaci ukazuje obr. 5. Při snímání v rovině pracovní plochy se pomocí vhodných snímačů (řádkové obrazové senzory, laserové scannery) pořizují zpravidla dva či více jednorozměrných obrazů z různých míst, případně hloubková mapa snímané



Obr. 5. Geometrie snímání plochy

a) snímání v rovině rovnoběžné s pracovní plochou b) snímání nad pracovní plochou

scény. Ze získaných dat je pak určena poloha pera. Uspořádání se svojí podstatou blíží k idealizované úloze, tj. měření polohy pera v rovině psací plochy. Určitou nevýhodou představuje nenulová vzdálenost roviny snímání a pracovní plochy, která vede k chybě snímání polohy vlivem sklonu pera.

Snímání nad pracovní plochou zpravidla využívá jedné nebo několika kamer k pořízení dvourozměrných obrazů pracovní plochy. Ze získaných obrazů je rekonstruována poloha pera. Nevýhodou tohoto uspořádání je velký objem zpracovávaných dat a značná výpočetní náročnost. Snímané obrazy jsou deformovány projektivním zobrazením (optické osy kamer nejsou kolmé k pracovní ploše) a snímání a analýzu obrazu komplikuje také nehomogenní osvětlení pracovní plochy. Podstatnou překážkou je také problém možného zakrytí snímané scény uživatelem a v neposlední řadě problém rozlišení pohybu pera nad pracovní plochou a po jejím povrchu. Zařízení využívající tohoto uspořádání jsou navíc zpravidla značně neskladná.

Pro řešení navrhovaného zařízení se tedy (s ohledem na požadavky nízké ceny, jednoduchosti a kompaktnosti) jeví jako vhodné uspořádání se snímáním v rovině rovnoběžné s pracovní plochou.

## 3.2 Předmět snímání

### 3.2.1 Psací pomůcky

Psací pomůckou či perem<sup>5</sup> budeme rozumět prostředek, který vykonává pohyb po psací ploše tabule a zpravidla (ne však nezbytně) zanechává viditelnou stopu – čáru. Psací pomůckou může být obecně např. plnicí nebo kuličkové pero, tužka, značkovač (fix), křída apod, další úvahy pro účely této práce však budou omezeny na křídu a značkovač pro suché tabule, případně prst (který sice nezanechává na tabuli viditelnou stopu, ale může být s výhodou použit pro bezprostřední a intuitivní interakci, ukazování apod.). V širším smyslu bude za psací pomůcku považován také vhodný prostředek pro mazání tabule, např. houba.

#### 3.2.1.1 Křída

Školní křída je dodávána na trh nejčastěji v podobě hranolků s čtvercovým průřezem, rozměry obvyklého provedení jsou 12 mm × 12 mm × 100 mm. Řidčeji se vyskytují také provedení kruhového průřezu. Křída je uváděna jako příklad materiálu s optickými vlastnostmi blízcími se *lambertovskému*, tedy ideálně difúzně odrazivému povrchu [16, str. 192]. Pro bílou křídu je uváděna hodnota odrazivosti 80-85 %. Tyto vlastnosti činí křídu vhodným materiálem pro optickou detekci.

#### 3.2.1.2 Značkovač pro suchou tabuli

Značkovače tohoto typu umožňují psaní na neporézní povrchy s možností mazání suchým hadříkem nebo speciálním mazačem. Jako příklad je na obr. 6 značkovač typu Centropen 8559. Píšící hrot značkovače je matně černý a jeho délka je přibližně 7 mm. Hrot je zasazen do plastového polomatného pouzdra bílé barvy, jehož průměr je směrem od hrotu odstupňován. Je zřejmé, že optická detekce hrotu by byla obtížná; pro snímání polohy značkovače bude tedy nutné využít části plastového pouzdra, do které je zasazen hrot. Alternativním řešením by mohlo být použití návleku na hrot, který by umožnil snímat hrot v menší výšce nad plochou.

### 3.2.2 Rukopis

#### 3.2.2.1 Charakteristiky rukopisu v časové a frekvenční oblasti

Průměrnou rychlost psaní udává literatura okolo dvou až pěti znaků za sekundu; [17] uvádí pro alfanumerické znaky v angličtině průměrné rozmezí rychlosti 1,5 až

---

<sup>5</sup>**Poznámka k terminologii:** V anglicky psané literatuře je pro psací pomůcky používán ve spojení s tablety, elektronickými tabulemi a podobnými zařízeními obvykle termín *stylus* nebo *pen*. Český překlad termínu *stylus*, *pisátko*, je však chápán v poněkud posunutém významu - spíše jako součást zapisovacího zařízení (jako je např. souřadnicový zapisovač, seismograf, barograf apod.), proto raději nebude používán a bude dána přednost termínům *pero* nebo *psací pomůcka*. V dalším textu budou tyto pojmy používány jako označení obecné psací pomůcky bez bližšího určení a oba pojmy budou chápány jako ekvivalentní.



Obr. 6. Značkovač Centropen 8559

2,5 znaků za sekundu, špičkově dosahuje až rychlostí mezi 5 a 10 znaky za sekundu, zejména pro určité znakové sekvence<sup>6</sup>; jiné zdroje uvádějí jako dobu trvání písmene hodnotu 200 ms až 400 ms [18], tedy 2,5 až 5 znaků za sekundu. Typická doba trvání tahů utvářejících rukopis se pohybuje v rozmezí od 90 ms do 150 ms [19, 18].

Frekvenční spektrum oscilačních pohybů rukopisu se rozprostírá v oblasti přibližně od 1 Hz do 10 Hz. Maxima spektrální hustoty dosahuje na frekvenci  $(4 \div 5)$  Hz, od této hodnoty spektrální hustota klesá a okolo 10 Hz je již na úrovni šumu [18].

Uvedené údaje platí pro rukopis běžné velikosti, tj. při výšce písma nepřesahující přibližně 1 cm. Za tohoto předpokladu je čas trvání tahů a písmen přibližně konstantní bez ohledu na velikost písma.

Pro zvětšující se velikost písma se již příliš nezvětšují síly utvářející tahy a díky tomu doba jejich trvání závisí na velikosti [20, 18]. V případě psaní křídou na tabuli, kdy je velikost písma až řádově větší než uvažovaná velikost 1 cm, lze tedy očekávat, že šířka pásma rukopisu bude podstatně menší. Běžně dostupné prameny však podrobnosti o spektrálních vlastnostech rukopisu v takto specifickém případě neuvádějí a je tedy nutno pracovat pouze s odhadem. Za předpokladu, že frekvence oscilačních pohybů rukopisu klesá pro větší písmo s odmocninou jeho velikosti [18], je pro předpokládanou nejmenší velikost písma 3 cm možné rozsah jeho spektra odhadnout jako  $\sqrt{3}$  krát menší než v případě malého písma, což odpovídá přibližně 6 Hz.

### 3.2.2.2 Držení a poloha pera

Ideální podmínky pro snímání polohy pera by představoval jednobodový dotyk pera s psací plochou s osou pera kolmou k ploše, a to bez přítomnosti ruky držící pero ve snímané oblasti. Skutečná vzájemná poloha pera, pracovní plochy a ruky při psaní je však pochopitelně od této situace více či méně vzdálená a navíc v čase proměnná.

V praxi je třeba počítat se dvěma způsoby kontaktu ruky a pera s psací plochou:

- **s oporou ruky o plochu** – plochy se kromě pera dotýká i část ruky
- **bez opory** – plochy se dotýká jen pero

S ohledem na možný dotyk ruky s plochou při polohách s oporou vyvstává problém, jak spolehlivě odlišit dotyk pera od dotyku ruky s plochou.

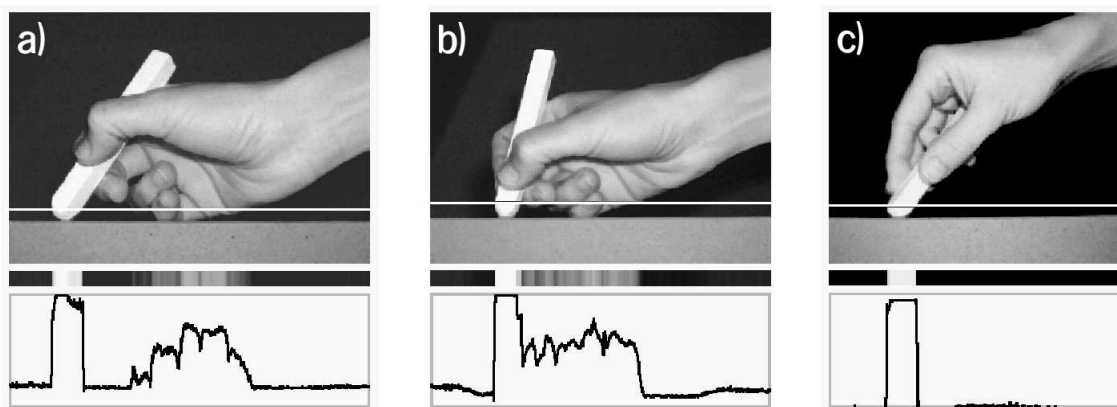
<sup>6</sup>např. série psacích l

Lze se domnívat, že způsob držení pera bude mít také vliv na sklon pera – při psaní s oporou ruky bude sklon pera patrně více proměnný, neboť na pohybu pera v takovém případě podílí ohyb prstů. Při psaní bez opory bude sklon pera pravděpodobně stálejší, protože pohyb pera je vyvoláván pohybem předloktí při relativně stálé poloze zápěstí a prstů.

### Polohy ruky z hlediska optického snímání

Pro získání přesnější představy o pozicích ruky a pera při psaní na tabuli byly pořízeny fotografie několika typických způsobů uchopení křídly a značkovače. Snímky byly analyzovány s ohledem na uvažované optické snímání polohy pera v rovině rovnoběžné s psací plochou.

Psací plocha byla orientována svisle, aby zachycené polohy odpovídaly skutečné situaci při psaní na tabuli, z praktických důvodů však byly snímky transformovány rotací do vodorovné polohy. Ze získaných dvojrozměrných obrazů byl vyjmut vodorovný výřez o výšce jednoho pixelu, představující jednorozměrnou posloupnost hodnot jasu obrazu v myšlené rovině snímání nad psací plochou. Svislá poloha řezu v obraze byla vybrána pro každý snímek individuálně, a to tak, aby byla vzdálenost řezu v rozmezí (6 ÷ 8) mm od psací plochy a aby řez pokud možno zachycoval situaci zajímavou z hlediska další analýzy obrazu.

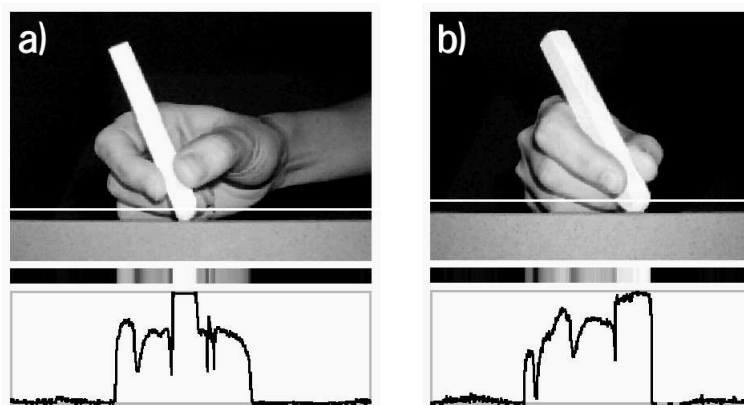


Obr. 7. Polohy ruky při psaní křídou – boční pohled

Obr. 7, 8, 9 zachycují původní obraz s vyznačenou polohou řezu a průběh jasové funkce v řezu. Body obrazu v místě řezu jsou znázorněny vertikálně zvětšeným pásem ve stupních šedi, odpovídajících jasů obrazu.

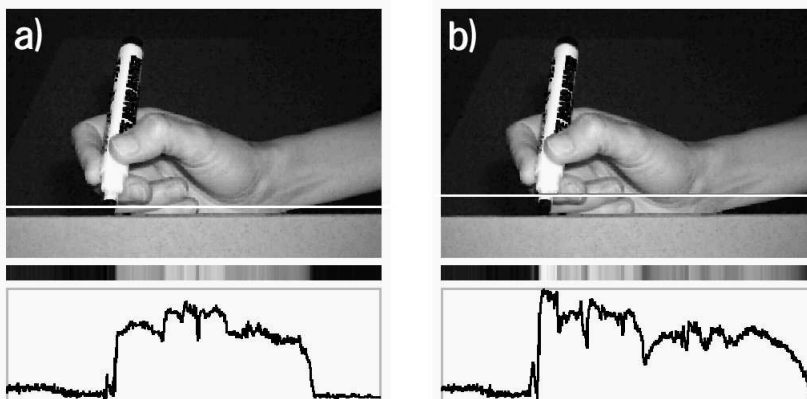
Jak je patrné na obr. 7a), b), ruka opírající se o psací plochu je v jasové funkci reprezentována oblastí, která je méně jasná než křída, její šířka je však výrazně větší než šířka obrazu křídly. Porovnání obou snímků také naznačuje souvislost sklonu psací pomůcky a průběhu jasové funkce – při větším sklonu psací pomůcky (obr. 7a) tvoří její obraz a obraz ruky dvě disjunktní oblasti, v poloze blízké se kolmé (obr. 7b) oba obrazy splývají a šířka jejich sjednocení je menší.

Obr. 8 ukazuje 2 různé pohledy na ruku s křídou shora; v obou případech obrazy ruky a křídly splývají. V případě a) nastává navíc případ, kdy obraz ruky obklopuje obraz křídly z obou stran.



Obr. 8. Ukázka polohy ruky při psaní křídou – horní pohled

Na obr. 9 jsou snímky ruky při psaní značkovačem pro suchou tabuli Centropen 8559. Snímaná scéna je v případě a) i b) totožná, liší se pouze vzdálenost uvažované roviny snímání od psací plochy. Ta je v případě snímku a) 4 mm, v případě b) 10 mm. Ze zachycené situace je zřejmé, že rovina snímání zvolená v příliš malé vzdálenosti od plochy tabule zcela znemožňuje odlišení černého hrotu značkovače od pozadí.



Obr. 9. Ukázka polohy ruky při psaní značkovačem  
vzdálenost roviny řezu nad plochou: a) 4 mm b) 10 mm

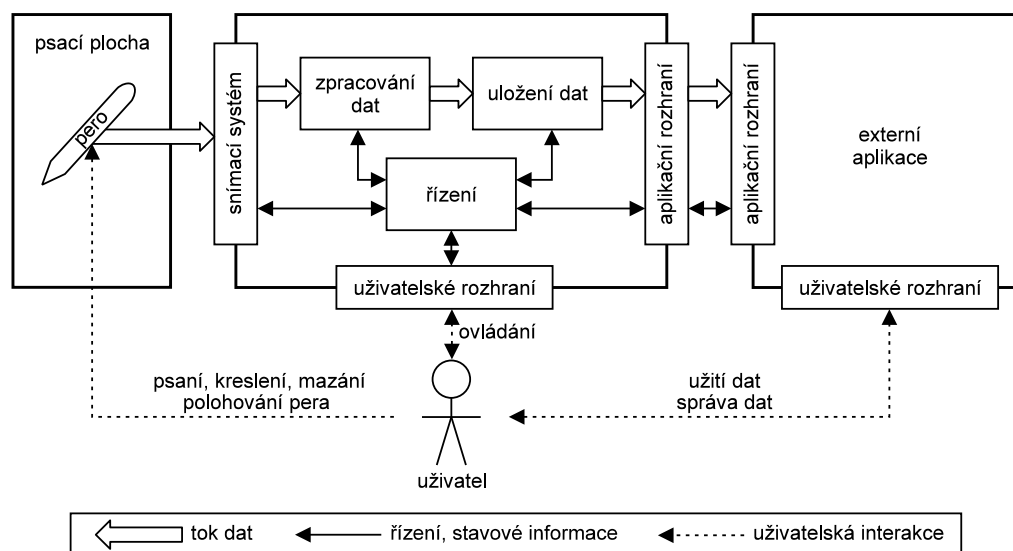


### 3.3 Navrhované zařízení

#### 3.3.1 Blokové schéma

Účelem navrhovaného zařízení je snímat v reálném čase grafický projev uživatele, snímaná data zpracovat, tj. transformovat je do podoby informací o trajektorii pera, umožnit jejich záznam a zpřístupnit je vhodnou formou k dalšímu zpracování a použití spolupracujícím aplikacím. Funkce jednotlivých částí zařízení je třeba koordinovat a zařízení musí rovněž poskytnout prostředky pro ovládání svých funkcí uživatelem.

Popsané základní funkční požadavky poskytují výchozí představu o možné skladbě zařízení a jeho částech. Doplněním funkčních bloků odpovídajících jednotlivým požadavkům o další prvky reprezentující vzájemné vnitřní a vnější vazby získáváme jednoduché blokové schéma modelující v prvním přiblížení strukturu navrhovaného zařízení a jeho interakci s okolím (obr. 10). Jednotlivé bloky lze z hlediska



Obr. 10. Blokové schéma zařízení a jeho interakce s okolím

jejich funkcí popsat takto:

**Snímací systém** – je klíčovým prvkem zařízení a reprezentuje funkce, které umožňují získání užitečné informace o poloze a pohybu pera, především snímání okamžité polohy senzory a předzpracování jejich signálů.

**Zpracování dat** – zajišťuje filtraci dat získaných měřeními, jejich kompresi a konverzi na údaje o poloze a trajektorii pera.

**Uložení dat** – blok poskytující možnost záznamu snímaných grafických dat a jejich správy.

**Uživatelské rozhraní** – slouží k interakci mezi zařízením a uživatelem.

**Aplikační rozhraní** – poskytuje prostředky pro zpřístupnění zaznamenaných grafických dat aplikacím a řízení funkcí zařízení.

**Řízení** – blok zodpovědný za koordinaci činnosti ostatních částí zařízení.

**Pero a psací plocha** – pero představuje objekt snímáný snímacím systémem; stejně jako psací plocha, která vymezuje aktivní oblast snímání, proto je znázorněno vně vlastního zařízení – snímání se účastní jako pasivní prvek.

Ve schématu prozatím není naznačena alokace funkcí, tj. jejich fyzické rozdělení do konstrukčních celků a mezi technické a programové prostředky. Řadu funkcí je možné realizovat programově a vzhledem k experimentálnímu charakteru zařízení je vhodné v počátku vývoje upřednostňovat softwarová řešení pro jejich flexibilitu a nízké nároky na vývojové náklady.

Pod pojmem navrhované zařízení bude nadále míněn souhrn prvků realizující požadované funkce zařízení bez ohledu na druh prostředků jejich implementace (technické či programové).

### 3.3.2 Snímací systém

#### 3.3.2.1 Optické metody měření polohy

Metody detekce objektů a měření jejich polohy založené na optických jevech jsou velmi početné a využívají řady fyzikálních principů. Jejich podstatou je interakce světelného záření ve viditelné části spektra (nebo v částech viditelné oblasti blízkých) s pozorovaným objektem a v pozorování této interakce detekční částí měřicího řetězce. Interakce záření a objektu může spočívat v různých optických jevech a jejich kombinaci (odraz, lom, pohlcení či změna polarizace). [21, str. 31] uvádí jako příklady polohou (či posuvem) ovlivněných závislostí mezi výstupní veličinou detektoru a parametry zdroje optického záření:

- změnu polohy světelné stopy
- zastínění světelného toku mezi zdrojem a detektorem záření
- změnu úhlu odrazu paprsku zdroje
- interferenci zdrojového a odraženého paprsku.

Úloha měření polohy pera v rovině v idealizované podobě, kdy je pero reprezentováno jediným bodem v rovině o dvou stupních volnosti, vyžaduje měření alespoň dvou veličin. Na obr. 11 jsou ukázány možnosti řešení úlohy pomocí měření různých geometrických veličin.

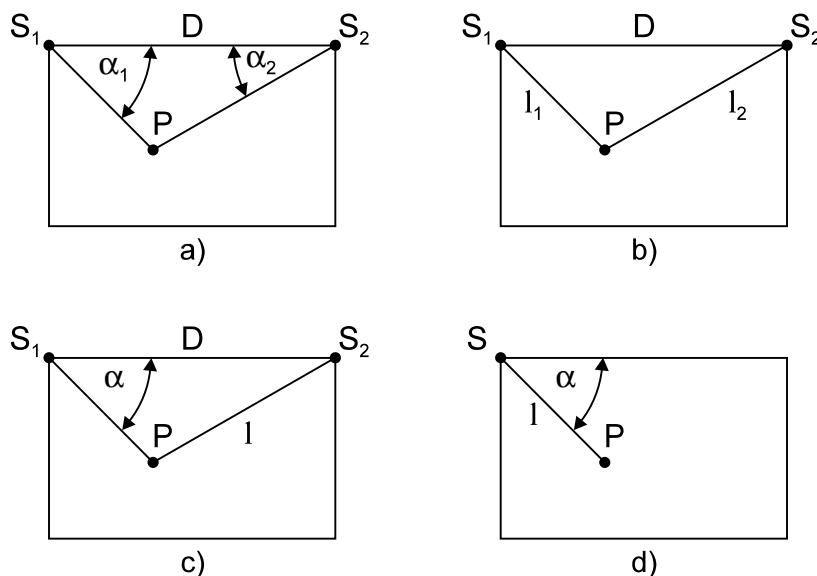
K řešení úlohy je tedy možné využít:

- měření vzdáleností
- měření úhlů.

#### Měření vzdáleností

Hlavní optické metody měření vzdáleností je možné rozdělit do tří skupin:

- triangulace
- měření doby letu, zahrnující:
  - pulzní měření doby letu
  - měření doby letu pomocí modulace vlny



Obr. 11. Geometrie snímání polohy bodu v rovině  
 měření polohy pomocí určení: a) jedné strany trojúhelníka a dvou úhlů b) tří stran trojúhelníka  
 c) dvou stran trojúhelníka a jednoho úhlu d) polárních souřadnic

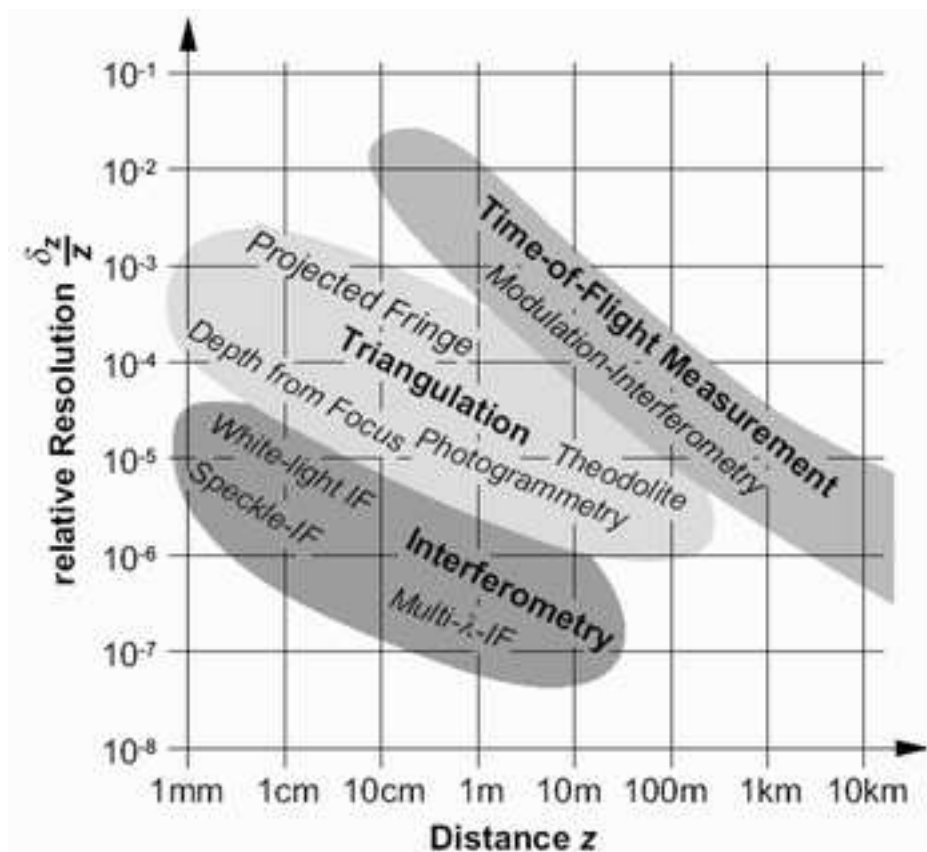
- interferometrické měření vzdálenosti

Triangulace je implementačně nejjednodušší metoda. Spočívá v zaměření objektu ze dvou míst se známou vzdáleností  $D$  zvanou *triangulační základna*. Uspořádání metody odpovídá obr. 11a). Použitelnost metody je omezena na kratší vzdálenosti – dosažitelná přesnost měření závisí na poměru triangulační základny k měřené vzdálenosti [22].

Měření vzdálenosti pomocí měření doby letu paprsku se využívá často např. v laserových dálkoměrech a pro 3D scanování. V případě pulzního měření doby letu je zjišťována doba, za kterou je krátký impulz záření vyslaný zdrojem a odražený měřeným objektem zachycen fotodetektorem. Dosažení vysokého rozlišení je obtížné s ohledem na vysokou rychlost světla. Při měření doby letu pomocí modulace vlny je měřen fázový rozdíl vysílaného paprsku modulovaného harmonickým signálem a přijímaného paprsku. Měřená vzdálenost je úměrná rozdílu fází. Pro rozsah měření větší, než odpovídá fázovému rozdílu  $2\pi$ , je výsledek měření nejednoznačný, proto se používá modulace signálem složeným z několika harmonických průběhů s různými kmitočty. Tím je možno dosáhnout dostatečné přesnosti měření i při značném rozsahu jednoznačných měření. Metody využívající doby letu jsou výhodné především pro měření velkých vzdáleností (aplikace ve stavebnictví či v dálkovém průzkumu Země), kde je možné dosáhnout malé relativní chyby. Implementace obou těchto metod vyžaduje relativně náročné obvodové řešení elektronické části měřícího přístroje. Interferometrické měření vzdálenosti je založeno, jak název napovídá, na interferenci vysílaného a odraženého svazku koherentního záření. Jedná se v principu o relativní měření vzdálenosti, kdy je změna vzdálenosti objektu od zdroje záření pozorována

jako střídání interferenčních minim a maxim. Je též známa metoda absolutního měření vzdálenosti pomocí injekční interferometrie, kdy je vlnová délka laseru modulována napětím trojúhelníkového průběhu; absolutní vzdálenost je pak získána jako počet minim či maxim signálu fotodetektoru [22, str. 165].

Další optické metody měření vzdálenosti používají modifikované uspořádání výše uvedených metod vedoucí k dalšímu zdokonalení. Obr. 12 ukazuje srovnání optických metod měření vzdáleností z hlediska dosahu a relativního rozlišení.



Obr. 12. Optické metody měření vzdálenosti – porovnání dosahu a rozlišení  
převzato z [23]

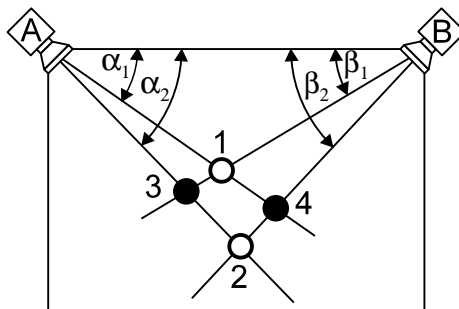
### Měření úhlů

K optickému měření úhlů se využívá otočných prvků ve vhodném uspořádání; typickým příkladem je laserové nebo optické scanování využívající rychle rotujícího či oscilujícího zrcadla nebo natáčení zrcadla, příp. celé scanovací hlavičky např. servomotorem. Měřený úhel je pak získán ze známé okamžité polohy otočné části měřicího systému [24].

### Problém měření více bodů pomocí triangulace

Měření vzdálenosti podle obr. 11a), tedy pomocí triangulace, vede k jednoznačnému výsledku, pokud je prováděno měření polohy jediného bodu. Situace se však změní, budou-li se v rovině měření nacházet dva či více měřených bodů.

Obr. 13 ukazuje *problém korespondence* – možnou nejednoznačnost určení polohy při výskytu více objektů ve snímané scéně.



Obr. 13. Problém korespondence

Pokud kamera (scanner, řádkový obrazový senzor apod.)  $A$  pozoruje objekt pod úhlem  $\alpha_1$ , může se jednat o objekt  $1$  nebo  $4$ . Pokud je ve scéně pouze jediný objekt, postačuje k rozlišení těchto dvou možných poloh pozorování kamery  $B$ . Pokud však budou ve scéně současně objekty  $1$  a  $2$  nebo  $3$  a  $4$ , nelze již pozorováním dvěma kamerami jednoznačně tyto dvě dvojice od sebe rozlišit.

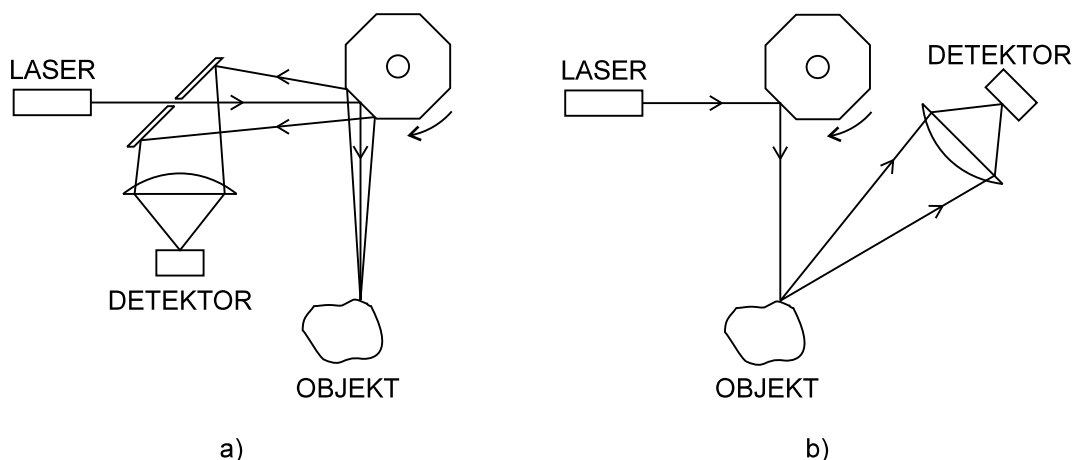
Při použití triangulace je tedy nutno vzít v potaz možnou nejednoznačnost a omezit měření polohy na jediný objekt, případně odstranit nejednoznačnost jinými prostředky.

#### 3.3.2.2 Varianty řešení snímacího systému

Základní uspořádání snímacího systému může mít několik podob; osvětlovač může být pevný a osvětlovat celou snímanou scénu (pole LED diod nebo liniový laser) nebo mít podobu rozmítaného laserového paprsku osvětlujícího jednobodově snímanou scénu (laserové scanování). Podobně snímací prvek může snímat celou scénu najednou (pevný snímač) nebo bodově (optické scanování využívající vychylování úzkého zorného pole fotodetektoru). Laserové a optické scanování bývá často kombinováno do jediného systému, kdy je současně vychylován osvětlující laserový svazek i zorné pole fotodetektoru.

Obr. 14 ukazuje schématicky uspořádání kombinovaného laserového/optického scanneru a laserového scanneru s pevným fotodetektorem.

V úvahu přicházejí rovněž další řešení stojící poněkud mimo hlavní modely uspořádání snímacího systému, např. přepínání několika pevných zdrojů osvětlení, pole pevných detektorů, světelné mříže detekující přerušování jednoho z mnoha paprsků pokrývajících pracovní plochu, detekce polohy pomocí rotující clonky apod.



Obr. 14. Schéma laserového scanneru

a) scanner s rozmítaným zorným polem fotodetektoru b) scanner s pevným fotodetektorem

Měření polohy pomocí laserového scanování může využívat triangulace či měření doby letu paprsku, tedy geometrický model měření podle obr. 11a) či d).

### 3.3.2.3 Volba varianty řešení

S uvážením výhod a nevýhod jednotlivých řešení byl pro další analýzu a následnou realizaci zvolen způsob měření podle obr. 11a), tj. triangulace ze známé základny pomocí měření dvojice úhlů; uspořádání snímacího systému bylo zvoleno v podobě laserového scanování ze dvou bodů s pevným fotodetektorem. Pro tuto volbu hovoří tyto důvody:

- předpokládaný dosah měření vyhovující snímání pracovní plochy tabule
- nepřiliš náročné obvodové řešení
- jednoduchá optická soustava nevyžadující speciální optické prvky
- relativně nízké náklady.

Pro jednoduchost bylo zvoleno, že snímání počítá pouze s jedním snímaným objektem (perem); v případě výskytu více objektů v obrazu je vhodné preferovat objekt, který byl zaznamenán jako první, popřípadě vybrat objekt nejjasnější.

### 3.3.2.4 Parametry snímání

Mezi nejdůležitější kvantitativní parametry snímacího systému, které mají vliv na kvalitu dosažených výsledků, můžeme zařadit:

**frekvenci snímání** – počet provedných měření polohy za sekundu

**rozlišení** – nejmenší změna polohy pera, kterou je snímací systém schopen zaznamenat.

Specifikujme nyní požadavky na tyto parametry.

### Frekvence snímání

V odstavci 3.2.2.1 byla odhadnuta maximální šířka pásma rukopisu při velikosti písma 3 cm na 6 Hz. Aby bylo možné spojitý signál  $f(t)$  rekonstruovat z diskrétních vzorků  $f(t) = f(nT_v)$ , musí frekvence vzorkování  $f_v = 1/T_v$  podle *vzorkovacího teorému* [25, str. 28] splňovat podmínku

$$f_v > 2f_{\max} . \quad (1)$$

Pro uvažovanou frekvenci  $f_{\max} = 6$  Hz můžeme tedy pro frekvenci snímání polohy pera stanovit podmínku

$$f_{scan} > 12 \text{ Hz} . \quad (2)$$

### Rozlišení

Rozlišení snímacího systému je rozhodující pro úroveň detailů písma či kresby, kterou bude schopné navrhované zařízení zachytit.

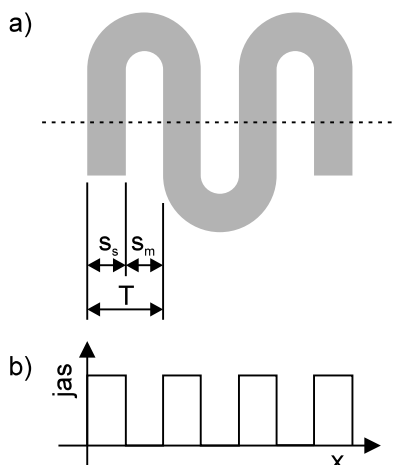
Je zřejmé, že proces psaní křídou na tabuli má značná omezení pokud jde o možnosti vyjádření jemných podrobností – křída má velkou plochu dotyku s tabulí a tím i omezenou možnost vykreslení detailů a nakonec i rozměry tabule a účel jejího použití předpokládají spíše „hrubozrný“ grafický projev. Pro určení potřebného rozlišení polohy vyjdeme z úvahy, že velikost nejmenších rozeznatelných detailů kresby je dána minimální šířkou čáry a minimální šířkou mezery mezi čarami. Pro jednoduchost uvažujme minimální šířku mezery rovnou minimální šířce čáry. Na obr. 15 je idealizovaná ukázka kresby s pravidelným střídáním čar a mezer ve vodorovném směru a tomu odpovídající průběh obrazových dat v naznačeném řezu. Je zřejmé, že perioda střídání čar a mezer  $T$  určuje maximální frekvenci obrazových dat, kterou musí proces snímání obrazu (či v tomto případě polohy pera) být schopen přenést. I zde můžeme aplikací vzorkovacího teorému určit, že prostorová perioda vzorkování polohy, musí být menší než polovina periody  $T$ , tedy menší než šířka stopy  $s_s$ .

Pozorováním bylo odhadnuto, že typická šířka stopy křídou na tabuli se pohybuje v rozmezí 4–7 mm; s vynaložením jistého úsilí lze dosáhnout šířek čar i pod 3 mm, ovšem při běžném způsobu používání lze zvolit jako dostačující rozlišení hodnotu 4–5 mm.

Pro experimentální fázi vývoje lze za akceptovatelné považovat i nižší dosažitelné rozlišení do 10 mm, pokud bude reálné další zdokonalení snímací metody vedoucí v dalších fázích vývoje k požadovanému výsledku.

#### 3.3.2.5 Radiometrická rozvaha

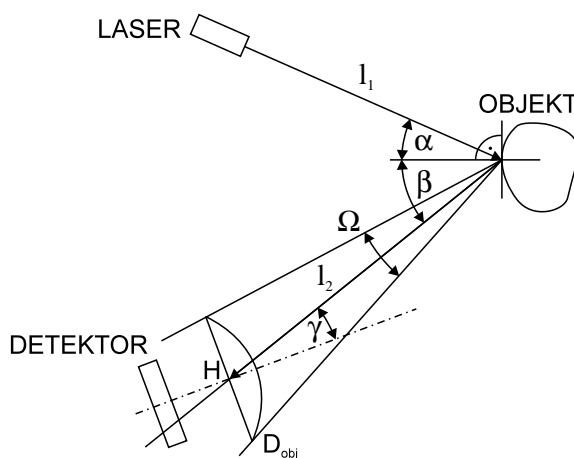
Analyzujme nyní radiometrické poměry snímání obrazu pera pomocí laserového osvětlovače. Uvažujme uspořádání podle obr. 16, kdy jsou zdroj laserového záření, snímaný objekt a fotodetektor navzájem v obecné poloze. Laserový paprsek dopadá na povrch objektu (pera) a v místě dopadu svírá s kolmicí k povrchu úhel  $\alpha$ . Spojnice



Obr. 15. K rozlišení polohy

a) kresba s pravidelným střídáním čar a mezer b) průběh jasů v naznačeném řezu obrazu;

hlavního bodu optické soustavy fotodetektoru a bodu dopadu svírá s kolmicí v místě dopadu úhel  $\beta$ . Bod dopadu paprsku je pozorován optickou soustavou fotodetektoru pod úhlem  $\gamma$ .



Obr. 16. K rozboru radiometrických poměrů snímání pera

Předpokládejme, že rozbíhavost laserového svazku je zanedbatelná a že lze rovněž zanedbat vliv prostředí na šíření paprsku. Zářivý tok  $\phi_{eL}$  emitovaný laserem dopadající na objekt způsobuje v místě dopadu ozáření

$$E_e = \frac{\phi_{eL}}{S_L}, \quad (3)$$



kde  $S_L$  je velikost plošky ozářené laserovým svazkem. Ploška část dopadajícího zářivého toku vyzařuje zpět do prostoru; *intenzita vyzařování* plošky je

$$H_e = \rho E_e , \quad (4)$$

kde  $\rho$  je koeficient odrazivosti povrchu. Za předpokladu, že povrch objektu je lambertovský, tj. ideálně difúzní, platí pro *zář* plošky

$$L_e = \frac{H_e}{\pi} = \frac{\rho E_e}{\pi} = \frac{\rho \phi_{eL}}{\pi S_L} . \quad (5)$$

Intenzita vyzařování plošky směrem k fotodetektoru je pak

$$I_e = L_e S_L \cos \beta = \frac{\rho \phi_{eL} \cos \beta}{\pi} . \quad (6)$$

Za předpokladu, že průměr objektivu  $D_{OBJ}$  je dostatečně malý vzhledem k jeho vzdálenosti od snímaného objektu, můžeme zářivý tok  $\phi_{eOBJ}$  zachycený objektivem fotodetektoru vyjádřit jako součin intenzity vyzařování ozářené plošky do směru fotodetektoru a prostorového úhlu  $\Omega$ , pod kterým se plocha objektivu jeví z místa ozářené plošky. Vzhledem k natočení objektivu vůči chodu paprsků o úhel  $\gamma$  je třeba uvažovat efektivní plochu objektivu, tedy průmět jeho plochy do směru dopadu paprsků:

$$\Omega = \frac{S_{OBJ} \cos \gamma}{l_2^2} = \frac{\pi D_{OBJ}^2 \cos \gamma}{4l_2^2} ; \quad (7)$$

pro zářivý tok zachycený objektivem pak platí

$$\phi_{eOBJ} = I_e \Omega \quad (8)$$

$$\phi_{eOBJ} = \frac{\rho \phi_{eL} \cos \beta}{\pi} \cdot \frac{\pi D_{OBJ}^2 \cos \gamma}{4l_2^2} \quad (9)$$

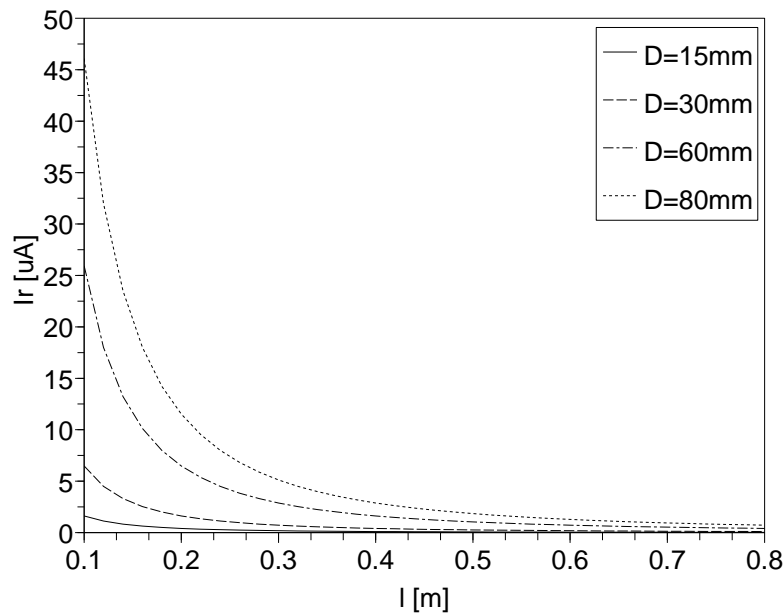
$$\phi_{eOBJ} = \frac{\rho \phi_{eL} D_{OBJ}^2 \cos \beta \cos \gamma}{4l_2^2} . \quad (10)$$

Uvažujme jako fotodetektor polovodičovou fotodiodu a určíme proud, který vyvolá zářivý tok způsobený dopadem paprsku na snímaný objekt. Za předpokladu, že objektiv fotodetektoru soustředí veškerý zářivý tok prošlý objektivem na citlivou plochu fotodiody, platí pro její závěrný proud

$$I_r = \phi_{eOBJ} \tau_{OBJ} S_\lambda , \quad (11)$$

kde  $\tau_{OBJ}$  je *propustnost* objektivu a  $S_\lambda$  je *spektrální citlivost* fotodiody, udávající pro danou vlnovou délku velikost fotoproudu při jednotkovém zářivém toku dopadajícím na plochu fotodiody.

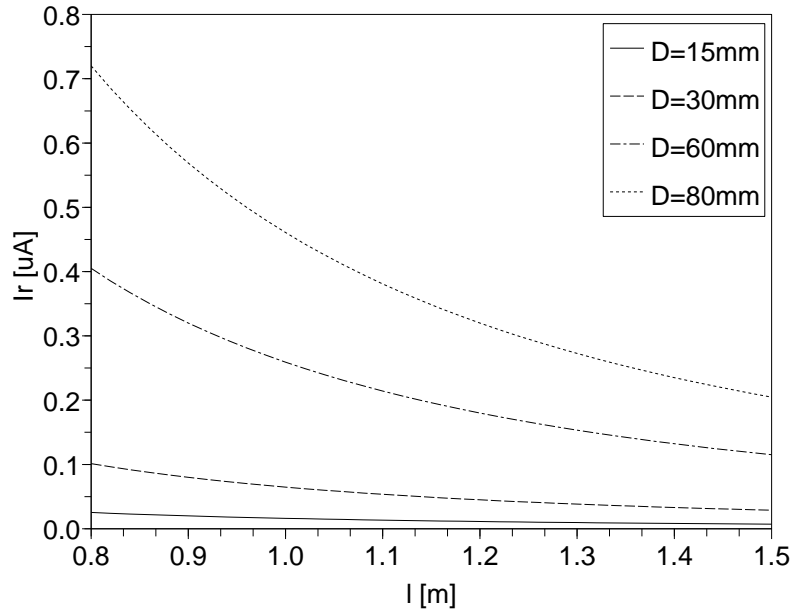
Grafy na obr. 17 a 18 ukazují závislost závěrného proudu fotodiody typu BPW34 na vzdálenosti objektivu od snímaného objektu pro různé průměry objektivu; hodnoty byly vyčísleny pro  $\phi_{eL} = 1 \text{ mW}$ ,  $\rho = 0,8$ ,  $\tau_{OBJ} = 0,9$ ,  $\lambda = 650 \text{ nm}$ ,  $\beta = 0$ ,  $\gamma = 0$ ; spektrální citlivost byla pro zvolený typ diody určena z katalogového listu odečtením z grafu [26, Fig. 3] a přepočtem pomocí křivky relativní spektrální citlivosti pro zvolenou vlnovou délku [26, Fig. 7] jako  $S_\lambda = 0,4 \text{ AW}^{-1}$ .



Obr. 17. Závislost proudu fotodiody na vzdálenosti  $l_2$  ( $0,1 \text{ m} < l_2 < 0,8 \text{ m}$ ) fotodiody BPW34;  $\phi_{eL} = 1 \text{ mW}$ ,  $\rho = 0,8$ ,  $\tau_{OBJ} = 0,9$ ,  $\lambda = 650 \text{ nm}$ ,  $\beta = 0$ ,  $\gamma = 0$

Zářivý tok vstupující do objektivu detektoru klesá s druhou mocninou vzdálenosti objektivu od snímaného objektu. Důsledkem této skutečnosti je značný rozsah možných ozáření fotodetektoru pro různé polohy pera. Např. pro uvažovaný rozsah vzdáleností pera od fotodetektoru  $0,1 \text{ m}$  až  $1,5 \text{ m}$  a pro  $\gamma = 0$ ,  $\beta = \text{konst.}$  dosahuje poměr minimálního a maximálního zářivého toku procházejícího objektivem 1:225; obvody zpracování signálu z fotodetektoru budou tedy muset zahrnovat vhodný způsob řízení zesílení, aby bylo možno přenos fotodetektoru upravit podle světelných podmínek snímané scény.

Jak je vidět z grafů, absolutní velikost proudu fotodiody se pro objekt na nejvzdálenějším bodě uvažované úhlopříčky ( $l_2 = 1,5 \text{ m}$ ) pohybuje pro uvažované podmínky v řádu  $10^{-7} \text{ A}$  až  $10^{-8} \text{ A}$  v závislosti na použitém průměru objektivu. K dalšímu poklesu proudu generovaného fotodetektorem by pak docházelo s odklonem snímaného objektu od optické osy objektivu s faktorem  $\cos \gamma$ . Pokrytí snímané oblasti jediným fotodetektorem by bylo patrně obtížně realizovatelné pro nutný velký



Obr. 18. Závislost proudu fotodiody na vzdálenosti  $l_2$  ( $0,8 \text{ m} < l_2 < 1,5 \text{ m}$ ) fotodiody BPW34;  $\phi_{eL} = 1 \text{ mW}$ ,  $\rho = 0,8$ ,  $\tau_{OBJ} = 0,9$ ,  $\lambda = 650 \text{ nm}$ ,  $\beta = 0$ ,  $\gamma = 0$

rozsah zorného pole a z toho plynoucí výrazný pokles ozáření fotodetektoru v krajních polohách a další problémy, jako je otázka realizace vhodné širokouhlé optické soustavy. Výhodnější bude zřejmě pokrytí pracovní plochy polem více fotodetektorů s omezeným zorným polem. Uvažujme nyní vliv okolního osvětlení na velikost proudu fotodiody. Na rozdíl od předchozí jednoduché situace, kdy byla uvažována projekce malé plošky osvětlené laserovým svazkem na citlivou plochu fotodetektoru, je nyní situace složitější, neboť by bylo třeba brát v úvahu rozložení jasu či záře scény snímané objektivem, zorné pole objektivu a velikost citlivé plochy snímače. Orientační odhad byl proto proveden pro zjednodušený modelový případ, kdy je bílý lambertovský povrch ( $\rho = 0,8$ ) osvětlený světlem prostředí umístěn v ose zorného pole objektivu s  $D_{obj} = 80 \text{ mm}$ ,  $f = 80 \text{ mm}$ ,  $\tau_{OBJ} = 0,9$  ve vzdálenosti  $l_2 = 1,5 \text{ m}$ . Uvažované okolní osvětlení vychází z hodnot doporučených pro vnitřní prostory; pro učebny je uváděna doporučená hodnota osvětlení v rozsahu ( $200 \div 500$ ) lx, pro laboratoře ( $500 \div 1000$ ) lx [27, str. 170]; použijme tedy pro výpočet hraniční hodnotu mezi oběma pásmy, tedy 500 lx. On-line výpočtem pomocí webové stránky [28] bylo osvětlení fotodiody za uvažovaných podmínek stanoveno na  $E = 80,656 \text{ lx}$ . Předpokládejme, že osvětlení plochy fotodiody je konstantní; odečtem hodnoty proudu diody BPW34 z grafu závislosti závěrného proudu na osvětlení [26, Fig. 4] je možné jeho přibližnou hodnotu určit jako  $I_r = 5,65 \mu\text{A}$ . Podle vztahů (10), (11) je proud

fotodiody vyvolaný dopadem laserového svazku s  $\phi_{eL} = 1 \text{ mW}$  za stejných podmínek

$$I_r = \frac{\rho \phi_{eL} D_{OBJ}^2 \tau_{OBJ} S_\lambda}{4l_2^2} = \frac{0,8 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,08^2 \cdot 0,9 \cdot 0,4}{4 \cdot 1,5^2} \text{ A} \cong 2,05 \cdot 10^{-7} \text{ A} . \quad (12)$$

V uvažovaném modelovém případě je tedy poměr užitečného signálu a signálu pozadí

$$SNR = 20 \log \frac{I_{rs}}{I_{rp}} = 20 \log \frac{2,05 \cdot 10^{-7} \text{ A}}{5,65 \cdot 10^{-6} \text{ A}} \cong -29 \text{ dB} . \quad (13)$$

Proud vyvolaný osvětlením pozadí tedy významně převyšuje proud vyvolaný dopadem užitečného záření. Použité řešení fotodetektoru tedy bude muset účinně potlačit stejnosměrnou složku signálu a zabránit případné saturaci zesilovače.

### 3.3.2.6 Selektivní fotodetekce

Pro realizaci selektivní fotodetekce, jejímž účelem je účinně detekovat užitečné odražené záření a potlačit rušivé osvětlení pozadí, je možné využít [29]:

- **spektrální selekce** – potlačením nežádoucích spektrálních složek záření
- **kmitočtové selekce** – potlačením kmitočtů záření mimo (zpravidla úzké) pracovní pásmo použitého modulačního kmitočtu
- **optické selekce** – potlačením paprsků vstupujících do detektoru z nežádoucích směrů.

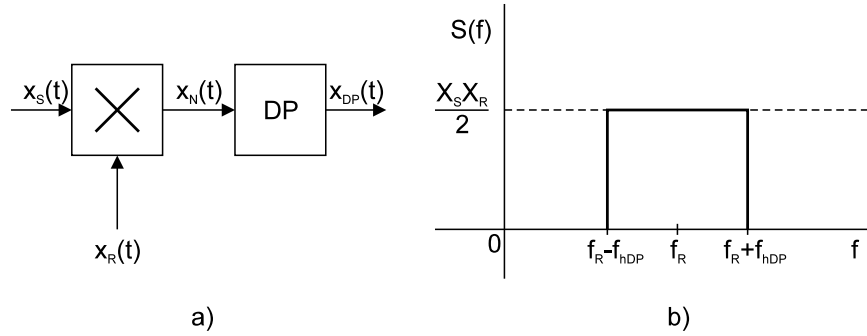
Poslední metoda není pro zvolené uspořádání vhodná, neboť je v protikladu s volbou pevného fotodetektoru, který musí mít relativně velkou šířku zorného pole. V úvahu tedy přicházejí první dva způsoby selekce.

Spektrální selekce vyžaduje použití optického filtru nebo úzkopásmově citlivého fotodetekčního prvku, který z obecně širokospektrální směsi dopadajícího záření vybere pouze úzkou oblast odpovídající pracovní vlnové délce osvětlovače. Nevýhodou je vysoká cena filtrů i úzkopásmových detektorů záření. Při širokém zorném úhlu detektoru lze navíc mít za oprávněnou obavu, že i přes vysokou spektrální selektivitu detektoru by mohlo docházet k situaci, že intenzita pozadí scény by mohla převýšit intenzitu užitečného odraženého záření nebo by v lepším případě způsobovala jeho obtížnou detekci.

Jako vhodnější se tedy jeví kmitočtové selekce, tedy použití modulovaného laserového paprsku a fotodetektoru s vysokou frekvenční selektivitou. V dané situaci, kdy je pro detekci k dispozici původní modulační signál, je možné s výhodou využít *synchronní detekce*.

Jde o velmi účinnou metodu detekce periodického signálu překrytého šumem umožňující zjistit přítomnost užitečného signálu až pro poměr  $SNR = -100 \text{ dB}$  [15, str. 135]. Její princip spočívá ve směšování měřeného a referenčního signálu a následné filtraci dolní propustí (obr. 19). Ke směšování signálu se využívá analogových násobiček nebo spínacích obvodů<sup>7</sup>.

<sup>7</sup>V závislosti na druhu směšovacího obvodu potom hovoříme o *harmonických* nebo *spínacových* detektorech [30].



Obr. 19. Synchronní detektor

a) schéma synchronní detekce b) frekvenční charakteristika synchronního detektoru  
převzato z [15]

Uvažujeme-li měřený signál  $x_S(t)$  i referenční signál  $x_R(t)$  sinusového tvaru:

$$x_S(t) = X_S \sin(2\pi f_S t) \quad (14)$$

$$x_R(t) = X_R \sin(2\pi f_R t + \varphi) , \quad (15)$$

potom na výstupu násobičky dostaneme výstupní signál [15]

$$x_N(t) = \frac{1}{2} X_S X_R [\cos(2\pi(f_R - f_S)t - \varphi) - \cos(2\pi(f_R + f_S)t + \varphi)] . \quad (16)$$

Výstupní signál směšovače obsahuje součtovou a rozdílovou složku obou signálů; po odfiltrování součtové složky dolní propustí získáme na výstupu detektoru

$$x_{DP}(t) = \frac{1}{2} X_S X_R \cos(2\pi(f_R - f_S)t - \varphi) . \quad (17)$$

Ve frekvenční oblasti můžeme chování synchronního detektoru popsat jako pásmovou propust se střední frekvencí  $f_R$  a šířkou pásma  $2f_{hDP}$  [15, 31]; amplitudovou frekvenční charakteristiku detektoru ukazuje obr. 19b). Vhodnou volbou mezního kmitočtu dolní propusti je možné takto konstruovat i pásmové propusti s velmi úzkou šířkou pásma, jejichž vlastnosti by byly běžnými obvodynými řešeními nedosažitelné.

Na synchronní detektor můžeme také pohlížet jako na fázově citlivý usměrňovač, jehož výstupní napětí je při  $f_R = f_S$  přímo úměrné amplitudě vstupního signálu a kosinu fázového rozdílu vstupního a referenčního signálu [30]:

$$x_{DP}(t) = \frac{1}{2} X_S X_R \cos(\varphi) . \quad (18)$$

Při shodné fázi měřeného a referenčního signálu a konstantní amplitudě referenčního signálu je pak výstupní napětí přímo úměrné pouze amplitudě měřeného signálu.

Pro neharmonické vstupní signály a směřování pomocí spínačového detektoru je třeba namísto popisu signálů vztahy (14), (15) uvažovat jejich Fourierův rozvoj [30, str. 162]. Chování detektoru bude i v tomto případě podobné – propustnost soustavy bude nejvyšší pro signály s frekvencí a fází shodnou s referenčním signálem. Určitou nevýhodu spínačové detekce však představuje citlivost na liché násobky referenčního kmitočtu; výhodou je naopak jednoduchá realizace [32].

### 3.3.2.7 Modulační frekvence laseru

Frekvence modulace laserového svazku musí být zvolena tak, aby výstupní signál synchronního detektoru byl schopen dostatečně rychle sledovat změny jasu snímané scény.

Pro určení vhodné modulační frekvence použijme následující úvahy: nechť rozmítaný laserový svazek amplitudově modulovaný signálem o frekvenci  $f_{mod}$  dopadá na pero o průměru  $d$  ve vzdálenosti  $r$  od středu rozmítání. Odražené záření je převedeno fotodetektozem na elektrické napětí a takto získaný signál vstupuje do synchronního detektoru spolu s referenčním kmitočtem  $f_R = f_{mod}$ . Nejnejpříznivější podmínky pro fotodetekci nastávají zřejmě pro případ, kdy se pero nachází v bodě nejvíce vzdáleném od scanneru; je-li scanner umístěn v rohu pracovní plochy, je v takovém případě vzdálenost  $r$  rovna úhlopříčce pracovní plochy. Je-li paprsek rozmítán úhlovou rychlostí  $\omega_{scan}$ , pohybuje se bod dopadu paprsku po myšlené kružnici o poloměru  $r$  obvodovou rychlostí

$$v = \omega_{scan}r = 2\pi f_{scan}r . \quad (19)$$

Dobu scanování pera  $t_{sp}$  můžeme určit jako podíl průměru pera a obvodové rychlosti scanování:

$$t_{sp} = \frac{d}{2\pi f_{scan}r} . \quad (20)$$

Z doby scanování pera můžeme stanovit odpovídající frekvenci obrazového signálu  $f_{obr}$ , jejíž maximální hodnota je důležitým parametrem pro návrh synchronního detektoru. Doba  $t_{sp}$  představuje jednu půlperiodu frekvence  $f_{obr}$ , proto s použitím (20) můžeme psát

$$f_{obr} = \frac{1}{T_{obr}} = \frac{1}{2t_{sp}} = \frac{2\pi f_{scan}r}{2d} = \frac{\pi f_{scan}r}{d} . \quad (21)$$

Pro průměr pera (křídý)  $d = 12$  mm, frekvenci scanování  $f_{scan} = 12$  Hz a úhlopříčku pracovní plochy  $r = 1,5$  m dostaneme maximální hodnotu obrazové frekvence jako

$$f_{obr} = \frac{3,14 \cdot 12 \cdot 1,5}{0,012} = 4710 \text{ Hz} . \quad (22)$$

Z vlastností synchronní detekce vyplývá, že je aplikovatelná pouze na relativně pomalé signály; to v praxi obvykle znamená, že modulační frekvence musí být alespoň o řád vyšší než maximální frekvence užitečného signálu, podle níž je volen mezní kmitočet dolní propusti detektoru. Zvolený poměr modulační frekvence k meznímu kmitočtu doplní propusti pak definuje selektivitu synchronní detekce a tím i dosažitelný poměr signál/šum.

Zvolíme-li modulační frekvenci s rezervou jako dvacetinásobek maximální obrazové frekvence, dostaneme minimální hodnotu modulační frekvence jako

$$f_{mod} = 20f_{obr} = 20 \cdot 4710 \text{ Hz} = 94200 \text{ Hz} . \quad (23)$$

### 3.3.2.8 Vlnová délka laseru

Zabývejme se nyní otázkou volby vlnové délky použitého laserového záření. Produkce polovodičových laserových diod zahrnuje typy s vlnovými délkami emitovaného záření v celé oblasti viditelného spektra a v části infračervené spektrální oblasti až do přibližně  $2,5 \mu\text{m}$  [33]. Velmi početnou skupinou jsou typy pracující na vlnových délkách kolem 630 nm až 650 nm.

Pro volbu pracovní vlnové délky laseru jsou podstatná tato kritéria:

**snadnost detekce** – vlnová délka musí být zvolena tak, aby umožnila bezproblémové snímání odražených paprsků fotodetektořem;

**rušivý vliv viditelného paprsku** – viditelná stopa paprsku by mohla být za provozu vnímána jako rušivá;

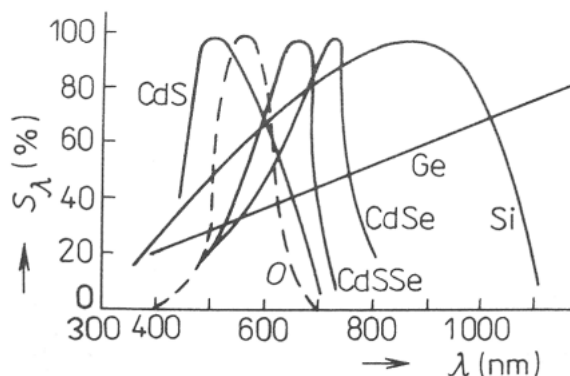
**viditelnost stopy laseru** – použití laseru s viditelnou vlnovou délkou může významně usnadnit vývojové a servisní práce na zařízení – kontrolu funkce, seřízení geometrie apod.;

**bezpečnost** – zařazení zdroje laserového záření do bezpečnostní třídy závisí mimo optického výkonu i na vlnové délce; výkonový limit pro třídu I je funkcí vlnové délky; třída II má pevný limit optického výkonu 1 mW ve viditelné části spektra;

**cena** – volba vlnové délky musí brát v úvahu značné rozdíly cen laserových diod (jinými parametry srovnatelných) v závislosti na vlnové délce emise; lasery emitující v záření červené barvy bývají cenově nejdostupnější, krátkovlnné lasery naopak patří k nejdražším.

Je zřejmé, že některé požadavky jsou protichůdné: zatímco viditelnost paprsku je prospěšná během oživování a seřizování zařízení, během vlastního provozu je spíše rušivá a nežádoucí a bylo by výhodnější použití laseru emitujícího záření v infračervené oblasti. To však představuje vyšší nebezpečí poškození zraku při zrcadlovém odrazu nebo přímém pohledu do paprsku, protože se neuplatní mrkací reflex, který u viditelného paprsku omezí dobu působení svazku na oko. Požadavek na snadnost detekce zvyhodňuje vlnové délky ležící v oblasti největší citlivosti běžných detekčních prvků; jejich spektrální vlastnosti jsou určeny materiálem, ze kterého jsou vyrobeny; tím bývá velmi často křemík, řidčeji též jiné polovodičové materiály.

Obr. 20 ukazuje křivky relativní spektrální citlivosti vybraných polovodičů; na obr. 21 je ukázka spektrální citlivosti křemíkového fotocitlivého prvku na vlnové délce.



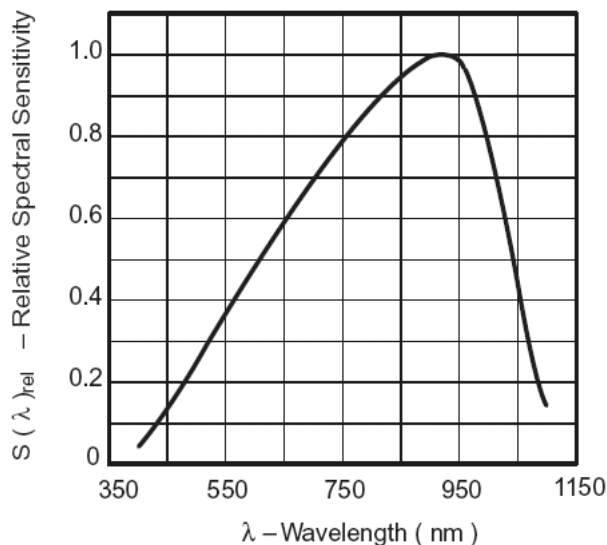
Obr. 20. Relativní spektrální citlivost vybraných polovodičů  
(O je křivka citlivosti oka)  
převzato z [16]

Ačkoli na průběh křivky spektrální citlivosti má mimo vlastností základního materiálu vliv také provedení součástky (např. optické vlastnosti materiálu pouzdra), zhruba lze říci, že citlivost křemíkových fotodetekčních prvků dosahuje maxima v okolí vlnové délky (850 ÷ 900) nm, přičemž v pásmu od přibližně (500 ÷ 600) nm do (950 ÷ 1050) nm přesahuje relativní citlivost 50 % maximální hodnoty.

Fotodetekční prvky vyrobené na bázi jiných polovodičových materiálů vykazují odlišné spektrální vlastnosti; např. fotodiody z InGaAs dosahují maxima citlivosti na vlnových délkách mezi 1,5  $\mu\text{m}$  a 2,5  $\mu\text{m}$  a jsou citlivější než křemíkové typy [34]; prvky z InAs mají maximální citlivost kolem 3,4  $\mu\text{m}$ . Jedná se však většinou o speciální, těžko dostupné součástky s vysokou cenou a pro účely uvažovaného řešení nemají podstatný význam. Pro účely detekce paprsku je tedy nejvýhodnější blízká infračervená oblast, o něco méně vhodná je pak červená část spektra. Z hlediska bezpečnosti je přijatelná viditelná část spektra a dále střední část infračerveného spektra nad přibližně 1,2  $\mu\text{m}$ , kde se již snižuje nepříznivý vliv záření na zrak. Částečné překonání protichůdnosti požadavků týkajících se vlnové délky laseru by představovalo řešení založené na použití více zdrojů záření s různými vlnovými délkami. Toho je využito např. v konstrukci laserové elektronické tabule Polyvision LTX [35], kde viditelný laserový paprsek slouží pro seřízení geometrie tabule, pro vlastní scanování pracovní plochy se pak používá infračerveného laseru. Takové řešení by však zvýšilo složitost a cenu zařízení; navíc vyhovuje stanoveným požadavkům pouze částečně.

Po zvážení výhod a nevýhod dostupných možností bylo zvoleno pro účely vývoje prototypu použít vlnovou délku v červené části spektra. V další fázi vývoje by pak bylo možné nahradit červený laser infračerveným bez nutnosti zásadních zásahů do konstrukce zařízení.





Obr. 21. Relativní spektrální citlivost křemíkové fotodiody BPW34  
převzato z [26]

### 3.3.2.9 Detekce dvojice laserových svazků jediným fotodetektozem

Při použití dvou scannerů vyvstává otázka selektivní detekce obou paprsků, tedy volby způsobu, kterým bude možno jednoznačně určit polohu jednotlivých paprsků bez jejich vzájemného ovlivnění. Toho je možné dosáhnout několika způsoby:

1. použitím různých vlnových délek laserů
2. použitím různých modulačních frekvencí
3. použitím různých zorných polí fotodetekce
4. použitím různých fází modulačního kmitočtu
5. použitím synchronního scanování

Ad 1.: Použití různých vlnových délek je problematické – vyžadovalo by detekční prvky s výraznou spektrální selektivitou; ty sice existují, jedná se však o speciální součástky; např. [36]. Další nevýhodou je nutná různost řešení obou scannerů i detektorů.

Ad 2.: Použití různých modulačních frekvencí přináší otázku jejich vhodné volby. Je třeba vzít v úvahu požadavek na dostatečnou vzdálenost kmitočtů pro potlačení možných přeslechů a možnost vlivu vyšších harmonických (možnost falešné detekce lichých násobků základní frekvence při synchronní detekci). Nevýhodné by bylo také jiné rozlišení obou scannerů (vyplývající z vlastností synchronní detekce).

Ad 3.: Jako možné řešení by přicházelo v úvahu použití fotodetektoru s rozmítaným úzkým zorným polem. Toto uspořádání však bylo při volbě konceptu vyloučeno; mimo to by průnik zorných polí obou fotodetektorů přinesl další problémy.

Pro další návrh byly tedy zvažovány možnosti 4. a 5.

### Selektivní detekce pomocí fáze modulačního signálu

Způsob 4, tedy modulace obou paprsků stejnou frekvencí, ale s rozdílnými fázemi, by vyžadoval použití dvou modulačních signálů navzájem s fázovým rozdílem rovným  $\pi$ ; fotodetektor by pak poskytoval dva výstupní signály, vzniklé jako výsledek synchronní detekce s použitím těchto různých modulačních signálů. Citlivost synchronní detekce na fázi signálu by v tomto případě způsobovala, že výstupní signál by byl funkcí rozdílu intenzit paprsků obou scannerů (s kladným znaménkem pro ten z paprsků, jehož fáze by se shodovala se signálem použitým pro synchronní detekci).

Zajímavý případ by nastal v případě, kdy by došlo k současnému dopadu obou paprsků na snímání objekt – v takovém případě by došlo k utlumení signálu detektoru, v případě shodné intenzity by pak nebylo možné přítomnost pera vůbec detekovat (dva signály s opačnou fází a shodnou amplitudou by se složily do výsledného stejnosměrného signálu, který je detektorem potlačen). Na rovině snímání by tak vznikla jakási mrtvá místa s časově proměnnými souřadnicemi (danými okamžitou polohou paprsků). Jejich vliv na měření by bylo možné vhodnými metodami eliminovat, avšak za cenu vyšší složitosti algoritmů vyhodnocení naměřených dat a/nebo řízení snímací soustavy.

### Selektivní detekce pomocí synchronního scanování

Způsob 5, tedy oddělení časových intervalů, ve kterých je scéna scanována střídavě jedním či druhým scannerem je patrně nejjednodušší co do náročnosti realizace. Toto řešení však vyžaduje vzájemnou synchronizaci otáček obou scannerů. Jistou nevýhodou představuje časový posuv mezi okamžikem snímání pera levým a pravým scannerem. Chyba způsobená růzností okamžiků snímání je však snadno korigovatelná např. pomocí interpolace.

Přes určité nevýhody vyplývající z nutnosti synchronizace otáček motorů scanneru byla pro použití v návrhu zařízení zvolena tato metoda selektivní detekce.

## 3.3.3 Zpracování snímaných dat

### 3.3.3.1 Transformace souřadnic

Všechny běžné formáty grafických dat používají pravoúhlé souřadnice, ať už v podobě bezrozměrných indexů adresujících maticově organizované bitmapové soubory, nebo ve formě souřadnicového systému, k němuž jsou vztaženy délkové míry vektorových souborů. Pro další použití je tedy třeba naměřená data trajektorie pera převést do podoby vyjádřené v kartézských pravoúhlých souřadnicích.

Uvažujme soustavu souřadnic pracovní plochy podle obr. 22. V souladu s konvencí používanou ve většině grafických aplikací je počátek souřadnic zvolen v bodě  $O_2$  levém horním rohu a osa  $y$  je orientována směrem dolů. Měřením polohy pera  $P$

z bodů  $O_1, O_2$  jsou získány úhly  $\varphi_1, \varphi_2$ <sup>8</sup>. Délka základny triangulace, tedy vzdálenost měřicích bodů  $|O_1O_2| = D$ , je předem dána konstrukcí zařízení.

Pro úhly  $\varphi_1, \varphi_2$  platí:

$$\operatorname{tg}\varphi_1 = \frac{x}{y} \quad (24)$$

$$\operatorname{tg}\varphi_2 = \frac{D - x}{y} . \quad (25)$$

Postupnou úpravou vztahů a dosazením za  $x$  z upravené rovnice (24) dostaneme:

$$x = y\operatorname{tg}\varphi_1 \quad (26)$$

$$D - x = y\operatorname{tg}\varphi_2 \quad (27)$$

$$D - y\operatorname{tg}\varphi_1 = y\operatorname{tg}\varphi_2 \quad (28)$$

$$y(\operatorname{tg}\varphi_1 + \operatorname{tg}\varphi_2) = D . \quad (29)$$

Vyjádřením  $y$  z (29) a dosazením do (26) získáme vztahy pro pravoúhlé souřadnice:

$$x = \frac{D\operatorname{tg}\varphi_1}{\operatorname{tg}\varphi_1 + \operatorname{tg}\varphi_2} \quad (30)$$

$$y = \frac{D}{\operatorname{tg}\varphi_1 + \operatorname{tg}\varphi_2} . \quad (31)$$

Do definičního oboru transformačních funkcí nenáleží body, pro které není definován  $\operatorname{tg}\varphi_i$  nebo pro které je  $\operatorname{tg}\varphi_1 + \operatorname{tg}\varphi_2 = 0$ , tedy v případech:

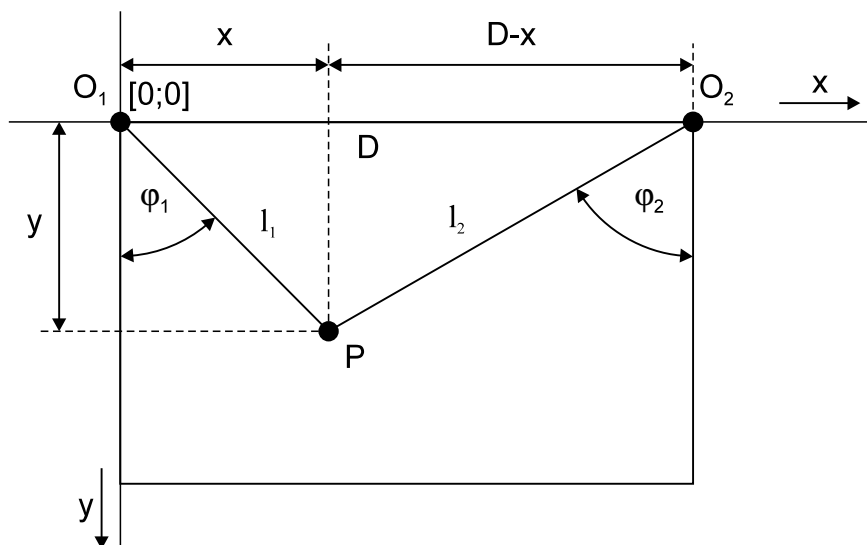
$$\varphi_i = (2k + 1)\frac{\pi}{2}; \quad i = 1, 2; k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (32)$$

$$\varphi_1 = k\pi \wedge \varphi_2 = l\pi; \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots; l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots . \quad (33)$$

V případě (32) jde o situaci, kdy pero leží na přímce spojující oba body měření  $O_1, O_2$ ; omezíme-li se na polohy pera nepřesahující hranice pracovní plochy, jedná se o případ, kdy pero leží na triangulační základně, tedy na úsečce  $|O_1O_2|$ , kdy oba úhly  $\varphi_1, \varphi_2$  nabývají hodnot  $\frac{\pi}{2}$ .

Případ (33) nemůže pro polohy pera ohraničené pracovní plochou konečných rozměrů nastat a není tudíž relevantní.

<sup>8</sup>S ohledem na výhodnější tvar výsledných rovnic jsou úhly měřeny od svislých hran plochy.



Obr. 22. Kartézské a polární souřadnice pracovní plochy

### 3.3.3.2 Určení polohy pera z obrazových dat

Úhly  $\varphi_1, \varphi_2$  představují úhlové souřadnice bodu reprezentujícího polohu pera. Protože průnikem pera a snímací roviny není jediný bod, ale úsečka, je možné úkol stanovení  $\varphi_1, \varphi_2$  rozdělit na dvě samostatné části:

1. nalezení množiny bodů v obrazových datech, která reprezentuje obraz pera
2. určení referenčního bodu z této množiny, který představuje polohu hrotu pera.

Podúloha 1. spočívá v *segmentaci* obrazu a identifikaci segmentu náležejícího obrazu pera. Samotné segmentaci může předcházet předzpracování obrazových dat do podoby vhodné pro další zpracování - normalizace úrovní jasu v obraze, odstranění šumu apod. Cílem podúlohy 2. je pak z informací o segmentu pera co nejspolehlivěji určit předpokládaný bod dotyku pera a psací plochy.

### Segmentace obrazu

V teorii zpracování obrazu se rozumí segmentací nalezení disjunktních množin obrazových bodů, které splňují jistá předem definovaná kritéria [37]. Úkolem segmentace obrazu v konkrétním případě navrhovaného zařízení je vzájemně odlišit části obrazu náležející pozadí, peru a případně ruce uživatele, je-li její obraz součástí snímaných dat. Povaha úlohy je výhodná v tom, že lze očekávat vysoký kontrast snímaných objektů vůči pozadí. Při použití vhodného pozadí pro snímání obrazu (např. v podobě clonicích listů lemujících pracovní plochu a zasahujících až do výšky roviny snímání), bude za normálních okolností obraz pera nejjasnějším segmentem v obrazových datech. Nevýhodou je naopak očekávatelná variabilita obrazových segmentů tvořených obrazem ruky a značný rozdíl jasové úrovně pro různé polohy pera na ploše.

Používané přístupy k segmentaci obrazu jsou velmi různorodé a zahrnují techniky založené na statistických charakteristikách obrazu, hledání hran pomocí derivací, konvoluci obrazu, korelaci, využití neuronových sítí a řadu dalších metod. Pramen [37] uvádí následující klasifikaci segmentačních algoritmů (ve výčtu jsou zahrnuty pouze ty, které mají smysl pro segmentaci 1D obrazu):

- metody založené na detekci hran
- statistické metody
- hybridní metody
- znalostní metody.

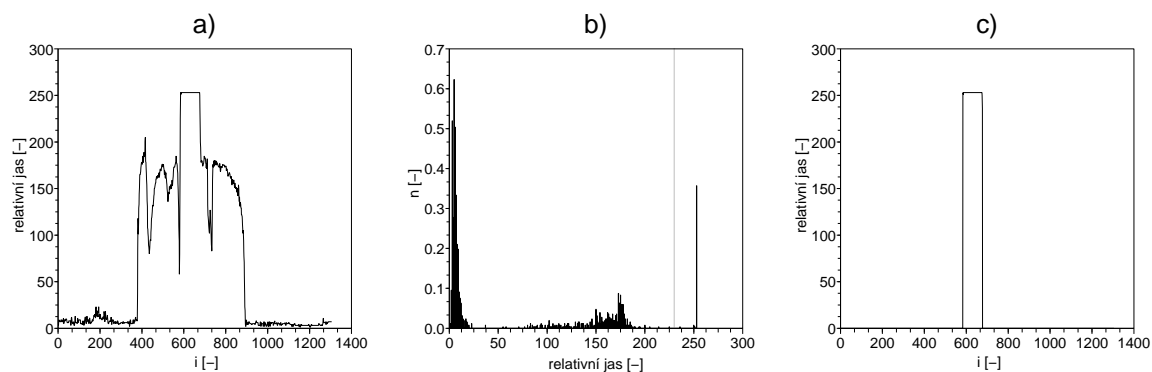
Každá z těchto skupin pak reprezentuje celou řadu konkrétních metod lišících se dosažitelnými výsledky, náročností výpočtu, vhodností pro určité druhy aplikací a dalšími vlastnostmi. Pro navrhovanou aplikaci jsou využitelné pouze metody, které umožní segmentaci v reálném čase, tedy výpočetně jednoduché; mezi takové patří především segmentace prahováním [38]. Její podstatou je přiřazení bodů obrazu do množin podle odpovídající hodnoty jasu obrazového bodu. Často se využívá prahování dvouhodnotové, kdy jednu množinu tvoří body náležející hledanému obrazu a druhá množina představuje pozadí.

Zásadní otázkou metody segmentace prahováním je volba vhodné hodnoty prahu [38, 99]. V jednodušších případech lze hodnotu prahu určit jako globální pro celý obraz, v komplikovanějších případech, kdy se např. mění jas pozadí či hledaného objektu v závislosti na poloze v obrazu, je třeba určovat práh lokálně pro určitou podmnožinu aktuálně zpracovávaného obrazu. Často používanou metodou určení prahu je jeho stanovení na základě tvaru histogramu obrazu [38, 37]. Hodnota prahu je pomocí této metody určena jako úroveň jasu mezi dvěma vrcholy histogramu. Málo četné jasové hodnoty mezi vrcholy totiž odpovídají jasu hraničních elementů oddělujících obraz od pozadí [38, str. 102]. Ukázka použití této metody je na obr. 23. Histogram obrazových dat na obr. 23b) vykazuje tři vrcholy; levý odpovídá pozadí obrazu, střední obrazu ruky a pravý úzký vrchol reprezentuje obraz pera. Pro oddělení obrazu křídly od pozadí (kterým je zde i obraz ruky) je třeba volit hodnotu prahu v úrovni jasu mezi středním a pravým vrcholem. Výsledek segmentace pro hodnotu prahu nastavenou tímto způsobem na  $T_h = 230$  ukazuje obr. 23c).

Dokonalejších výsledků by bylo možné dosáhnout pokročilejšími metodami, např. pomocí konvoluce obrazových dat s maskou či korelace obrazu se vzorem představujícím známý obraz hledaného segmentu, zde obraz pera [38, 130]. Naopak lze odhadovat, že použití metod založených na prosté detekci hran nebude příliš vhodné, neboť při určitých polohách ruky může obraz obsahovat řadu hran a výběr segmentu odpovídajícího peru může být nesnadný až nemožný.

### Určení středu pera

Pro jednoduchost bude za bod odpovídající středu pera považován geometrický střed obrazového segmentu pera. V dalších fázích vývoje je možné zvážit možnost



Obr. 23. Segmentace obrazových dat pomocí histogramu  
 a) průběh jasu řezu obr. 8a) b) histogram obrazových dat s vyznačeným prahem  
 c) výsledek segmentace

zpřesnění polohy pera dokonalejšími metodami, např. brát v úvahu rozložení jasu v segmentu pera.

### 3.3.4 Chyby měření a jejich korekce

**Poznámka:** Autor si je vědom nové úpravy terminologie v oblasti metrologie z poslední doby, kdy je pojem *chyba měření* nahrazen pojmem *nejistota měření*. Vzhledem k dostupné literatuře však byly následující pasáže práce zpracovány v duchu původní terminologie.

#### 3.3.4.1 Chyby měření

Podle původu je možné chyby měření rozdělit do tří skupin:

**Systematické chyby** jsou chyby, které se při určitém způsobu měření vyskytují pravidelně [39]. Projevují systematickou odchylkou naměřené veličiny od její skutečné hodnoty. Jejich příčinou může být použitá měřicí metoda, vlastnosti prvků měřicího řetězce apod. Lze je omezit zdokonalením měřicí metody, často je možné je korigovat

**Náhodné chyby** se vyskytují nepravidelně; je možné je popsat statistickými charakteristikami; působením náhodných chyb se i samotná měřená veličina stává náhodnou veličinou [40].

**Hrubé chyby** vznikají vadou měřicího zařízení nebo chybou obsluhy. Jejich vliv na měření lze zpravidla snadno odstranit.

Mezi konkrétní zdroje chyb, které mohou ovlivňovat výsledek v případě uvažovaného uspořádání navrhovaného zařízení, patří:

- chyby určení úhlů  $\varphi_1, \varphi_2$ 
  - chyba referenčního kmitočtu scanování
  - kolísání úhlové rychlosti scannerů
  - zpoždění fotodetektoru
  - chyby měření času

- vliv doby šíření paprsku
- chyby A/D převodu napětí fotodetektoru
- chyba určení polohy pera v obrazových datech
- vliv sklonu pera
- vliv tvaru pera
- vliv velikosti stopy laseru
- chyba určení polohy pera v obrazových datech
- zkreslení a šum v elektronických obvodech
- vnější rušivé vlivy (okolní osvětlení, elektromagnetické interference, změny teploty)
- chyba určení triangulační základny  $D$
- chyby výpočtu
  - zjednodušení matematického modelu
  - zaokrouhlovací chyby.

Mimo těchto chyb, spadajících dílem do kategorie chyb systematických, dílem chyb náhodných, je třeba uvažovat i možný výskyt hrubých chyb; ty mohou být způsobeny například rušivými odrazy způsobujícími falešnou chybnou reakci fotodetektoru, chybnou interpretací obrazových dat (výpočet polohy pera na základě chybně vybraného segmentu obrazu) či ztrátou synchronizace scannerů apod. V návrhu bude tedy vhodné implementovat kontrolní procedury pro odhalení chybových stavů, které by mohly výsledek měření i zcela degradovat.

Z předchozího výčtu možných chyb je vidět, že modelovat působení všech chyb na měřenou hodnotu polohy pera by bylo velmi obtížné. Velikost některých systematických chyb je možné určit měřením a jejich vliv částečně kompenzovat při zpracování dat (např. zpoždění fotodetektoru). Velikost dalších systematických chyb lze určit na základě polohy pera (vliv sklonu pera a vliv vzájemné pozice scanneru pera a fotodetektoru). Ostatní systematické chyby je možné částečně kompenzovat pomocí kalibrace. Vliv nahodilých chyb na výslednou měřenou polohu je možné redukovat pomocí vícenásobného měření a průměrování výsledku z více hodnot.

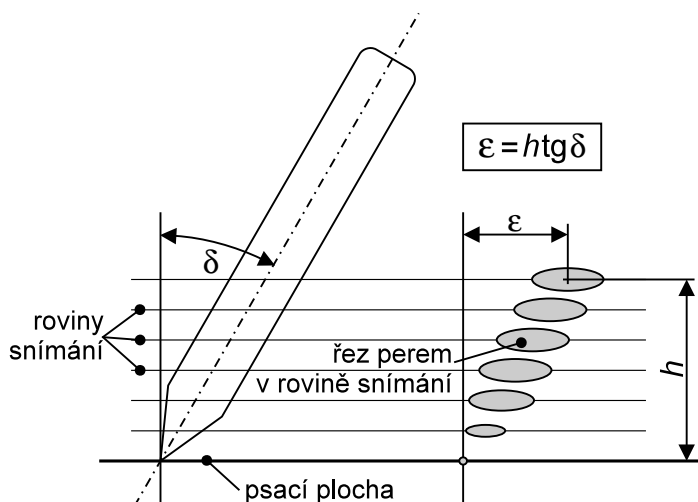
### Vliv sklonu pera

Pero se v běžné poloze při psaní odchyluje od kolmé polohy; při snímání polohy pera v rovině odlišné od psací plochy dojde vlivem sklonu pera k chybě měření jeho polohy.

Předpokládejme, že měřicí metoda poskytuje údaj o poloze geometrického středu průniku tělesa pera a roviny měření. Odchylkou pera  $\delta$  od kolmé polohy způsobí při vzdálenosti snímací roviny  $h$  od psací plochy chybu určení polohy  $\varepsilon$ , kterou je možné vyjádřit jako:

$$\varepsilon = htg\delta . \quad (34)$$

Sklon pera závisí též pozici na paže, zápěstí a prstů; ta je ovlivněna polohou pera na psací ploše, tvarem trajektorie pera či individuálními rysy rukopisu.



Obr. 24. Vliv sklonu pera na určení jeho polohy

Je zřejmé, že vzdálenost roviny snímání a psací plochy by měla být zvolena co nejmenší, aby byla chyba způsobená sklonem pera minimalizována. Z různých praktických důvodů (tvar pera, nerovnosti psací plochy, rozměry prvků snímacího systému) je však nutné dodržet jistou minimální vzdálenost, proto bude nutné s odchylkou skutečné a naměřené polohy pera počítat a vhodnou metodou ji korigovat. V nejjednodušším případě je možné považovat sklon pera za neměnný a upravit polohu aditivní korekční konstantou vhodně zvolenou pro každou z os. Přesnější metodou by bylo použití hodnot korekce závislou na poloze pera, příp. i na tvaru trajektorie. Ideální by bylo získat informaci o skutečném sklonu pera, např. měřením polohy pera ve dvou rovinách různě vzdálených od psací plochy. Nevýhodou by však byla komplikovanější konstrukce snímacího zařízení umožňujícího takové měření.

### Šíření chyb měření

Poloha pera vyjádřená v pravoúhlých souřadnicích je veličinou určenou nepřímo výpočtem z úhlů, pod kterými je pozorováno pero z pohledu snímačů. Chyby měření těchto úhlů jsou zdrojem chyb kartézských souřadnic, a to podle věty o šíření chyb [40].

Pokud nepřímo měřená veličina  $v$  závisí na přímo měřených veličinách  $v_1, v_2, \dots, v_n$  podle funkčního vztahu  $v = f(v_1, v_2, \dots, v_n)$ , potom pro chybu  $\sigma_v$  veličiny  $v$  platí:

$$\sigma_v^2 = \left( \frac{\partial f}{\partial v_1} \sigma_{v_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial v_2} \sigma_{v_2} \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial f}{\partial v_n} \sigma_{v_n} \right)^2, \quad (35)$$

kde  $\sigma_{v_1}, \sigma_{v_2}, \dots, \sigma_{v_n}$  jsou chyby přímo měřených veličin [41].

V našem případě jsou kartézské souřadnice polohy pera funkcí měřených úhlů  $\varphi_1, \varphi_2$ :



$$x = f_x(\varphi_1, \varphi_2) \quad (36)$$

$$y = f_y(\varphi_1, \varphi_2) \quad (37)$$

a pro chyby kartézských souřadnic můžeme tedy psát:

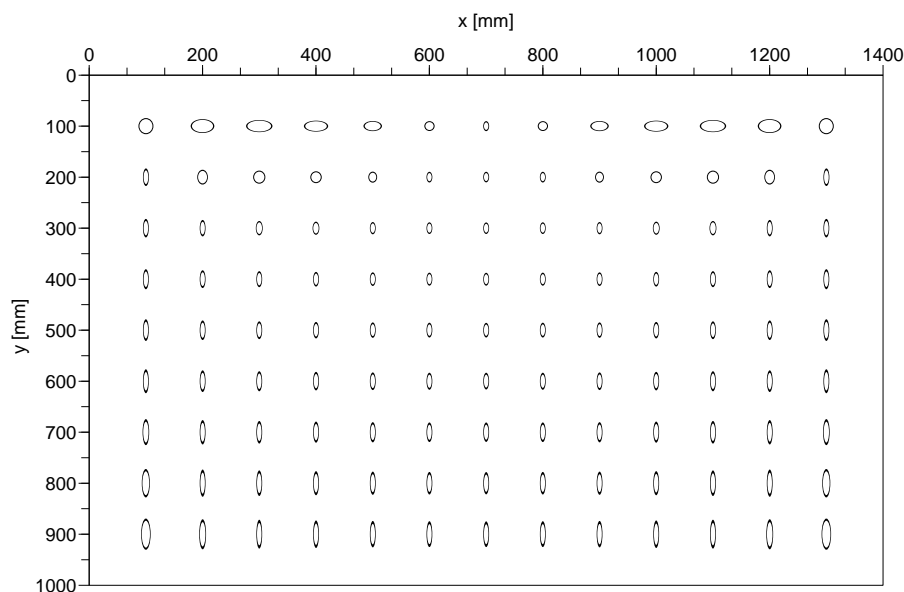
$$\sigma_x^2 = \left( \frac{\partial f_x(\varphi_1, \varphi_2)}{\partial \varphi_1} \sigma_{\varphi_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial f_x(\varphi_1, \varphi_2)}{\partial \varphi_2} \sigma_{\varphi_2} \right)^2 \quad (38)$$

$$\sigma_y^2 = \left( \frac{\partial f_y(\varphi_1, \varphi_2)}{\partial \varphi_1} \sigma_{\varphi_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial f_y(\varphi_1, \varphi_2)}{\partial \varphi_2} \sigma_{\varphi_2} \right)^2, \quad (39)$$

kde příslušnými funkcemi  $f_x, f_y$  jsou vztahy pro transformaci souřadnic (30), (31).

Analytické vyjádření výsledných vztahů je poměrně složité a pro další výpočty je vhodnější aproximovat jejich hodnoty numericky.

K získání představy o šíření chyb byla pomocí programu Scilab provedena simulace vlivu chyby měřených úhlů  $\varphi_1, \varphi_2$  na chybu kartézských souřadnic pro vybrané polohy pera na psací ploše. Obr. 25 ukazuje výsledek simulace.



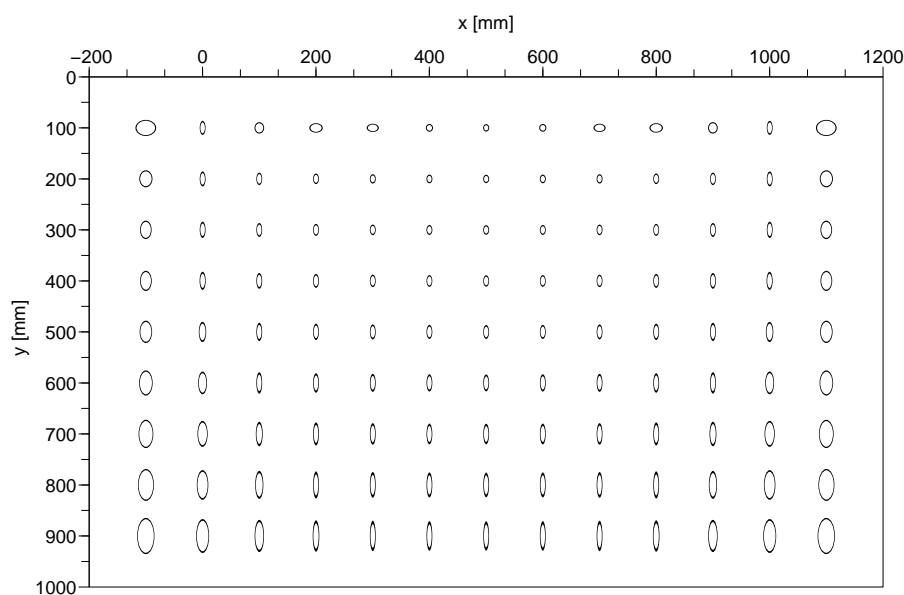
Obr. 25. Simulace šíření chyb – triangulační základna 1400 mm

Elipsy ukazují velikost chyb ve směru os  $x$  a  $y$  ve vybraných bodech – šířky a výšky jednotlivých elips odpovídají odchylkám polohy  $\Delta x, \Delta y$  vzniklé v důsledku

chyby úhlů  $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$ . Simulace byla provedena pro rozměry  $1400 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$  a pro zvolenou chybu úhlů  $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = 0,012 \text{ rad}$ <sup>9</sup>.

Z grafu je vidět, že šíření chyb dané geometrickým modelem způsobuje na většině plochy podstatně vyšší chybu ve směru osy  $y$ . V horní části plochy jsou pak patrné trojúhelníkové oblasti s významně vyšší velikostí chyby. To je dáno tím, že úloha nalezení průsečíku paprsků scannerů je poblíž triangulační základny špatně podmíněná.

Mohlo by se zdát, že plošné rozložení velikosti chyb by se zlepšilo s posunutím polohy bodů pozorování směrem ke středu triangulační základny. Takovou situaci ukazuje obr. 26 – body pozorování jsou posunuty o 200 mm směrem ke středu horní hrany (souřadný systém má v souladu s obr. 22 počátek v levém bodě pozorování). Výsledek je však při shodných rozměrech pracovní plochy horší, zejména v okrajových částech plochy. Při menší vzdálenosti bodů pozorování se totiž paprsky protínají v bodech poblíž svislým okrajům plochy pod malým úhlem, opět s důsledkem špatné podmíněnosti úlohy určení průsečíku paprsků.



Obr. 26. Simulace šíření chyb – triangulační základna 1000 mm

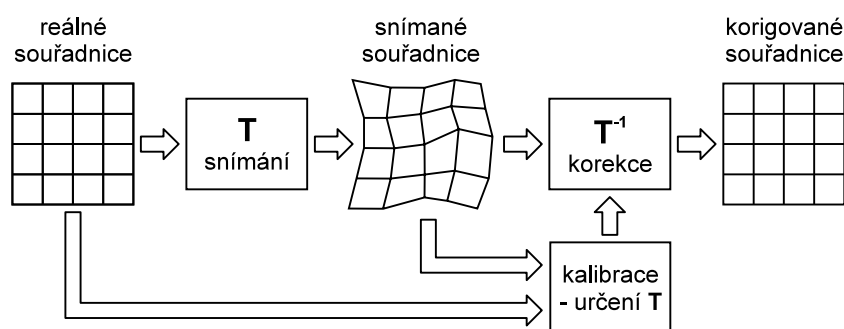
### 3.3.4.2 Korekce systematických chyb pomocí kalibrace

Principem kalibrace je mapování známých hodnot veličin reálného světa a jim odpovídajících naměřených hodnot; ze znalosti vztahu měřených a skutečných veličin je pak možné určit předpis, podle kterého jsou naměřené veličiny korigovány.

V případě řešené úlohy jde o mapování 2D souřadnic roviny psací plochy a souřadnic obrazu plochy pořízeného jejím snímáním. Situaci ilustruje obr. 27. Chyby

<sup>9</sup>Hodnota byla zvolena tak, aby byl výsledek simulace přehledný a dostatečně názorný.

měření polohy pera způsobují deformaci souřadnicové sítě při přechodu mezi oběma rovinami; na zobrazení bodů psací plochy do odpovídajících bodů jejího obrazu můžeme pohlížet jako na geometrickou transformaci obrazu popsanou vektorovou funkcí  $\mathbf{T}$ . Cílem korekce je pak dosáhnout v ideálním případě shody skutečných a korigovaných souřadnic korespondujících bodů; korekční úloha tedy spočívá v aplikaci inverzní transformace  $\mathbf{T}^{-1}$  na naměřená polohová data. Úkolem kalibrace je na základě srovnání poloh tzv. *vlíčovacích bodů*, jejichž souřadnice na psací ploše i v jejím obrazu známe, aproximovat transformační funkci  $\mathbf{T}$ .



Obr. 27. Geometrické zkreslení obrazu psací plochy a jeho korekce

Pro navrhované zařízení je kalibrace a korekce souřadnic významná tím, že může výrazně potlačit systematické chyby nejrůznějšího původu a podstatně tím zlepšit dosaženého výsledku snímání. S ohledem na omezení předmětu zájmu této práce na hardwarovou část navrhovaného zařízení však nebude implementaci metod kalibrace a korekce souřadnic prozatím věnována pozornost.

## 4 Návrh zařízení

V předchozí kapitole věnované rozboru úlohy byl výběr metody snímání zúžen na optické metody, využívající triangulace ze známé základny v rovině rovnoběžné s psací plochou v malé vzdálenosti od ní. Na základě rozboru možností uspořádání snímací soustavy byla zvolena koncepce založená na laserovém scanování pracovní plochy ze dvou bodů a detekci odraženého záření pomocí fotodetektoru s pevným zorným polem. Pro potlačení rušivého vlivu osvětlení pozadí bylo navrženo použití modulace laserových paprsků a synchronní fotodetekce.

Úkolem návrhové fáze vývoje, jež je předmětem této kapitoly, bude konkretizace zvolené rámcové koncepce a její vypracování do podoby návrhu obvodového řešení.

### 4.1 Koncepce zařízení

#### 4.1.1 Uspořádání snímacího systému

##### 4.1.1.1 Počet a poloha scannerů

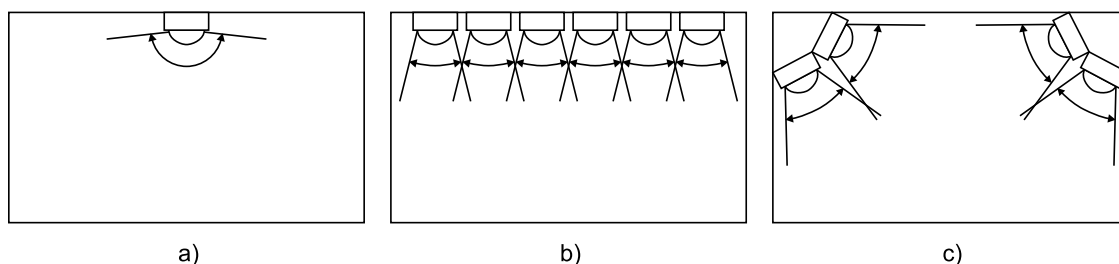
Základní uspořádání snímací soustavy je dáno volbou snímací metody, tj. triangulace ze známé základny (odst. 3.3.2.3). S ohledem na požadavky na jednoduchost a nízkou cenu nejsou uvažována řešení s více než dvěma scannery. Z principu metody plyne, že přesnost měření polohy roste s délkou triangulační základny; z toho vyplývá jako nejvýhodnější umístění scannerů v rozích pracovní plochy. Vzhledem k přirozené poloze ruky při psaní na tabuli má smysl pouze umístění scannerů na horní hraně pracovní plochy – jiná poloha by vedla k problémům s možným zakrytím pera rukou. Umístění scannerů na dolní hraně plochy je při psaní křídou vyloučeno rovněž z důvodu prašnosti.

##### 4.1.1.2 Počet a poloha fotodetektorů

Volba pevného fotodetektoru poskytuje mnoho možností uspořádání, pokud jde o počet, polohu a orientaci senzorů odraženého záření.

Ideálním řešením z hlediska obvodové složitosti by bylo použití jediného fotodetektoru s širokým zorným polem ( $180^\circ$  nebo  $90^\circ$  při snímání ze středu hrany resp. z rohu psací plochy) – obr. 28a). Jednoduchost elektronické části fotodetektoru by ovšem byla vyvážena složitostí širokoúhlé optické soustavy. Jinou možností by představovalo použití většího počtu detektorů s úzkým zorným polem a jednoduchou optickou soustavou (obr. 28b); v takovém případě by však bylo třeba uspokojivě vyřešit otázku připojení mnoha fotodetektorů a zpracování jejich signálů. Výsledkem by byla značná složitost obvodů zpracování signálů. Za přijatelný kompromis by bylo možné považovat použití několika málo fotodetektorů se středně širokým zorným úhlem. V uspořádání podle obr. 28c), kdy je několik fotodetektorů seskupeno do stejného místa, je možné navíc využít paralelního spojení fotodiod pro zvětšení efektivní plochy fotodetektoru s možností samostatného orientování každé z nich.

Takto by mohly být vždy dva fotodetekční prvky s vlastními objektivy společně připojeny k jednomu obvodu fotodetektoru. Pro úplné pokrytí pracovní plochy by tak postačovaly dva moduly fotodetektorů se čtyřmi fotodiodami s objektivy se zorným úhlem alespoň  $45^\circ$ . Omezujícím faktorem je však vyšší kapacita paralelně spojených fotodiód přívodních vodičů, což omezuje šířku pásma signálu, které lze fotodetektozem přenést.



Obr. 28. Příklady možného pokrytí pracovní plochy zornými poli fotodetektorů  
 a) jeden fotodetektor s širokým zorným polem b) pole mnoha fotodetektorů  
 c) pole 4 fotodetektorů se zorným úhlem  $60^\circ$

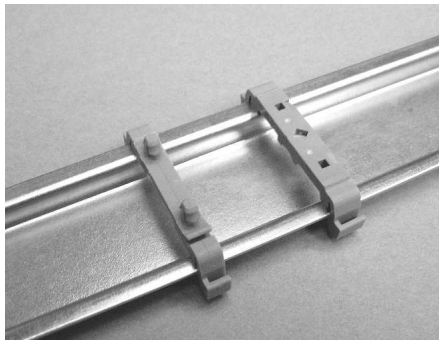
#### 4.1.2 Konstrukční řešení

Ze zvoleného uspořádání snímacího systému plyne, že jednotlivé části snímací soustavy nebudou soustředěny na jednom místě, ale umístěny do navzájem značně vzdálených poloh nad horní hranou pracovní plochy. Realizace v podobě jednodeskového kompaktního zařízení tedy nepřichází v úvahu a bude nutné funkce zařízení alokovat na více navzájem propojených modulů. Modulární stavebnicová konstrukce zároveň dobře vyhovuje účelu, kterému má zařízení sloužit – je pojata jako experimentální prototypová konstrukce, proto je třeba počítat s tím, že během vývoje bude nutno opakovaně přikročit k úpravám, změnám zapojení a dalším zásahům vyžadujícím jednoduchou montáž a demontáž sestav. Vývoj řešení může také vyžadovat změny geometrie snímací soustavy, počtu a polohy snímačů, rozšíření funkčnosti a další postupné změny.

Z konstrukčního hlediska je vhodné zařízení koncipovat jako co nejjednodušší, bez speciálních požadavků na obrábění nebo použití technologií vyžadujících vysoké jednorázové náklady, zhotovení forem, přípravků apod. Je vhodné v maximální míře využít existujících dostupných komponentů.

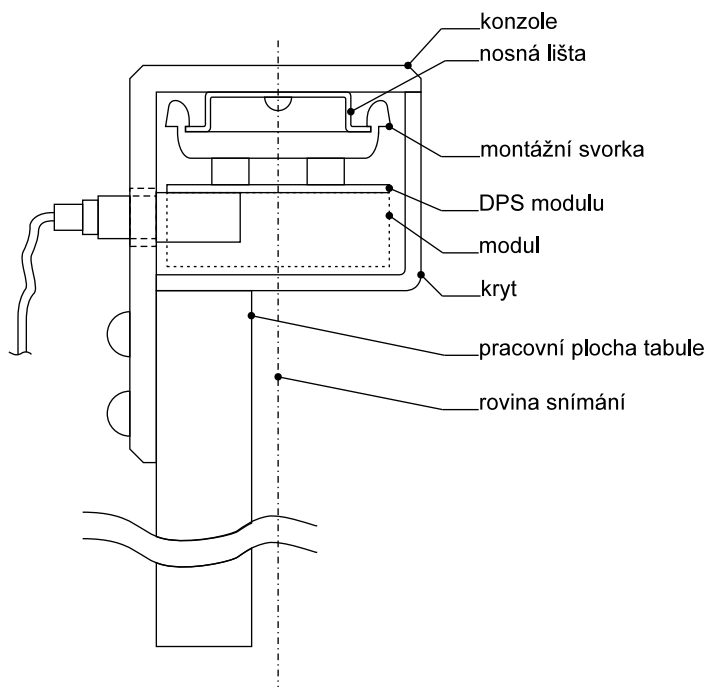
V počátečních úvah o mechanickém řešení bylo zvažováno použití dílů stavebnice Merkur či využití duralových profilů umožňujících použití šroubových spojů bez vrtání otvorů. Nakonec však byla zvolena koncepce využívající jako hlavní nosný prvek montážní lištu dle normy ČSN EN 60715, tzv. *DIN lištu*, a moduly tvořené destičkami plošných spojů opatřenými prvky pro uchycení na lištu bez použití šroubových spojů. Výhodou je snadná dostupnost montážních prvků, jejich nízká cena,

možnost variabilního polohování modulů a rychlá montáž a demontáž modulů. Obr. 29 ukazuje DIN lištu a dva typy svorek pro uchycení na lištu.



Obr. 29. DIN lišta a montážní svorky

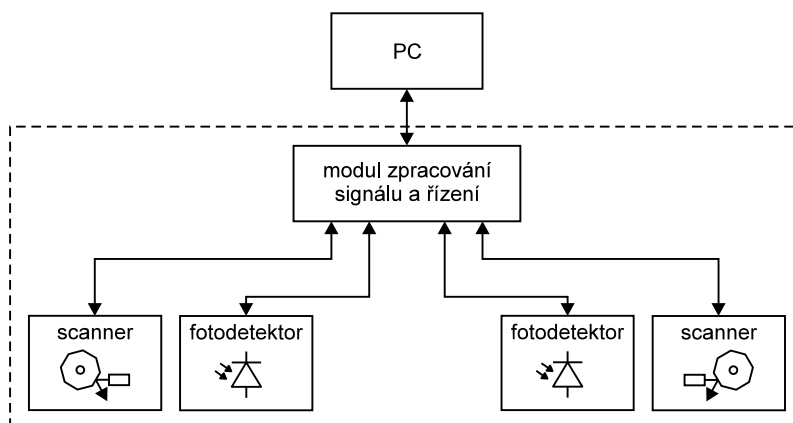
Na obr. 30 je schematicky znázorněna vnitřní dispozice zařízení z bočního pohledu a způsob jeho upevnění na tabuli.



Obr. 30. Vnitřní uspořádání prvků zařízení - boční pohled

#### 4.1.3 Blokové schéma

Pro uvažované uspořádání snímacího systému byla navržena modulární struktura zařízení podle obr. 31. Ústředním prvkem zařízení je modul zpracování signálu a ří-



Obr. 31. Blokové schéma zařízení

zení; k němu jsou připojeny všechny ostatní moduly zařízení a poskytuje též rozhraní USB pro připojení k PC. Funkce scanování a fotodetekce jsou realizovány oddělenými moduly; díky tomu je v budoucnu usnadněna případná změna řešení jednotlivých částí snímací soustavy.

Pořadí modulů v blokovém schématu zároveň odpovídá předpokládanému fyzickému rozmístění modulů na montážní liště – levý a pravý scanner budou umístěny co nejdále od středu montážní lišty, aby bylo dosaženo maximální šířky triangulační základny. Rovněž fotodetektory budou umístěny poblíž krajních pozic, aby při zorném úhlu každého zhruba  $90^\circ$  byla pokryta celá pracovní plocha. Montáž řídicího modulu se s ohledem na snadnou dostupnost přípojných míst (napájení, USB) předpokládá poblíž levého rohu pracovní plochy.

## 4.2 Elektronická část

### 4.2.1 Modul zpracování signálu a řízení

Úkolem modulu zpracování signálu a řízení je zejména:

- generování signálů pro:
  - modulaci laserových svazků
  - demodulaci signálu fotodetektoru
  - synchronizaci rozmítání laserových svazků
- zpracování signálů z fotodetektorů
- řízení připojených modulů
- generování záporného napájecího napětí pro analogové obvody.

Pomineme-li poslední položku, tj. generování záporného napájecího napětí, lze pro realizaci jednotlivých funkcí použít několika přístupů. Synchronizační a modulační signály by bylo možné generovat softwarově pomocí PC a některého z portů, např. paralelního; s ohledem na poměrně vysoké požadované kmitočty a přesný fázový rozdíl modulačního a demodulačního kmitočtu by však toto řešení přinášelo

značné potíže. Konverze signálů za účelem jejich zpracování v PC by byla možné s použitím vhodného přídavného hardwaru, např. měřicí karty nebo externího měřicího modulu a jednoduchých přizpůsobovacích obvodů. Takové řešení by umožnilo poměrně jednoduché ověření konceptu zařízení bez nutnosti rozsáhlého vývoje specializovaného hardwaru. Nevýhodou je však nákladnost potřebného vybavení a takto pojaté řešení zařízení by mělo spíše experimentální charakter, značně vzdálený od cílové představy samostatného zařízení schopného práce bez podpory PC. Jako vhodnější se jeví řešení modulu zpracování signálu a řízení technickými prostředky. Zpracování signálu na vlastní desce může být omezeno na filtraci a předzpracování dat nutné pro vlastní funkci snímací soustavy a předzpracované naměřené údaje mohou být předány k dalšímu zpracování do PC. Takto může být rozumně využito předností technické i programové realizace funkcí zařízení.

Budou-li funkce generování a zpracování signálů měřicí soustavy implementovány přímo na desce zpracování signálů hardwarově, přichází v úvahu několik možných řešení, např.:

- pevná obvodová realizace pomocí analogových a číslicových obvodů
- použití digitálního signálového procesoru a jednoduchých podpůrných obvodů
- realizace pomocí FPGA<sup>10</sup> a jednoduchých podpůrných obvodů
- kombinace pevné obvodové realizace s programovatelnými obvody (DSP, FPGA, FPAA<sup>11</sup>, mikrokontrolér, programovatelné logické obvody).

Jednotlivá řešení se liší mírou vývojové náročnosti a pružnosti návrhu. Jako kompromis byla zvolena poslední varianta, tedy smíšený návrh implementující část funkcí pouze obvodově a část pomocí programovatelných prvků, čímž je zachována jistá pružnost návrhu. Pevná obvodová realizace je použita pro analogové a časovací obvody; pro zpracování signálů a řízení připojených modulů byl použit mikrokontrolér, řídicí logika propojující signály časovacích obvodů, řídicí signály mikrokontroléru a signály rozhraní je realizována pomocí programovatelného logického pole.

#### 4.2.1.1 Blokové schéma

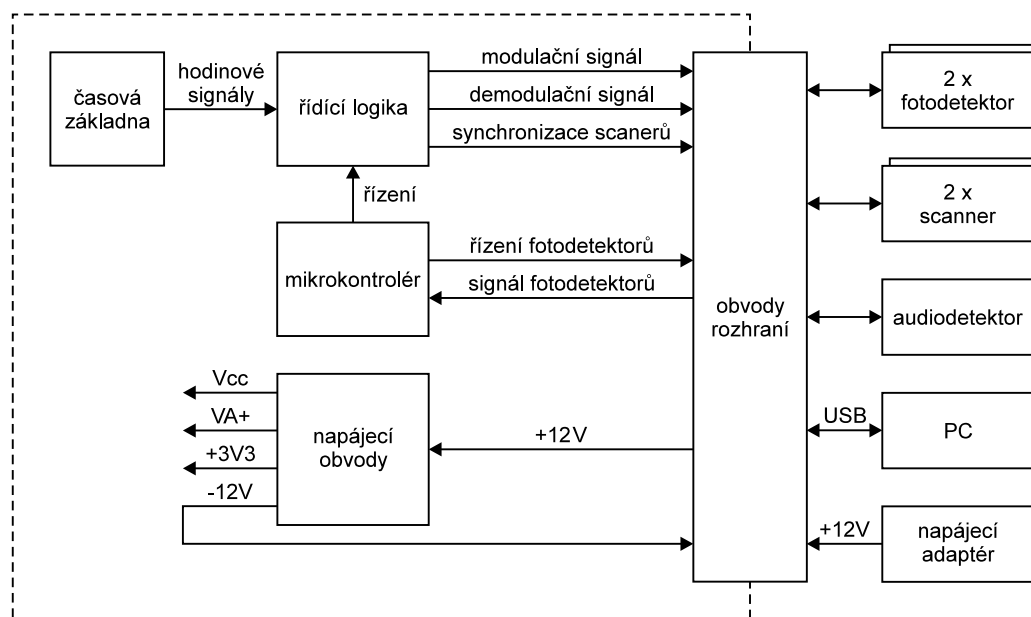
Předpokládanou strukturu řešení modulu ukazuje blokové schéma na obr. 32. Deska bude vybavena rozhraními pro ostatní moduly zařízení, tj. pro levý a pravý fotodetektor a levý a pravý scanner. Pro připojení k osobnímu počítači je předpokládáno použití rozhraní USB. Deska bude napájena externím adaptérem poskytujícím stejnosměrné napětí o nominální hodnotě 12 V; z něj budou odvozena další napájecí napětí pro obvody na desce a pro připojené moduly.

Blokové schéma ukazuje i připojení modulu audiodetektoru, který v první fázi není součástí zařízení, ale modul zpracování signálu je vybaven rozhraním pro jeho připojení. V dalších fázích vývoje je plánováno volitelné využití audiodetektoru např. pro detekci kontaktu pera s pracovní plochou a rozpoznávání druhu pera pomocí spektrální analýzy kmitů vyvolávaných pohybem pera po pracovní ploše.

<sup>10</sup>Field Programmable Gate Array – programovatelné hradlové pole

<sup>11</sup>Field Programmable Analog Array – programovatelné analogové pole





Obr. 32. Modul zpracování signálu a řízení – blokové schéma

#### 4.2.1.2 Obvodové řešení modulu

Na rozdíl od modulů scanneru a fotodetektoru nebyla před konečným návrhem zapojení modulu zpracování signálu ověřována dílčí obvodová řešení. To pramení jednak z faktu, že některé klíčové komponenty jsou dostupné výhradně ve verzi pro povrchovou montáž s jemnou roztečí vývodů a jejich použití v experimentálních konstrukcích je bez speciálních přípravků nebo vývojových kitů jen stěží možné. Dalším důvodem je i to, že řešení modulu zpracování signálu je oproti ostatním modulům mnohem přímočařejší, a to i navzdory větší obvodové složitosti.

Schéma modulu ukazuje obr. 64 až 66 v příloze A, navržené řešení a jeho funkce je pak popsáno jeho v dalším textu.

#### 4.2.1.3 Mikrokontrolér

Mikrokontrolér zajišťuje řízení prvků tvořících snímací soustavu a zpracování měřených obrazových dat do podoby úhlových souřadnic pera. Ačkoli z hlediska výkonu a možností zpracování signálu by bylo pro implementaci těchto funkcí výhodnější použití digitálního signálového procesoru, byla dána přednost výkonnému mikrokontroléru s jádrem ARM7TDMI. Tato volba představuje rozumný kompromis mezi cenou a výkonem, pro danou aplikaci postačující. Výhodou je jednodušší vývoj programového vybavení, lepší dostupnost a podstatně nižší cena. Jako konkrétní typ byl zvolen LPC2136; mikrokontrolér dosahuje maximálního výpočetního výkonu 60 MIPS, je vybaven pamětí RAM o velikosti 32 kB RAM a 256 kB paměti Flash, dvěma osmikanálovými 10 bitovými A/D převodníky s dobou převodu 2,44  $\mu$ s

a 47 vstupně-výstupními linkami [42]. Ačkoli mikrokontrolér je určen pro napájení napětím 3,3 V, jeho periferní obvody umožňují připojení vstupních napětí do 5 V a umožňují tak spolupráci s klasickými číslicovými obvody s pětivoltovým napájením.

Hodinový kmitočet mikrokontroléru je určen krystalem  $X_1$ ; použitý kmitočet 7, 3726 MHz umožňuje pomocí vnitřního obvodu fázového závěsu mikrokontroléru generovat při násobícím poměru 8 taktování jádra mikrokontroléru frekvencí 58, 98 MHz.

Pro konverzi analogových signálů z fotodetektorů jsou použity vstupy vestavěného A/D převodníku AD0.0 a AD0.1. Referenční napětí pro A/D převodník je filtrováno pomocí  $R_{14}$ ,  $C_4$ .

Na desce je také vyvedeno rozhraní JTAG ( $K_3$ ), jehož prostřednictvím je možné s použitím vhodného *debuggeru* ladit program mikrokontroléru.

#### 4.2.1.4 Časová základna

Obvody časové základny tvoří  $IC_3$  až  $IC_6$  a jejich okolí ( $X_2$ ,  $C_9$  až  $C_{11}$ ,  $R_{21}$  až  $R_{23}$ ).  $IC_3$  slouží jako krystalový oscilátor s integrovaným čtrnáctistupňovým děličem. Z výstupu Q4 je vyveden signál pro modulaci laserů CLKMOD; jeho kmitočet je 32 krát nižší než kmitočet oscilátoru. Signál je zároveň přiveden na vstup posuvného registru  $IC_4$ , z jehož výstupů jsou časově posunuté signály CLKDEM0 až CLKDEM7 přivedeny na obvod řídicí logiky  $IC_7$ ; výběrem vhodného z těchto signálů je určen fázový posuv signálu pro synchronní detekci DEMOD. Při změně obvodového řešení fotodetektoru nebo budiče laseru, které by vedlo ke změně fázové charakteristiky, by tak bylo možné potřebný fázový posuv upravit přeprogramováním  $IC_7$ .

Z výstupu Q13 je signál oscilátoru vydělený 16384 přiveden na klopný obvod  $IC_{6A}$ , sloužící jako další dělič dvěma. Z jeho výstup slouží jako hodinový signál pro kruhový posuvný registr tvořený  $IC_5$  a  $IC_{6A}$ . Nulovací obvod  $R_{23}$ ,  $C_{11}$  slouží spolu s klopným obvodem  $IC_{6B}$  k nastavení hodnoty prvního bitu v kruhovém posuvném registru na log. 1. Z výstupů  $IC_5$  jsou odebírány časově posunuté synchronizační signály CLKSCAN\_L, CLKSCAN\_R, z nichž jsou v obvodu řídicí logiky  $IC_7$  hradlováním odvozeny signály pro synchronizaci scannerů /SYNCSCAN\_L a /SYNCSCAN\_R. Zapojení kruhového registru je převzato z [43, str. 65].

Rezonanční kmitočet krystalu  $X_2$ , který určuje kmitočet oscilátoru časové základny a ostatních z něj odvozených časovacích signálů, byl zvolen tak, aby byly splněny požadavky na minimální hodnoty frekvence scanování (2) a modulační frekvence (23); z dostupných hodnot byla vybrána frekvence 3,276 MHz. Kmitočty signálů získané postupným dělením kaskádou děličů jsou uvedeny v tab. 1.

#### 4.2.1.5 Řídicí logika

Úkolem řídicí logiky je hradlování signálů časové základny pomocí řídicích signálů z mikrokontroléru a selekce fázového posuvu demodulačního signálu. Pro snadnou

Tab. 1. Frekvence signálů časové základny

Veličina	Hodnota	Signály
$f_{mod}$ [Hz]	102375,0	CLKMOD, CLKDEM0n, LASMOD, DEMOD, ILLUM_L, ILLUM_R
$f_{scan}$ [Hz]	12,5	CLKSCAN_L, CLKSCAN_R, /SYNCSCAN_L, /SYNCSCAN_R

možnost úpravy logických funkcí a kompaktnější obvodové řešení byla zvolena realizace pomocí programovatelného logického pole GAL (IC<sub>7</sub>). Volba obvodu typu GAL byla ovlivněna zejména dostupností vývojových prostředků. Zvažované alternativní řešení řídicí logiky programovatelnými obvody s vyšší hustotou integrace, např. CPLD, které by zároveň umožnilo realizaci části časové základny, by bylo z technického hlediska výhodnější a modernější, ovšem za cenu dodatečných nákladů a času potřebného na vývoj, a proto od něj bylo upuštěno.

S ohledem na požadovaný počet vstupních a výstupních signálů byl na místě IC<sub>7</sub> použit typ GAL20V8. Nevýhoda poměrně vysoké spotřeby obvodů GAL je částečně zmírněna použitím verze Q se čtvrtinovou spotřebou oproti standardní verzi.

Na vstupy IC<sub>7</sub> jsou přivedeny modulační a synchronizační signály časové základny CLKMOD, CLKDEM0 až CLKDEM07, CLKSCAN\_L a CLKSCAN\_R, dále povolovací signály mikrokontroléru LASEN, MOTEN\_L, MOTEN\_R, ILLUMEN\_L a ILLUMEN\_R. Na výstupu IC<sub>7</sub> je k dispozici signál pro modulaci laserů LASMOD, signál pro synchronní detekci signálu fotodetektorů DEMOD, modulační signály pro pomocné osvětlovače ILLUM\_L, ILLUM\_R a signály pro synchronizaci rozmítání paprsků /SYNCSCAN\_L, /SYNCSCAN\_R.

V příloze B je uveden výpis definičního souboru pro návrhový systém WinCUPL, jehož pomocí byl vygenerován soubor JEDEC pro naprogramování IC<sub>7</sub>. Z něj je také patrný (v sekci *Equations*) způsob generování výstupních signálů hradlováním signálů časové základny.

#### 4.2.1.6 Obvody rozhraní

Vstupní a výstupní číslicové signály tvořící součást rozhraní modulů jsou odděleny pomocí hradel IC<sub>8</sub>, IC<sub>9</sub> a IC<sub>10</sub>. Pro vstupní signály, jejichž tvar je přenosem relativně dlouhým vedením deformován, slouží hradla IC<sub>8C</sub>, IC<sub>8D</sub> a IC<sub>8F</sub>, IC<sub>10C</sub> a IC<sub>10D</sub> jako tvarovače, proto bylo použito hradel se Schmittovými klopnými obvody na vstupu. Ostatní hradla IC<sub>8</sub>, IC<sub>9</sub> a IC<sub>10</sub> slouží jako budiče výstupních linek rozhraní.

Analogové signály z fotodetektorů \*PDOUT\_L, \*PDOUT\_R jsou přivedeny na oddělovací sledovače tvořené operačními zesilovači IC<sub>12A</sub>, IC<sub>12B</sub>, odkud jsou jako signály označené PD0\_L, PD0\_R přivedeny na vstupy A/D převodníku mikrokontroléru.

Pro připojení k osobnímu počítači je modul vybaven rozhraním USB realizovaným obvodem IC<sub>2</sub>, který slouží jako konvertor mezi sériovým rozhraním mikrokontroléru (rozhraní UART0, signály COM\_RX a COM\_TX) a sběrnici USB. LED D<sub>1</sub> a D<sub>2</sub> slouží k signalizaci přenosu dat. Pomocí rozhraní USB je umožněno také programování mikrokontroléru v systému. Pro aktivaci režimu ISP (*In-System Programming*) slouží signály COM\_DTR a COM\_RTS, které jsou na straně mikrokontroléru připojeny na restovací signál mikrokontroléru a linku P0.14. Podrobnosti týkající se aktivace *ISP bootloadera* a popis protokolu pro programování mikrokontroléru v systému lze nalézt v [44].

#### 4.2.1.7 Napájecí obvody

Stejnoseměrné napájecí napětí 12 V přivedené na desku prostřednictvím konektoru K2 je rozvedeno k rozhraním ostatních modulů zařízení a dále je použito ke generování dalších napájecích napětí. Na desce samotné jsou zapotřebí napájecí napětí 5 V pro logické obvody (časová základna, GAL, číslicová část obvodů rozhraní), 3,3 V pro mikrokontrolér a oddělené napájení 5 V pro operační zesilovače IC<sub>11</sub> a IC<sub>12</sub><sup>12</sup>. Ta jsou vytvářena stabilizátory IC<sub>13</sub>, IC<sub>14</sub> a IC<sub>15</sub>. Pro napájení analogových obvodů mimo desku je generováno záporné napájecí napětí -12 V, a to invertorem tvořeným obvodem MC34063 (IC<sub>16</sub>) a jeho okolím (L<sub>1</sub>, D<sub>10</sub>, C<sub>16</sub>, C<sub>17</sub>, C<sub>18</sub>, R<sub>24</sub>, R<sub>25</sub>, R<sub>26</sub>). Je použito zapojení invertoru převzaté z [45, str. 177] s hodnotami součástek upravenými pro vstupní napětí 12 V, výstupní proud 100 mA a spínací frekvenci 80 kHz.

#### 4.2.1.8 Budoucí rozšíření

Při návrhu desky bylo počítáno se zamýšleným budoucím rozšířením funkcí realizovaných modulem a s modifikacemi struktury celého zařízení; na desce jsou proto některé části obvodového řešení v současné fázi vývoje prozatím nevyužity, přesto je vhodné stručně zmínit jejich předpokládaný účel.

Modul je vybaven rozhraním LIR a RIR (konektory K<sub>7</sub> a K<sub>8</sub>), na která je přivedeno napájecí napětí +12V a modulační signály ILLUM\_L, ILLUM\_R. Rozhraní jsou zamýšlena pro připojení pomocných infračervených osvětlovačů, které by mohly být použity ve spojení s fotodetektoem pro orientační detekci přítomnosti pera v blízkosti pracovní plochy. Toho by mohlo být využito pro přepínání klidového a aktivního režimu zařízení, kdy by scanování mohlo být spouštěno pouze při přítomnosti pera poblíž plochy.

Deska obsahuje také prozatím nevyužitá rozhraní audiodetektoru (K<sub>12</sub>).

Pro rozšíření zařízení o řídicí desku, která by převzala funkce v současné době realizované softwarově v PC, tedy zejména korekce chyb, záznam dat a funkce uživatelského rozhraní, je modul vybaven rozhraním vyvedeným na K<sub>14</sub>. Obsahuje linky sériového komunikačního kanálu SPI0 a pomocné signály /RQST a /MRQST pro

<sup>12</sup>Použité typy OZ a rozsah zpracovávaných signálů umožňují napájení nesymetrickým napětím pouze kladné polarity.

řízení komunikace.

Některé vývody mikrokontroléru jsou rezervovány pro budoucí použití a ve schématu jsou označeny návěstími, aniž by byly na desce připojeny k dalším obvodům. Jedná se o signály PD1\_L a PD1\_R, které jsou určeny pro případné rozšíření počtu připojených fotodetektorů na čtyři a dále signály STAT0 až STAT3, které mohou být využity pro indikaci stavu zařízení (signalizace poruch, aktivního/klidového režimu, druhu pera apod.). Rezervovány pro budoucí použití jsou i vodiče SPI kanálu 1, který může být využit např. pro připojení sériové paměti pro uložení konstant nebo paměťové karty MMC nebo SD.

#### 4.2.2 Scanner

Účelem modulu scanneru je vyzařování modulovaného laserového svazku a jeho rozmítání, umožňující bodové osvětlení objektů ve snímané scéně s rychle se pohybujícím místem dopadu paprsku. Scanner musí generovat signály umožňující určení okamžité úhlové polohy laserového svazku. Řídící obvody modulu musí zajistit buzení zdroje laserového záření zaručující požadované provozní parametry a zabraňující jeho poškození. Motoru scanneru musí být řízen tak, aby byla zajištěna požadovaná úhlová rychlost otáčení.

Řešení scanneru předpokládá nejjednodušší způsob rozmítání, tj. pomocí rotujícího zrcadla; jiné metody vychylování paprsku (např. holografické scanování, použití prvků MOEMS apod.) nejsou brány v úvahu pro jejich relativně vyšší technickou a finanční náročnost.

##### 4.2.2.1 Blokové schéma

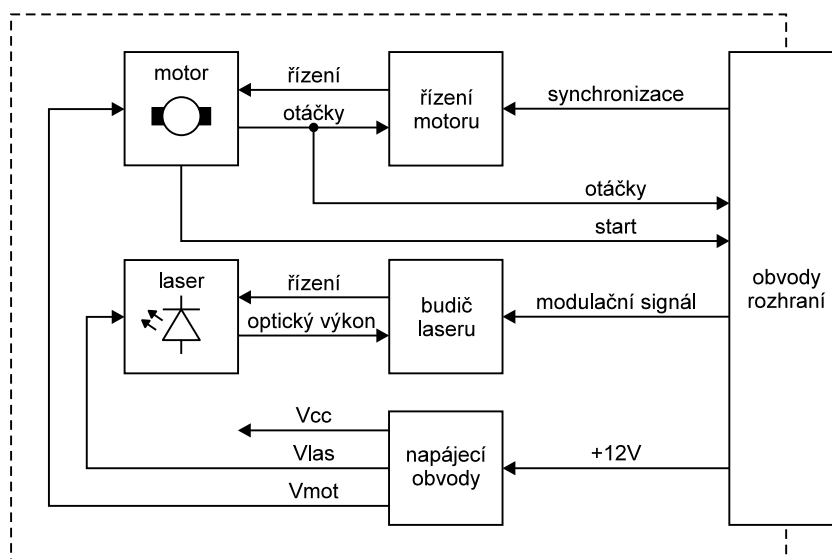
Na obr. 33 je znázorněno blokové schéma modulu scanneru odpovídající funkčním požadavkům a předpokládané obvodové struktuře řešení.

##### 4.2.2.2 Požadavky na zdroj laserového záření

Mezi hlavní požadavky kladené na zdroj laserového záření v dané aplikaci patří zejména:

- vlnová délka v červené části spektra
- možnost amplitudové modulace optického výkonu zvoleným modulačním kmitočtem
- malé rozměry umožňující kompaktní řešení scanneru
- nízká cena
- zařazení do bezpečnostní třídy I nebo II

Vzhledem k tomu, že použitá metoda snímání nebude využívat interferenčních jevů, neklade aplikace zvláštní nároky na stabilitu vlnové délky ani prostorovou a časovou koherenci. Rovněž s ohledem na krátkou pracovní vzdálenost není výběr omezen ani mimořádnými požadavky na geometrickou kvalitu paprsku, tedy jeho průměr a rozbíhavost.



Obr. 33. Modul scanneru - blokové schéma

Pro jednoduchost a kompaktnost konstrukce je vhodné použití kompaktního laserového modulu s vestavěnou kolimační optikou.

#### 4.2.2.3 Volba typu laseru

Po prostudování nabídky laserových diod a laserových modulů dostupných v sortimentu firem zabývajících se laserovou technikou a distributorů elektronických součástek byl jako zdroj laserového světla zvolen miniaturní modul dodávaný firmou GM Electronic pod označením *F-Laser 1 mW 6 mm* [46], který obsahuje laserovou diodu emitující záření o vlnové délce 650 nm s kolimační čočkou vsazenou do kompaktního mosazného pouzdra o průměru 6 mm. Modul je vybaven řídicí elektronikou pro použití v laserových ukazovátkách a podobných aplikacích. Řídicí elektronika sice neumožňuje modulaci laserového svazku, je však připojena vně vlastního modulu a je možné ji odpájet od laserové diody a nahradit vlastním budičem. Laserová dioda použitá v modulu je běžného provedení - v kovovém pouzdře TO-18 obsahujícím vlastní laserovou diodu spolu s fotodiódou pro monitorování optického výkonu; pouzdro má uspořádání vývodů typu *n*, tedy se středním společným vývodem připojeným k anodě laserové diody a katodě fotodiody [47].

#### 4.2.2.4 Buzení laseru

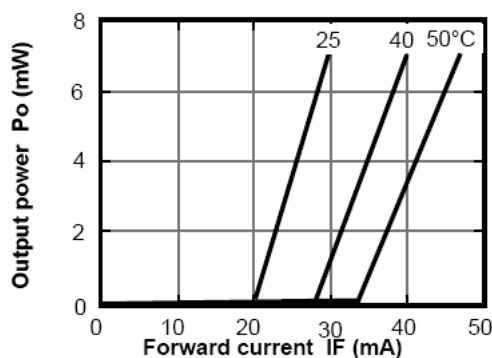
Napájení laserových diod musí splňovat několik podmínek, aby bylo zaručeno vhodné nastavení pracovního bodu a aby nedošlo k překročení mezních parametrů diody, které by mohlo mít za následek její poškození nebo zničení. Laserová dioda emituje záření při polarizaci v propustném směru. Její voltampérová charakteristika je podobná charakteristice běžné světlo emitující diody. V propustné části je patrné



Obr. 34. Laserový modul F-Laser 1 mW 6 mm

koleno, typicky v okolí propustného napětí ( $2 \div 2,5$ ) V. V oblasti ohybu charakteristiky poměrně strmě klesá odpor diody a při zvyšování propustného napětí dochází k prudkému nárůstu proudu. laserovou diodu je proto třeba napájet zdrojem s vysokou impedancí, tedy zdrojem proudu [48].

Pro hodnoty proudu nižší než velikost prahového proudu  $I_{th}$  v diodě dochází ke spontánní emisi záření, která se šíří všemi směry – dioda vyzařuje nekoherentní záření. Dosáhne-li proud prahové hodnoty, v materiálu diody se vytvoří tzv. *aktivní laserové prostředí*, které je schopno zesilovat procházející světlo a stimulovaná emise záření začíná převládat nad spontánní, dochází k prudkému zvýšení optického výkonu a záření se stává koherentním. Toho je dosaženo selektivním zesílením elektromagnetických vln s určitou frekvencí a fází; toho je docíleno účinkem optického rezonátoru, který je součástí struktury laserové diody [49]. Při dalším nárůstu protékajícího proudu se zhruba lineárně zvyšuje i vyzařovaný výkon až do hodnoty mezního proudu diody, kdy by došlo k jejímu zničení.

Obr. 35. Watt-ampérová charakteristika laserové diody  
převzato z [50]

Parametry laserových diod jsou silně závislé na teplotě přechodu; při růstu teploty se zvyšuje prahový proud, dochází k posunu vlnové délky a zkracuje se životnost diody. [48, 47]. Laserové diody proto vyžadují dostatečné chlazení pouzdra a zpravidla také aktivní stabilizaci teploty, např. pomocí Peltierových termočlánků a vhodného regulačního obvodu [51, 16, 52].

Aby nedošlo k poškození laserové diody, je nutné zabránit jejímu i krátkodobému přebuzení a zaručit i další provozní podmínky. Je tedy třeba zejména [48, 47, 53]:

- zabránit překročení maximálního propustného proudu (a to i krátkodobému)
- zabránit překročení maximálního optického výkonu
- zajistit dodržení maximálního napětí v závěrném směru
- omezit proudové nárazy a napěťové špičky v obvodech budiče při zapnutí
- zabránit indukování impulzních napětí do přívodních vodičů diody
- zabránit tepelnému poškození přechodu diody.

Kromě těchto požadavků na ochranu laserové diody je zapotřebí také splnit další funkční požadavky:

- stabilizovat optický výkon
- modulovat optický výkon emitovaného záření modulačním signálem

U laserů pracujících spojitě se stabilizuje okamžitá hodnota optického výkonu; v případě laserů, jehož optický výkon je modulován, nelze takový způsob regulace použít, protože regulační obvod by se pokoušel vyrovnávat výkyvy výkonu způsobené modulací. Regulovanou veličinou v takových případech bývá střední hodnota optického výkonu [54].

#### 4.2.2.5 Ověřovací zapojení budiče laseru

Pro návrh budiče laserové diody je nutné znát její základní parametry, tj. zejména maximální povolený proud v propustném směru, maximální optický výkon, prahový proud a závislost proudu monitorovací fotodiody na optickém výkonu. Ke zvolenému laserovému modulu však prodejce nebyl schopen poskytnout žádné technické údaje s výjimkou napájecího napětí budiče ( $V_{cc} = 3\text{ V}$ ) a jmenovitého optického výkonu ( $P_{opt} = 1\text{ mW}$ ). Proto byl nejprve prostudován zabudovaný budič modulu a změřen provozní propustný proud laserové diody a proud monitorovací fotodiodou. Pro měření prahového proudu byl vestavěný budič nahrazen obvodem umožňujícím řízení propustného proudu a měření proudu monitorovací diody; prahový proud byl určen jako hodnota propustného proudu odpovídající kolenu watt-ampérové charakteristiky. Výsledky měření jsou uvedeny v tab. 2.

S použitím pramenů věnujících se problematice buzení laserových diod [47, 55, 54, 56, 53, 48, 57] a na základě prvotních experimentů s řízením proudu laserových diod bylo navrženo ověřovací zapojení budiče zvoleného laserového modulu, jehož zjednodušené schéma ukazuje obr. 36.

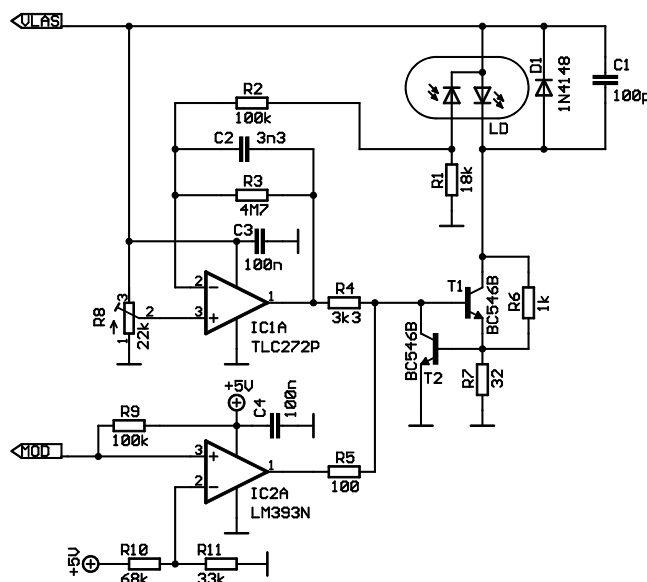
Zapojení vychází z aplikační poznámky firmy Maxim [54]. Jeho základ tvoří IC<sub>1</sub> zapojený jako tzv. *leaky integrator*, tedy invertující integrátor s vybijením zpětnova-



Tab. 2. Měření parametrů laserového modulu F-Laser 1 mW 6 mm

Veličina	Označení	Hodnota
Provozní propustný proud laserové diody	$I_f$ [mA]	19,3
Prahový proud laserové diody	$I_{th}$ [mA]	15,1
Závěrný proud monitorovací fotodiody pro provozní proud	$I_{mon}$ [ $\mu$ A]	287

zebního kondenzátoru rezistorem  $R_3$ . Zapojení se chová jako dolní propust 1. řádu s mezní frekvencí určenou hodnotami  $C_2$  a  $R_3$  [58, str. 348–351] a slouží k vyhodnocení střední hodnoty optického výkonu laserové diody. Na její vstup je přivedeno napětí úměrné optickému výkonu diody, jehož hodnota je dána úbytkem napětí na odporu  $R_1$  způsobená průchodem monitorovacího proudu fotodiody. Napětí na neinvertujícím vstupu  $IC_1$  nastavitelné pomocí trimru  $R_8$  určuje stejnosměrné klidové napětí na výstupu  $IC_1$  a tedy i klidovou polohu pracovního bodu laserové diody.



Obr. 36. Budič laserového modulu - zjednodušené schéma testovacího zapojení

Výstupem  $IC_1$  je buzen tranzistor  $T_1$ ; ten řídí velikost modulační složky proudu laserové diody. Pomocí komparátoru s výstupem s otevřeným kolektorem  $IC_2$  je modulován budící proud  $T_1$  – při vstupním napětí komparátoru nižším než komparační úroveň 1,65 V je výstup komparátoru sepnut proti zemi, díky čemuž je napětí báze  $T_1$  sníženo na úroveň blízkou nule a  $T_1$  se uzavře. Při vstupním napětí komparátoru vyšším než úroveň překlápění je jeho výstupní tranzistor uzavřen a budící proud  $T_1$  jím není ovlivněn.

Protože po přivedení skokového napětí na přechod laserové diody trvá určitou dobu, než dojde k laserové emisi, je vhodné udržovat stálé podprahové předpětí

přechodu diody, které zkracuje dobu spuštění stimulované emise. Tím se zlepšuje rychlost reakce na změny modulačního napětí [48]. V zapojení budiče k tomuto účelu slouží odpor  $R_6$ , který udržuje při uzavření  $T_1$  klidový proud diody na hodnotě přibližně 7 mA.

Zapojení je doplněno o obvod omezující proud tekoucí laserovou diodou na bezpečnou úroveň, který zabrání nárůstu proudu a případnému zničení diody např. při chybném nastavení pracovního bodu nebo při nárůstu teploty diody. Obvod je tvořen tranzistorem  $T_2$  a odporem  $R_7$ . Pokud úbytek napětí na  $R_7$  překročí hodnotu prahového napětí  $U_{BE}$   $T_2$ , tranzistor se začne otevírat a omezuje budicí proud  $T_1$ . S uvedenými hodnotami součástek je maximální hodnota proudu tekoucího laserovou diodou omezena na přibližně 21,8 mA. Další ochranné prvky laserové diody tvoří  $D_1$  a  $C_1$ , sloužící k potlačení napěťových špiček a omezení případného závěrného napětí na přechodu laserové diody. Budič laserové diody je napájen ze zdroje napětí  $V_{LAS} = 9,5$  V s pomalým náběhem napětí při zapnutí, díky čemuž jsou potlačeny přechodové děje při připojení napájecího napětí s možnými destruktivními účinky na přechod laserové diody.

#### 4.2.2.6 Chlazení laseru

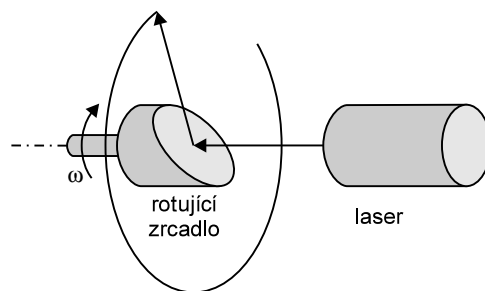
Ačkoli bylo původně počítáno s regulací teploty laserového modulu pomocí Peltierovy termobaterie, při praktických pokusech se zvoleným laserovým modulem bylo ověřeno, že k chlazení postačuje mosazné těleso modulu a přirozená cirkulace vzduchu. Za provozu dochází jen k nepatrnému zvýšení teploty, a to i při kontinuálním režimu bez modulace. Od regulace teploty bylo tudíž v návrhu upuštěno.

#### 4.2.2.7 Rozmítání laserového svazku

Způsob rozmítání laserového svazku je jedním z klíčových problémů návrhu zařízení. Jak již bylo dříve řečeno, pro svoji jednoduchost bylo zvolen mechanický způsob rozmítání s rotujícím zrcadlem. U tohoto způsobu je laserový svazek vychylován odrazem od zrcadla, které má nejčastěji tvar hranolu s mnohaúhelníkovou podstavou. Kvalita hranolového zrcadla je podstatným faktorem pro výsledek scanování. Odchytky od ideální geometrie mohou zapříčinit těžko odstranitelné chyby scanování. S ohledem na poměrně špatnou dostupnost a vysokou cenu sériově vyráběných hranolových zrcadel a vysokou náročnost jeho výroby byla dána přednost scanování šikmým zrcadlem; jedná se o způsob rozmítání paprsku jedinou odraznou plochou se sklonem  $45^\circ$  vůči ose rotace (obr. 37). Díky jednoploškovému rozmítání odpadá řada problémů geometrie zrcadla a možné geometrické vady se redukují na chyby souososti paprsku s osou otáčení, rovinnosti zrcadla a úhlu sklonu zrcadla.

Tento způsob scanování je pro navrhovanou aplikaci výhodný i tím, že lze rozměry zrcadla zmenšit až na několik milimetrů a pro jeho pohon použít motor velmi malých rozměrů.

Při prvotních experimentech bylo ověřováno rozmítání paprsku pomocí několika



Obr. 37. Schéma scanování šikmým zrcadlem

malých stejnosměrných motorů a mikromotorů. U některých typů se ukázala jako významný problém hlučnost. Jiné typy, které z tohoto hlediska vyhověly, nebylo možné provozovat při dostatečně nízkých otáčkách. Z testovaných motorků byl vybrán typ SFF-10KWA [59] Ačkoli jeho nominální otáčky naprázdno dosahují  $20500 \text{ ot.min}^{-1}$ , při dostatečně nízkém napětí se na zkušebním vzorku podařilo dosáhnout požadovaných otáček kolem  $700 \text{ ot.min}^{-1}$ . O něco vhodnější volbou by byl příbuzný a rozměrově podobný typ SFF-K20WA-07130 [60], jehož jmenovité otáčky jsou o 60 % nižší, ten se však nepodařilo v době testování získat.

#### 4.2.2.8 Snímání polohy laserového svazku

Snímání úhlové polohy rozmítaného paprsku má dvojí účel:

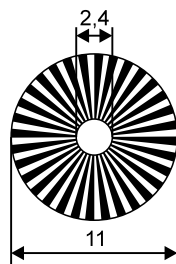
- slouží k určení úhlové polohy pera
- umožňuje synchronizovat rozmítání paprsků obou scannerů.

Pro určení úhlu natočení zrcadla scanneru je možno použít několika metod, např. inkrementálního nebo absolutního optoelektronického snímání úhlové polohy, indukční nebo magnetické snímání otáček nebo kódového snímání polohy na magnetickém principu [21, 61]. Vzhledem k technickým a rozměrovým omezením navrhované aplikace však použitý způsob snímání musí být kompaktní a jednoduchý, proto bylo zvoleno jednoduché inkrementální snímání pomocí rotační clonky přerušující paprsek optoelektronické závory. Clonka je součástí unašeče zrcadla nasazeného na hřídel motoru. Jako optoelektronická závora byla zvolena součástka firmy Omron EE-SX1107 [62]; jedná se o subminiaturní optozávoru s půdorysem  $3 \text{ mm} \times 3,4 \text{ mm}$ .

Vzhledem k malým rozměrům scanneru je limitován i průměr clonky a tím je omezeno i dosažitelné rozlišení polohy zrcadla. Jako rozumné maximum bylo zvoleno rozdělení obvodu clonky na 64 plošek, což odpovídá 32 periodám signálu optozávory na otáčku; šířka plošky v místě snímání odpovídá přibližně šířce štěrbinu optozávory (0,4 mm).

Takto hrubé rozlišení polohy (na aktivní úhel scanování  $90^\circ$  připadá 8 period signálu optozávory) bude muset být interpolováno modulem zpracování signálu. Otázkou ovšem je, jak vysoké přesnosti odečtu polohy paprsku bude dosaženo. Zatímco měření času mezi dvěma hranami signálu optozávory a vlastní interpolace jsou re-

alizovatelné s dostatečnou přesností, limitujícím faktorem by mohla být stabilita úhlové rychlosti motoru a nepřesnosti geometrie scanneru.

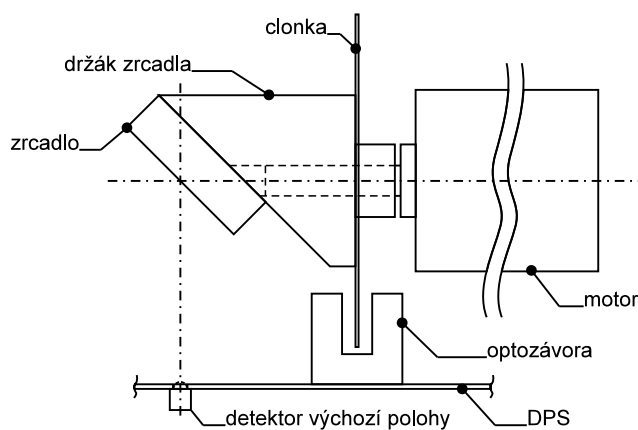


Obr. 38. Clonka pro snímání polohy  
měřítko 2:1

Inkrementální snímač polohy je doplněn snímačem výchozí polohy laserového svazku, který poskytuje informaci o průchodu svazku referenčním bodem. Snímač je tvořen fototranzistorem umístěným v dráze paprsku.

#### 4.2.2.9 Uspořádání mechanických částí scanneru

Uspořádání hlavních mechanických částí scanneru, tj. sestavu motoru s držákem zrcadla, vlastním zrcadlem, clonkou a snímačem otáček ukazuje schematicky obr. 39.



Obr. 39. Sestava motoru s držákem zrcadla a clonkou  
měřítko 4:1

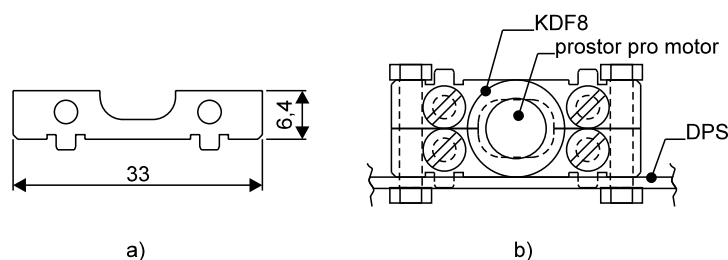
Obrázek prozatím nezachycuje způsob montáže motoru k desce plošného spoje. Vhodný držák motoru musí zajistit jeho dostatečně pevné a spolehlivé uchycení, na druhé straně ovšem musí zabránit nežádoucímu přenášení vibrací motoru a nevyvážených rotujících částí na ostatní části zařízení, zejména na vlastní plochu tabule, kde by se mohly projevit slyšitelným rušivým hlukem.

Při hledání vhodného řešení byly pro upevnění motoru zvoleného typu s úspěchem vyzkoušeny kabelové průchodky prodávané pod označením *KDF08*; motor lze vložit s malou vůlí do dvojice průchodek, jak ukazuje obr. 40.



Obr. 40. Motor SFF-K10WA uložený ve dvojici průchodek KDF8

Rozměry průchodky umožňují její vsazení do otvoru v desce tloušťky 1,5 mm. Myšlenka uchycení motoru tedy předpokládá pro dvě průchodky použití dvou rovnoběžných destiček vzdálených 4 mm. Pro snadnou montáž a možnost seřízení vůle uchycení je každá z destiček rozdělena na dvě poloviny, čímž vznikne tvar třmenu. Navržený tvar destičky a sestavu držáku ukazuje obr. 41.



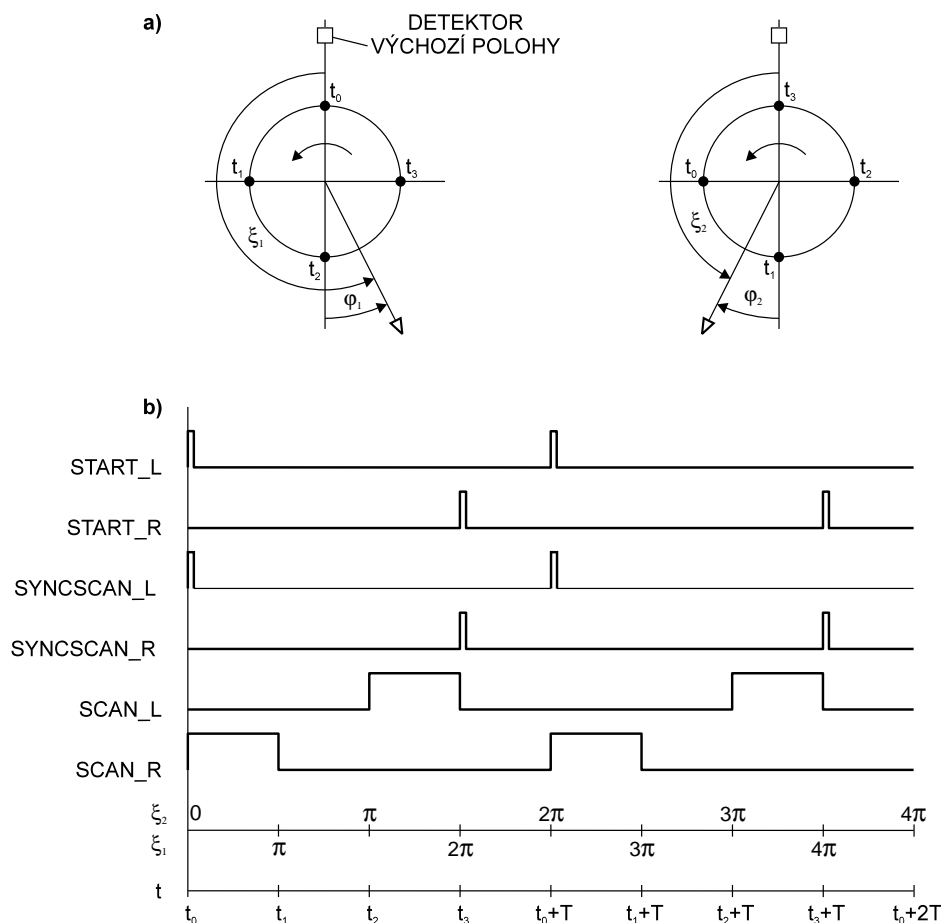
Obr. 41. Držák motoru  
a) destička držáku b) sestava držáku

K montáži laseru bylo využito držáku pojistek o průměru 5 mm. Držák dostupný pod označením *SHH-2* je určen pro zapájení do plošného spoje a díky pružnosti materiálu lze do něj laserový modul o průměru 6 mm bez potíží vložit. Pomocí dvojice pojistkových držáků je takto možno vytvořit jednoduchý a levný, ale zcela vyhovující způsob montáže laseru do DPS. Pojistkové držáky navíc tvoří chladičí křídélka, která napomáhají odvodu ztrátového tepelného výkonu laseru.

#### 4.2.2.10 Řízení a synchronizace scannerů

Motor scanneru bude řízen mikrokontrolérem pomocí pulzně šířkové modulace (PWM). Otáčky motorů obou scannerů budou synchronizovány signály časové základny modulu zpracování dat a řízení, které budou generovány pro oba scannery

s vhodným fázovým posunutím. Úkolem mikrokontroléru řídicího chodu motorů je zajistit buzení motoru s takovou střídou, aby fáze synchronizačního signálu /SYN-CSCAN z časové základny a fáze signálu detektoru výchozí polohy /START byly v ideálním případě shodné, tedy aby sestupné hrany obou signálů nastávaly současně nebo jen s minimálním časovým rozdílem. Průběhy synchronizačních signálů ukazuje obr. 42<sup>13</sup>.



Obr. 42. Synchronizace rozmítání laserových paprsků

a) definice úhlů natočení pro levý a pravý scanner

b) simulace průběhů synchronizačních signálů

Jako mikrokontrolér byl zvolen typ ATtiny13 z rodiny AVR firmy Atmel [63]. Jde o osmibitový mikrořadič s redukovanou instrukční sadou v kompaktním osmivývodovém pouzdře s vestavěným RC oscilátorem. Mikrokontrolér umožňuje hardwarové generování PWM signálu; díky možnosti generování přerušování při změně úrovně na vstupních portech je možná jednoduchá obsluha vnějších událostí.

<sup>13</sup>V diagramu jsou pro přehlednost jsou signály zobrazeny v pozitivní logice, tj. aktivní v log. 1, ačkoli skutečné signály budou inverzní, tedy aktivní v log. 0.

#### 4.2.2.11 Konečné obvodové řešení modulu scanneru

Návrh obvodového řešení modulu scanneru v konečné podobě ukazuje obr. 61 v příloze A. Obvody budiče laseru jsou upraveny pro realizaci pomocí součástek pro povrchovou montáž, pro modulace budičím proudem tranzistoru řídicího proud laserové diody je namísto komparátoru použit tranzistor T4. Na rozdíl od testovací verze budiče, kde byl používán modulační signál o frekvenci 10 kHz, bylo nutno přizpůsobit použité součástky o řád vyššímu modulačnímu kmitočtu; jako řídicí operační zesilovač budiče je proto použit rychlý OZ typu CA3130.

Stabilizátor napájení budiče laseru s pomalým náběhem napětí je tvořen obvodem IC4. Pozvolný nárůst napětí zajišťuje kondenzátor C<sub>3</sub> ve zpětnovazebním obvodu regulátoru napětí. Další napájecí obvody modulu tvoří IC<sub>3</sub>, stabilizátor napětí V<sub>CC</sub> (5 V pro napájení IC<sub>1</sub> a IC<sub>6</sub>), a IC<sub>5</sub>, kterým je stabilizováno oddělené napájecí napětí V<sub>MOT</sub> pro motor.

Řízení motoru zajišťuje mikrokontrolér IC<sub>1</sub>. Jeho PWM výstup PB0 budí tranzistor T<sub>1</sub>, který spíná proud tekoucí motorem. Mikrokontrolér může být programován pomocí konektoru K<sub>2</sub>. Protože výstup PB0 slouží zároveň jako signál MOSI pro programování mikrokontroléru, je možné nežádoucímu buzení motoru při připojení napájecím napětí při programování zamezit rozpojením propojky JP<sub>1</sub>. Pro účely ladění, případně indikace provozních stavů (ztráta synchronizace ap.) je k portu PB2 připojena LED D<sub>2</sub>.

Obvody snímání výchozí polohy paprsku a otáček motoru tvoří fototranzistor T<sub>5</sub>, optozávora O<sub>1</sub> spolu s odpory R<sub>18</sub>, R<sub>19</sub> a R<sub>20</sub>.

Inventory IC<sub>6D</sub> a IC<sub>6E</sub> se Schmittovými klopnými obvody na vstupu slouží k tvarování modulačního a synchronizačního signálu přivedeného na desku dlouhým vedením. Inventory IC<sub>6F</sub> a IC<sub>6C</sub> budí výstupní linky \*START a \*SCANCLK (signály detektoru výchozí polohy a snímače otáček motoru).

#### 4.2.3 Fotodetektor

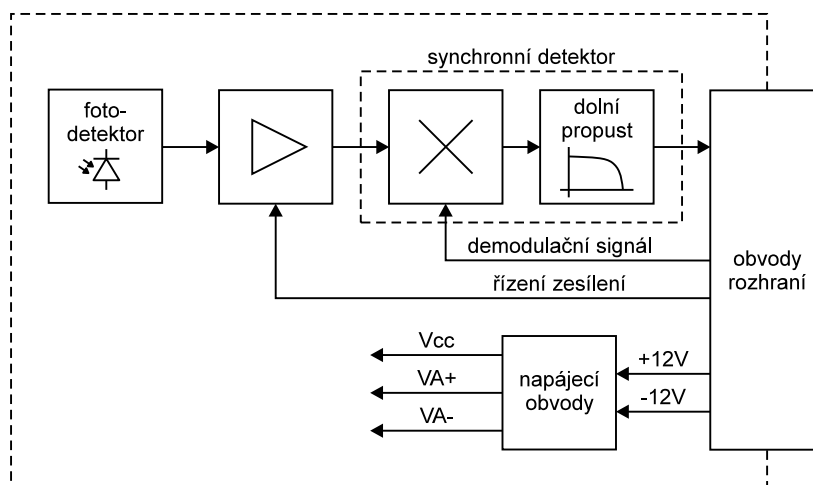
Účelem modulu fotodetektoru je zachytit modulované světlené záření laseru odražené od snímaného objektu, pomocí fotodetekčního prvku přeměnit záření na elektrický signál, potlačit nežádoucí rušivé složky signálu a zesílit jej na úroveň vhodnou k dalšímu zpracování. Zesílený signál bude usměrněn v obvodech synchronní detekce.

Hlavní části modulu fotodetektoru budou tedy tvořit:

- fotodetekční prvek
- zesilovač signálu fotodetekčního prvku
- synchronní detektor
- obvody rozhraní
- napájecí obvody

##### 4.2.3.1 Blokové schéma

Obr. 43 ukazuje blokové schéma elektronické části modulu fotodetektoru.



Obr. 43. Modul fotodetektoru - blokové schéma

#### 4.2.3.2 Fotodetekční prvek

V detektoru optického záření dochází absorbcí optického záření ke změně jeho fyzikálního stavu, např. k uvolnění nosičů náboje [16, str. 55]. Z mnoha druhů známých detektorů záření přicházejí v daném případě v úvahu pouze pevnolátkové fotoelektrické detektory, mezi které patří zejména fotodiody, PIN fotodiody, lavinové fotodiody, fototranzistory a fotoodpory. Fotoodpory nevyhovují pro velmi pomalou odezvu; lavinové fotodiody jsou nejméně citlivější z pevnolátkových fotodetektorů – jejich převodní konstanta (spektrální citlivost) dosahuje až  $120 \text{ AW}^{-1}$  oproti  $(0,1 \div 0,6) \text{ AW}^{-1}$  u běžných křemíkových fotodiody [64]. Vyžadují však značně vysoké závěrné napětí (až v řádu  $10^2 \text{ V}$ ) a jsou poměrně nákladné. Ze zbývajících možností se jako nejvhodnější jeví PIN fotodiody. Jejich konstrukce je založena na polovodičovém přechodu se strukturou PIN, u které jsou silně dotované oblasti P a N odděleny tenkou izolační intrinsickou vrstvou I (ve skutečnosti slabě dotovanou oblastí N). Díky tomu dioda pracuje s vysokou intenzitou elektrického pole v oblasti přechodu, nosiče náboje vnikající absorbcí záření jsou tak silně urychlovány směrem k elektrodám, což omezuje jejich nežádoucí rekombinaci. PIN fotodiody se vyznačují velkou kvantovou účinností a rychlou odezvou [16]. Rychlost odezvy umožňuje zpracování signálů s frekvencemi až  $2 \text{ GHz}$  [64].

Při testech byla s dobrými výsledky použita PIN fotodiody typu BPW34 [26] a byla zvolena i pro finální řešení fotodetektoru. Dioda má relativně velkou citlivou plochu  $7,5 \text{ mm}^2$ , široký úhel poloviční citlivosti  $65^\circ$  a vysokou citlivost na pracovní vlnové délce  $S_{650 \text{ nm}} = 0,4 \text{ AW}^{-1}$ .

#### 4.2.3.3 Optická soustava

Optická soustava fotodetektoru, tedy objektiv zobrazující snímanou scénu na citlivou plochu fotodetektoru, je do značné míry problematickou částí návrhu. Pro co



největší využití energie záření odraženého od snímaného objektu by bylo vhodné použít objektiv velkého průměru, což je ovšem protikladný požadavek k požadavku kompaktního řešení. Jako přijatelný kompromis by mohl být akceptován objektiv průměru nepřesahující přibližně 30 mm. Alternativně by bylo možné použít dosáhnout velké plochy objektivu při zachování kompaktních rozměrů použitím cylindrické čočky namísto sférické, neboť jednorozměrný charakter snímání scény v daném uspořádání vyžaduje velkou šířku zorného pole a výhodná je naopak jeho malá výška. Vhodné optické díly jsou však těžko dostupné a pro účely realizovaného projektu přichází jejich použití ztěžív v úvahu.

Běžně dostupné a cenově přijatelné optické díly, které by mohly být použity ke konstrukci optické části fotodetektoru, jako jsou brýlové čočky nebo lupy, nejsou bohužel svými vlastnostmi pro danou aplikaci příliš vhodné, především pro velkou ohniskovou vzdálenost (v poměru k rozměru fotodetektoru), která neumožňuje dosažení potřebné šířky zorného pole.

Jistou možností řešení skýtají čočky vyráběné pro různé speciální aplikace. Jednou z nich je čočka určená pro optické detektory a přijímače RTX-LI 16 [65]. Čočka má průměr 16 mm, ohniskovou vzdálenost 8,5 mm a je vyrobena z čírého polykarbonátu, propustnost čočky je 0,88. Relativně malý průměr čočky je sice nevýhodný z hlediska množství zachyceného záření, na druhou stranu je díky němu snadnější pokrýt potřebné zorné pole více čočkami s různými úhly natočení.

Protože vhodnější komponenty pro realizaci optické části fotodetektoru se nepodařilo během fáze návrhu získat, bylo rozhodnuto použít tento typ čočky.



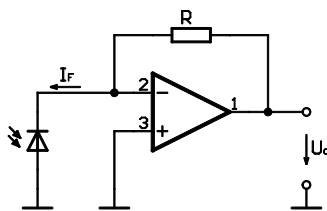
Obr. 44. Čočka RTX-LI 16  
převzato z [65]

#### 4.2.3.4 Zesilovač fotodiody

Zesilovač fotodiody musí:

- zajistit dostatečné zesílení proudu fotodiody
- umožnit řízení zisku pro vyrovnání rozdílů v ozáření fotodiody pro různé vzdálenosti pera
- potlačit nežádoucí spektrální složky signálu fotodiody (zejména stejnosměrnou složku a kmitočet 100 Hz pocházející od umělých světelných zdrojů)

Pro zesilování proudu fotodiody se obvykle používají operační zesilovače v zapojení *transimpedančního zesilovače*, tedy zdroje napětí řízeného proudem (převodníku proud – napětí) [30, 66]. Princip zapojení ukazuje obr. 45.



Obr. 45. Transimpedanční zesilovač fotodiody

Fotodioda je zapojena nakrátko, kdy se chová jako zdroj proudu lineárně řízený osvětlením. Pro naznačenou orientaci proudu fotodiody bude napětí na výstupu zesilovače

$$U_o = RI_F . \quad (40)$$

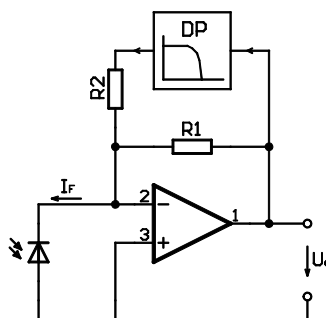
Pro zlepšení rychlosti odezvy by bylo možné fotodiodu provozovat se závěrným předpětím; díky němu dojde k rozšíření oblasti prostorového náboje a tím i snížení kapacity diody. Nevýhodou toho řešení je však skutečnost, že šum zdroje závěrného předpětí je zesilován spolu s užitečným signálem, musí být tedy použit nízkošumový zdroj napětí. V návrhu zapojení nebylo tohoto řešení prozatím využito, je však možnou cestou ke zvýšení rychlosti fotodetektoru např. při budoucím zvýšení modulační rychlosti. Příklady zapojení lze nalézt např. v [67].

Pro potlačení stejnosměrného osvětlení pozadí, je obecně možné použít několika přístupů, jako např. použití zesilovače se střídavou vazbou, zesilování rozdílového proudu dvou fotodiód, z nichž jednou je snímán pouze jas pozadí a druhou úplný jas scény, použití úzkopásmových rezonančních zesilovačů naladěných na modulační kmitočet užitečného signálu a další techniky. V případě, kdy je užitečný signál v porovnání se signálem pozadí mnohem slabší, je však třeba brát v úvahu možnost saturace zesilovače signálem pozadí. Jednoduchý a účinný způsob řešení nabízí metoda zpětnovazebního potlačení signálu pozadí [29, 68]. Její princip spočívá v zavedení signálu odpovídajícího stejnosměrné složce jasu scény do invertujícího vstupu transimpedančního zesilovače. Tento signál je možné získat integrací z výstupu transimpedančního zesilovače. Situaci ukazuje schematicky obr. 46

Použité řešení vychází z aplikační poznámky [68], která uvádí příklad zapojení a návrhové vztahy pro výpočet hodnot součástek.

#### 4.2.3.5 Řízení zesílení

Úroveň signálu předzesíleného transimpedančním zesilovačem musí být upravena tak, aby i za potenciálně velmi rozdílných světelných podmínek umožňovala konverzi do digitální podoby a následné zpracování. Součástí zesilovače bude muset být i stupeň s proměnným zesílením. Pro řízení zesílení přicházejí v úvahu v zásadě dva možné způsoby realizace:

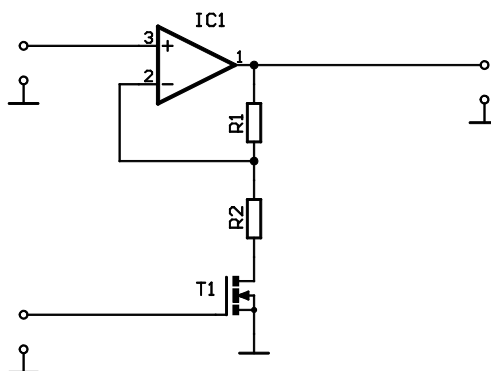


Obr. 46. Transimpedanční zesilovač s potlačením signálu pozadí

- číslicové řízení – mikrokontrolérem na základě výstupního signálu synchronního detektoru, příp. na základě odhadu polohy pera
- analogové řízení – obvodem automatického řízení zisku (AGC) na základě výstupního signálu zesilovače fotodiody nebo synchronního detektoru.

Každé z řešení má svoje výhody i nevýhody. Obvod automatického řízení zisku poskytuje výhodu plynulého řízení; jeho realizace pro velký dynamický rozsah při velké šířce přenášeného pásma ovšem může vést na poněkud složitější obvodové řešení. Nevýhodou číslicového řízení je nutnost programové obsluhy a kvantizace úrovně zesílení, výhodná je však pružnost algoritmu řízení a obvodová jednoduchost.

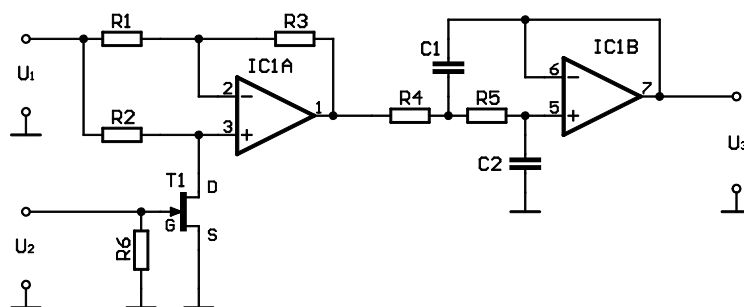
Různá řešení obvodů s řízeným přenosem uvádí např. [58, 69] a další prameny; k dispozici jsou i integrovaná řešení např. v podobě zesilovačů s programovatelným nebo nastavitelným zesílením, např. [70]. Pro účely prototypu navrhovaného zařízení je však možno spokojit se s jednoduchým řešením umožňujícím mikroprocesorem řízenou skokovou změnu zesílení v několika málo diskrétních krocích. Zapojení na obr. 47 ukazuje jedno z možných řešení dvouhodnotového přepínání zisku. Kaskádním řazením několika stupňů je pak možné realizovat jednoduché více krokové řízení zisku.



Obr. 47. Zesilovač s přepínatelným zesílením

#### 4.2.3.6 Synchronní detektor

Obecné schéma synchronního detektoru a princip jeho funkce byly ukázány v odst. 3.3.2.6. Příkladem konkrétního zapojení synchronního detektoru může být zapojení na obr. 48 – spínačový detektor s operačními zesilovači. Jeho jádrem je zesilovač se skokově přepínaným zesílením  $\pm 1$  tvořený  $IC_{1A}$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_6$  a  $T_1$ . Rozbor jeho funkce lze nalézt např. v [58, str. 256–257, 261–262]. Vstupní signál  $U_1$  je modulován referenčním signálem  $U_2$ . Ze směsi kmitočtů vzniklých modulací jsou následující aktivní dolní propustí 2. řádu [58, str. 351–356] odfiltrovány nežádoucí části spektra. Na výstupu je při shodě fáze detekovaného a referenčního signálu napětí  $U_3$  přímo úměrné amplitudě detekovaného signálu.



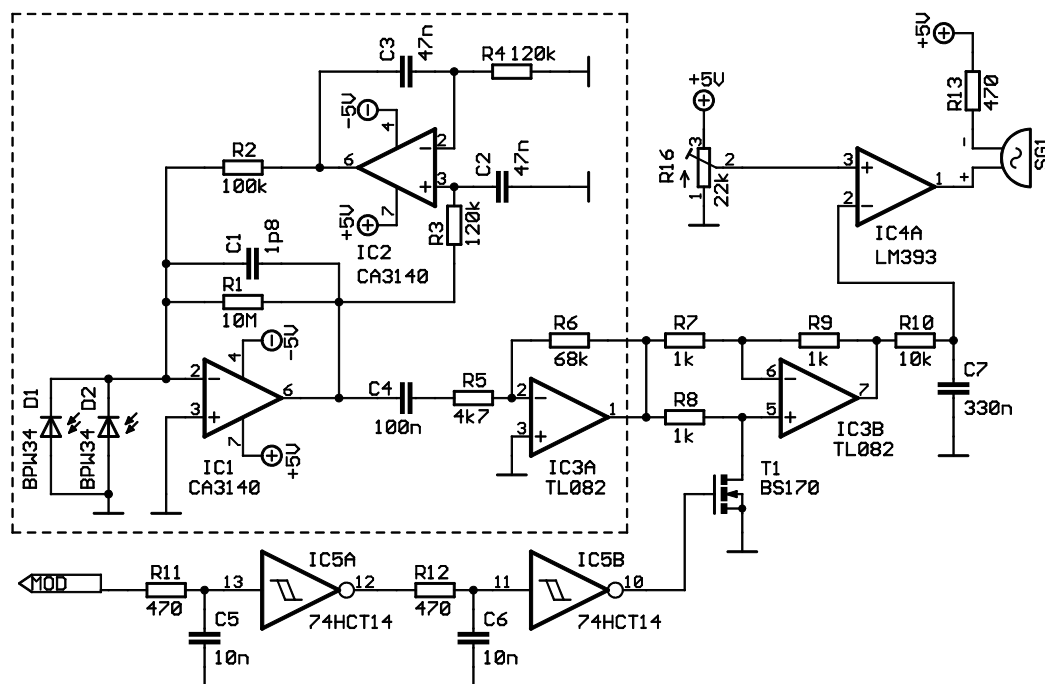
Obr. 48. Aktivní spínačový detektor s OZ  
převzato z [30, str. 164] (upraveno)

#### 4.2.3.7 Ověření funkce fotodetektoru

Návrhu zapojení modulu fotodetektoru v konečné podobě přecházelo ověření koncepce obvodového řešení a praktické použitelnosti na testovacím prototypu. Ověřovací zapojení fotodetektoru ve zjednodušené podobě ukazuje obr. 49. Pro přehlednost nejsou ve schématu zobrazeny napájecí obvody a blokovací kondenzátory napájení operačních zesilovačů.

Dvojice fotodiod na vstupu obvodu byla opatřena čočkou RTX-LI 16. Fotodiody byly umístěny blízko sebe přibližně 3 mm před ohniskem čočky. Tím byla umožněna detekce záření v širokém zorném úhlu.

Prototyp byl testován ve spojení s pokusným budičem laseru (odst. 4.2.2.5). Pro ověření byla zvolena použita modulační frekvence 10 kHz, aby byly pro první testy zjednodušeny podmínky a eliminovány možné nepříznivé vlivy vysokých kmitočtů na chování obvodových prvků; později byly provedeny rovněž testy s frekvencí 40 kHz. Ze společného zdroje modulačního kmitočtu byl napájen budič laseru i fotodetektor; na straně fotodetektoru byl použit obvod doladující posuv fáze přijímaného a referenčního signálu tvořený RC články a invertory se Schmittovými klopnými obvody na vstupu. Výstup synchronního detektoru byl přiveden na vstup komparátoru s komparační úrovní nastavitelnou trimrem.



Obr. 49. Zapojení ověřovacího prototypu fotodetektoru

Při testování byly zkoumány průběhy signálů ve významných bodech obvodu; hlavním cílem testů však bylo ověřování schopnosti dvohodnotového rozlišení jasu povrchu (černá/bílá) osvětleného dopadajícím laserovým svazkem v různých vzdálenostech a odklonech od optické osy čočky.

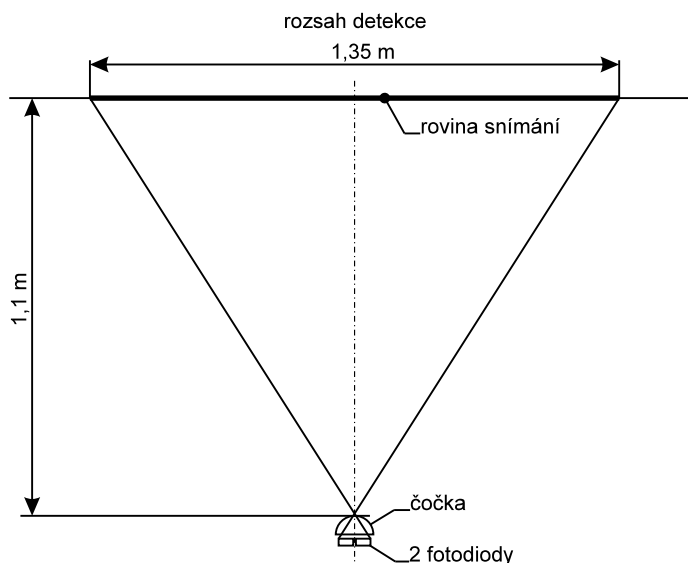
Testy potvrdily předpokládanou nutnost stínění vstupní části obvodu; při provozu bez stínění pronikala modulační frekvence do obvodu i při úplném zastínění fotodiod a znehodnocovala měření.

Výsledky testování byly poměrně slibné – při pečlivém nastavení komparační úrovně byl detektor schopen rozlišit bílý difúzní povrch od černého ve směru optické osy na vzdálenost 4,8 m. Při snímání roviny vzdálené 1,1 m od čočky detektoru byla zjištěna schopnost rozlišení odrazivosti povrchu v úhlu přibližně  $\pm 31^\circ$  od optické osy (obr. 50) .

#### 4.2.3.8 Konečné obvodové řešení fotodetektoru

Konečný návrh obvodového řešení modulu fotodetektoru je na obr. 62 v příloze A.

Součástky byly voleny tak, aby vyhovovaly funkčním požadavkům, ale aby bylo dosaženo co nejnižších nákladů. Přenášená frekvence přes 100 kHz již přináší určité nároky na použité operační zesilovače a jejich šířku pásma a rychlost přeběhu. V zapojení bylo na pozicích IC<sub>1</sub>, IC<sub>3</sub> a IC<sub>4</sub>, kde je vzhledem k vysokému zesílení nutná velká šířka pásma, použito typu LF357 (šířka pásma 20 MHz, rychlost přeběhu  $50 \text{ V}\mu\text{s}^{-1}$ ). Jako integrátor IC<sub>2</sub> nelze LF357 použít pro možnou nestabilitu na vyšších frekvencích.



Obr. 50. Testování zorného úhlu prototypu fotodetektoru

cích, kdy by příliš velký přenos zpětné vazby způsoboval pokles zisku pod hodnotu 5 a tím (následkem podkorigování OZ) oscilace; jako IC<sub>2</sub> byl zvolen typ CA3140. Pro funkci spínačového detektoru IC<sub>5B</sub>, sledovačů IC<sub>5A</sub>, IC<sub>6B</sub> a dolní propusti IC<sub>6A</sub>, kde je nutná kompenzace pro zisk 1 a nároky na šířku pásma jsou vzhledem k malému zesílení nižší, je použit typ NE5532 (šířka pásma 10 MHz, rychlost přeběhu 9 V $\mu$ s<sup>-1</sup>).

Modulační frekvence zpracovávaného signálu je o řád vyšší než v případě ověřovacího zapojení, proto byla šířka pásma přenášená transimpedančním zesilovačem zvětšena snížením hodnoty zpětnovazební odporu R<sub>1</sub> na 1 M $\Omega$ . Dolní mezní kmitočet transimpedančního zesilovače s integrátorem ve zpětné vazbě pro R<sub>2</sub> = R<sub>3</sub> = R a C<sub>2</sub> = C<sub>3</sub> = C je roven [68]:

$$f_o = \frac{R_1}{2\pi R_4 RC} \cdot \quad (41)$$

Hodnota mezního kmitočtu byla zvolena 10 kHz, aby byla účinně potlačena frekvence 100 Hz a stejnosměrná složka signálu, ale aby nebyl ovlivněn přenos modulační frekvence. Volbou hodnot součástek C<sub>2</sub> = C<sub>3</sub> = 10 nF, R<sub>2</sub> = R<sub>3</sub> = 68 k $\Omega$  a R<sub>4</sub> = 22 k $\Omega$  je skutečná hodnota mezního kmitočtu dána jako

$$f_o = \frac{10^6}{6,283 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 6,8 \cdot 10^4 \cdot 10^{-8}} \text{ Hz} \cong 10639 \text{ Hz} \cdot \quad (42)$$

IC<sub>3</sub> a IC<sub>4</sub> tvoří zesilovač s přepínatelným zesílením. Odporů R<sub>6</sub>, R<sub>7</sub> a R<sub>10</sub> určují zesílení prvního stupně; Odpovídajícími kombinacemi stavů signálů \*GAIN\_0

a \*GAIN\_1 je tak možné nastavit zisk 0 dB, 9,5 dB, 14, 4 dB a 24 db vzhledem k výchozí úrovni. Pomocí  $R_7$  a  $R_9$  je nastaveno minimální zesílení každého stupně; při použití LF357 nesmí bez dodatečných korekcí na vstupu pro zachování stability zisk klesnout pod 5, minimální zesílení obou stupňů bylo zvoleno  $A_u = 6$ . Použití podkorigovaného OZ typu LF357 není pro zesilovač s přepínaným ziskem ideální, ovšem toto řešení pro účely ověření funkce prototypu vycházelo z dostupné součástkové základny a není chápáno jako definitivní. Během dalšího vývoje se předpokládá přepracování zesilovače a použití zesilovače s programovatelným ziskem v integrované podobě.

Synchronní spínačový detektor tvoří oddělovač IC5A, modulačním zesilovačem ( $IC_{5B}$ ,  $T_3$ ,  $R_{12}$ ,  $R_{13}$ ,  $R_{14}$ ) a dolní proustí ( $IC_{6A}$ ,  $R_{15}$ ,  $R_{16}$ ,  $C_5$ ,  $C_6$ ). Dolní propust je navržena jako Butterworthova DP 2. řádu [58, str. 355]. Za podmínky  $C_5 = 2C_6 = C$ ,  $R_{15} = R_{16} = R$  pro horní mezní kmitočet propusti platí

$$f_o = \frac{\sqrt{2}}{2\pi RC} \quad (43)$$

Volba mezního kmitočtu vychází z hodnoty maximální obrazové frekvence určené výpočtem (22) v analytické části práce jako 4710 Hz. Dolní mezní kmitočet propusti byl zvolen mírně vyšší, aby přenos obrazové frekvence nebyl propustí příliš ovlivněn, a to jako  $f_o = 6$  kHz. Hodnoty odporů byly zvoleny jako  $R = R_{15} = R_{16} = 15$  k $\Omega$ ; hodnoty kondenzátorů je pak možno určit jako:

$$C_5 = \frac{\sqrt{2}}{2\pi R f_o} = \frac{1,414}{6,283.1,5 \cdot 10^4 \cdot 6 \cdot 10^3} \text{F} \cong 2,5 \text{ nF} \quad (44)$$

$$C_6 = \frac{1}{2} C_5 \cong 1,25 \text{ nF} . \quad (45)$$

Jako skutečné hodnoty kondenzátorů byly zvoleny nejbližší vyráběné hodnoty ( $C_5 = 2,7$  nF,  $C_6 = 1,2$  nF).

Napájecí obvody tvoří IC<sub>8</sub>, IC<sub>9</sub> a IC<sub>10</sub>; napájecí napětí pro tvarovač IC<sub>7</sub> je odděleno od analogových napájecích větví VA+ a VA-.

## 5 Realizace

### 5.1 Výroba speciálních dílů a jejich kompletace

Zvláštní díly tvořící součást modulu scanneru byly vyrobeny ve spolupráci s externími dodavateli. Držáky zrcadel byly vyrobeny na zakázku u firmy zabývající se jemnou mechanikou, zhotovení zrcadel scanneru bylo zadáno firmě specializované na výrobu optických dílů. Clonky snímače otáček motoru byly vytvořeny osvitem příslušného motivu převedeného do formátu Postscript na osvitové jednotce a ručním vystřížením do požadovaného tvaru. Díly držáku motoru byly vyrobeny frézováním z materiálu FR4 u výrobce desek plošných spojů.

Kvalita vyrobených dílů byla dobrá s jedinou výjimkou - ukázalo se, že středový otvor vyrobených držáků zrcadel nemá dostatečnou vůli pro nasazení na hřídelku motorku a navíc je mírně kónický. Průměr otvoru proto musel upraven v improvizovaných podmínkách pomocí vrtáčku a minivrtáčky, ovšem vzhledem k miniaturním rozměrům a měkkosti materiálu držáku došlo u jednoho držáku k mírnému, přesto však patrnému vychýlení osy středového otvoru vůči vlastnímu tělesu držáku. Problém byl při kompletaci sestavy motorku částečně kompenzován převrtáním a přitmělením držáku v poloze co nejvíce se blížíící správné.

### 5.2 Výroba desek plošných spojů a jejich osazení

Vzhledem k technologické náročnosti desek plošných spojů scanneru a desky zpracování signálu (oboustranný návrh, prokovené otvory) byla jejich výroba zadána specializovaným firmám<sup>14</sup>. Z motivů DPS jednotlivých modulů byly v CAD systému Eagle vygenerovány výrobní podklady ve formátu Gerber RS274-X a Excellon. Při zadávání desky zpracování signálu byl na základě připomínek výrobce návrh desky přizpůsoben technologickým možnostem výroby – tzv. rozlitá měď na obou stranách desky byla odstraněna a propojení signálu GND bylo provedeno běžnými vodivými cestami. Tím byl návrh desky poněkud degradován z hlediska elektromagnetické kompatibility; vzhledem k přítomnosti několika zdrojů vf kmitočtů na desce (kmitočtová základna, USB rozhraní, oscilátor mikrokontroléru, spínaný zdroj -12 V) a smíšenému návrhu s digitálními a analogovými obvody by příznivý vliv rozlité mědi byl velmi žádoucí; jiné uspokojivé řešení zachovávající původní návrh a zároveň splňující požadavky na termín zhotovení a cenu desky se však nepodařilo nalézt.

Desky plošných spojů scannerů a modulu zpracování řízení byly osazeny ručně; zvláštní péče byla věnována přesnému umístění a dokonalému pájení v případě mikrokontroléru a USB rozhraní na desce zpracování signálu a řízení (IC<sub>1</sub>, IC<sub>2</sub>) s ohledem na jejich pouzdra s roztečí vývodů 0,5 mm a zvýšenou možnost výskytu problémů se zkraty sousedních vývodů nebo nedokonalé zapájení vývodů.

<sup>14</sup>Z důvodu omezení výrobních kapacit na straně oslovených výrobců byla zakázka rozdělena mezi dvě firmy.



Prototyp modulu fotodetektoru byl realizován na univerzální desce plošných spojů. Opodstatněnost rozhodnutí upustit prozatím od definitivního návrhu plošného spoje se potvrdila při oživování zapojení, které si vynutilo četné zásahy do zapojení, rozložení součástek a úpravy hodnot některých součástek. Návrh zařízení počítá se dvěma fotodetektory, pro první ověření funkce však byl postaven jeden fotodetektor, který je pro základní zkoušky funkčnosti a případné úpravy návrhu dostačující.

Rozměry univerzální desky byly zvoleny tak, aby umožňovaly začlenění do modulární stavebnicové sestavy zařízení. Vstupní část zahrnující IC<sub>1</sub> až IC<sub>4</sub> a jejich okolí byla opatřena stíněním v podobě krabičky z pocínovaného plechu o půdorysu 31 mm × 46 mm. Fotodiody byly připájeny na zvláštní destičku, tvořící horní víko stínící krabičky. Destička byla rozdělena na dvě poloviny, aby bylo možné individuálně orientovat každou dvojici diod. Každá dvojice fotodiod byla opatřena čočkou RTX-LI 16; k upevnění čoček k destičce fotodiod bylo v prototypu použito oboustranné lepicí pásky.

## 5.3 Oživení

### 5.3.1 Modul zpracování signálu a řízení

Deska vzhledem k její složitosti ožívována postupně během osazování, aby případné chyby návrhu nebo osazení byly včas odhaleny.

Nejprve byla kontrolována funkce napájecích obvodů po osazení IC<sub>13</sub>, IC<sub>14</sub>, IC<sub>15</sub> a IC<sub>16</sub> a jejich okolí. Napájecí větve V<sub>CC</sub>, +3V3 a VA+ byly shledány funkčními bez problémů, byla však zjištěna chybná funkce spínaného zdroje generujícího záporné napětí -12V. Výstupní napětí po zapnutí se ustálilo na přibližné hodnotě -2,4 V, při zvýšení odběru proudu se velikost napětí rozkolísala a po krátké době provozu docházelo k jeho poklesu až k -25 V. Měření signálů na vývodech IC<sub>16</sub> ukázalo neočekávané průběhy signálů; napětí na časovacím kondenzátoru oscilátoru (vývod 3 obvodu IC<sub>16</sub>) mělo nepravidelný průběh s nahodilými sledy zákmitů. To ukazovalo na pravděpodobnou chybu v zapojení, ovšem porovnáním desky se zapojením dle pramene [45], ze kterého bylo obvodové řešení zdroje převzato, byla potvrzena shoda obou zapojení. Dalším rozbohem bylo zjištěno, že použité zapojení je skutečně chybné. Chyba byla převzata z původního pramene a spočívá v připojení uzlu spojujícího vývod 4 obvodu IC<sub>16</sub>, odpor R<sub>26</sub> a časovací kondenzátor oscilátoru C<sub>17</sub> ke katodě D<sub>10</sub> namísto anody D<sub>10</sub>. Správná funkce je IC<sub>16</sub> je tím v původním zapojení znemožněna; zpětnovazebním děličem R<sub>25</sub>, R<sub>26</sub> není snímána velikost výstupního napětí, ale velikost napětí na tlumivce L<sub>1</sub>. Obvod IC<sub>16</sub> je navíc napájen pulzujícím napětím namísto konstatního napětím o přibližné velikosti 24V mezi vývody 6 a 4. Porovnáním s dalšími prameny [71, 72] bylo podezření na chybu potvrzeno. Po opravě chyby byla shledána funkce zdroje záporného napětí bezproblémovou. Ačkoli se změřená hodnota výstupního napětí 11,4 V mírně odchyluje od nominální hodnoty, což je patrně způsobeno odchylkami skutečných a ideálních hodnot součástek,

není tento rozdíl na závadu, protože záporné napětí je dále stabilizováno napájecími obvody modulů, na kterých je použito.

Dále byla ověřena funkce časové základny (obvody IC<sub>3</sub> až IC<sub>6</sub> a jejich okolí). Při kontrole průběhu signálů byla nalezena logická chyba v návrhu generátoru synchronizačních impulsů scannerů; kruhový posuvný registr tvořený obvodem IC<sub>5</sub> a IC<sub>6B</sub> má v návrhu délku devět stupňů namísto osmi; chyba byla opravena přepojením vstupu D klopného obvodu IC<sub>6B</sub> na výstup QG obvodu IC<sub>5</sub> namísto původního výstupu QH.

V další fázi ožívání byla testována funkce mikrokontroléru a rozhraní USB. Funkčnost komunikačního rozhraní byla otestována pomocí programu LPC2000 Flash Utility, umožňujícího programování mikrokontrolérů rodiny LPC2XXX v cílovém systému pomocí sériového rozhraní (zde konvertovaného na rozhraní USB obvodem IC<sub>2</sub>). Další testy ověřily pomocí jednoduchých jednoúčelových testovacích firmwarů funkčnost mikrokontroléru a jeho periférií (sériové rozhraní, A/D převodník, ovládání indikační LED, hradlování signálů časové základny).

### 5.3.2 Modul scanneru

Obdobně jako v případě modulu zpracování signálu a řízení byla deska ožívána postupně během osazování. Nejprve byla zkontrolována funkce napájecích obvodů poskytujících napětí  $V_{CC}$ ,  $V_{MOT}$  a  $V_{LAS}$ . Poté byla zkontrolována funkce budiče laserového modulu a nastaven pracovní bod laserové diody trimrem R<sub>12</sub> tak, aby při nepřítomnosti modulačního signálu pracoval laser pod těsně hranicí aktivace ochranného omezovače proudu. Po osazení mikrokontroléru řízení motoru IC<sub>1</sub> byla otestována možnost jeho programování prostřednictvím ISP rozhraní K<sub>2</sub>. Jednoduchým testovacím firmwarem byla ověřena správná funkce výstupu pulzně-šířkové modulace, indikační LED a vstupů pro synchronizaci otáček a snímání polohy rotoru.

Po montáži sestavy motoru s držákem zrcadla a clonkou byla testována stabilizace otáček a jejich synchronizace se signálem \*SYNCSCAN. Během testů se ukázalo se jako nezbytné zvětšit proud LED snímače otáček O<sub>1</sub>, neboť s původní hodnotou proudu přibližně 8 mA byla funkce snímače již od poměrně nízkých otáček nespolehlivá. Hodnota odporu R<sub>20</sub> byla tedy upravena na 270 Ω, čímž hodnota proudu LED vzrostla na 14 mA.

Poměrně problematickou oblastí se ukázala být regulace otáček. První zkušenosti ukázaly, že požadovaná rychlost otáčení 12,5 ot.s<sup>-1</sup> je příliš nízká a není možné jí dosáhnout. Jako dolní hranice udržitelných otáček byla určena hodnota kolem 27 ot.s<sup>-1</sup>. Jako alternativa ke zvolenému typu motoru SFF-10KWA byl proto vyzkoušen motor typu SFF-K20WA-07130. Ačkoli jeho nominální otáčky jsou mnohem nižší, při pokusech o dosažení minimálních otáček byly výsledky zhruba srovnatelné s původním typem motoru.

Tento výsledek ovšem narušuje původní koncept synchronního časování s navrženými dělicími poměry. Pro vyřešení problému proto byly provedeny dva zásahy do obvodů časové základny modulu zpracování signálu a řízení:

1. Frekvence oscilátoru časové základny byla výměnou krystalu X2 zvýšena na 4,433 MHz.
2. Hodinový vstup děliče IC<sub>6A</sub> byl přepojen z výstupu Q13 IC<sub>3</sub> na výstup Q12; tím je 2 × zvýšen kmitočet, z něhož jsou odvozeny synchronizační signály CLKSCAN\_L a CLKSCAN\_R.

Tím byly změněny časovací poměry všech částí zařízení; v tab. 3 jsou uvedeny frekvence modulačních a synchronizačních signálů po úpravách.

Tab. 3. Frekvence signálů časové základny po úpravách

Veličina	Hodnota	Signály
$f_{mod}$ [Hz]	138550,6	CLKMOD, CLKDEMOn, LASM0D, DEMOD, ILLUM_L, ILLUM_R
$f_{scan}$ [Hz]	33,8	CLKSCAN_L, CLKSCAN_R, /SYNCSCAN_L, /SYNCSCAN_R

Důsledkem úpravy je ovšem změna poměru frekvencí  $f_{mod}/f_{scan}$  z 8192 na 4096 a také změna obrazové frekvence  $f_{obr}$  pro danou vzdálenost pera od scanneru; její maximální hodnota je nyní

$$f_{obr} = \frac{\pi f_{scan} r}{d} = \frac{3, 14,33, 8,1, 5}{0, 012} = 13266, 5 \text{ Hz} \quad (46)$$

Poměr modulační frekvence a maximální obrazové frekvence po úpravě je 10,44; to je stále ještě akceptovatelný poměr, který by měl umožnit úspěšnou synchronní detekci užitečného signálu. Mezní kmitočet dolní propusti fotodetektoru je však třeba přizpůsobit změněné maximální obrazové frekvenci.

### 5.3.3 Modul fotodetektoru

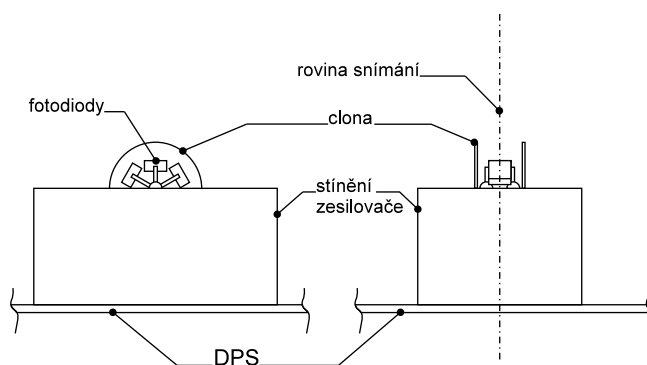
#### 5.3.3.1 Optická soustava

Původní návrh uspořádání fotodiod a jejich objektivů, počítající se čtveřicí fotodiod a dvěma čočkami RTX-LI 16 se ukázal jako poměrně problematický. Signál fotodetektoru podstanou měrou závisel na poloze snímaného objektu v zorném poli. I přes slibné výsledky při testování původního prototypu fotodetektoru (odst. 4.2.3.7) bylo poměrně obtížné nalézt takovou vzájemnou orientaci dvojic fotodiod, které by vyhovělo požadavku na dostatečně široký zorný uhel.

Během experimentování se jako nejvhodnější řešení paradoxně osvědčilo použití fotodiod bez jakékoli optiky. Díky širokému úhlu poloviční citlivosti diod (65°) bylo možné při natočení diod 60° pokrýt zorné pole 180° s vyhovujícím směrovým rozložením citlivosti. Konečné uspořádání fotodiod ukazuje obr. 51. Fotodiody jsou

připájeny na destičku tvořící víko stínící krabičky; pro odstínění záření dopadajícího z nežádoucích směrů jsou k destičce přilepeny půlkruhové clonky s černým matným povrchem.

Navzdory menšímu ozáření fotodiody ve srovnání s původním řešením se toto uspořádání po úpravách zapojení ukázalo být prakticky použitelným pro vzdálenosti do přibližně 1,2 m, což vyhovuje požadavku na pokrytí plochy s úhlopříčkou 1,5 m, neboť při snímání jediným fotodetektozem ze středu horní hrany tabule i dvěma fotodetektozem v levém a pravém horním rohu je potřebný dosah fotodetektoru přibližně 1 m.



Obr. 51. Upravené uspořádání fotodiody

### 5.3.3.2 Stínění

Stavba a oživení fotodetektoru potvrdily opodstatněnost rozhodnutí realizovat fotodetektor nejprve jako prototypovou konstrukci. Během stavby bylo původně navržené zapojení mírně modifikováno a rovněž bylo podstatným způsobem změněno uspořádání součástek na desce. Důvodem bylo zejména intenzivní pronikání referenčního kmitočtu pro synchronní detekci \*DEMOD do vstupních obvodů s vysokým zesílením, a to navzdory použití obvodového stínění kritických částí. Důsledkem byla nefunkčnost detektoru pro vzdálenosti nad přibližně 0,4 m, tedy jeho praktická nepoužitelnost. Obtížnost tohoto druhu rušení spočívá zejména v tom, že na rozdíl od jiných rušivých signálů není potlačen synchronní detekcí.

Situace se podstatně zlepšila po zdokonalení stínění kritických částí – bylo doplněno stínění strany spojů pod vstupními obvody a provizorní stínění konektoru rozhraní, jehož součástí je signál \*DEMOD. K dalšímu zlepšení přispělo přemístění obvodů synchronního detektoru dále od vstupních obvodů.

### 5.3.3.3 Modifikace zapojení

Úpravou uspořádání vstupní části fotodetektoru a vypuštěním optické soustavy došlo k zeslabení proudu fotodiody, proto bylo zesílení vstupního transimpedančního

zesilovače zvýšeno oproti původnímu návrhu  $3,3 \times$  krát zvětšením hodnoty  $R_1$  na  $3,3 \text{ M}\Omega$ .

Dolní mezní kmitočet transimpedančního zesilovače byl zvýšen z původních 10 kHz na přibližně 100 kHz změnou velikosti odporů  $R_2$  a  $R_3$  na  $22 \text{ k}\Omega$ ; důvodem byla značná přítomnost šumu v pásmu zhruba 5 kHz až 80 kHz na výstupu zesilovače s původním mezním kmitočtem.

Paralelně ke zpětnovazebním rezistorům  $R_6$  a  $R_8$  byly připojeny keramické kondenzátory s kapacitou  $1,8 \text{ pF}$  pro potlačení vlivu parazitních kapacit na vstupu a zlepšení stability.

Mezní kmitočet dolní propusti synchronního detektoru byl s ohledem na provedené úpravy časové základny zvýšen na 16 kHz změnou hodnot odporů  $R_{15}$  a  $R_{16}$  na  $5,6 \text{ k}\Omega$ .

Schéma modulu fotodetektoru po úpravách provedených během oživování ukazuje obr. 63.

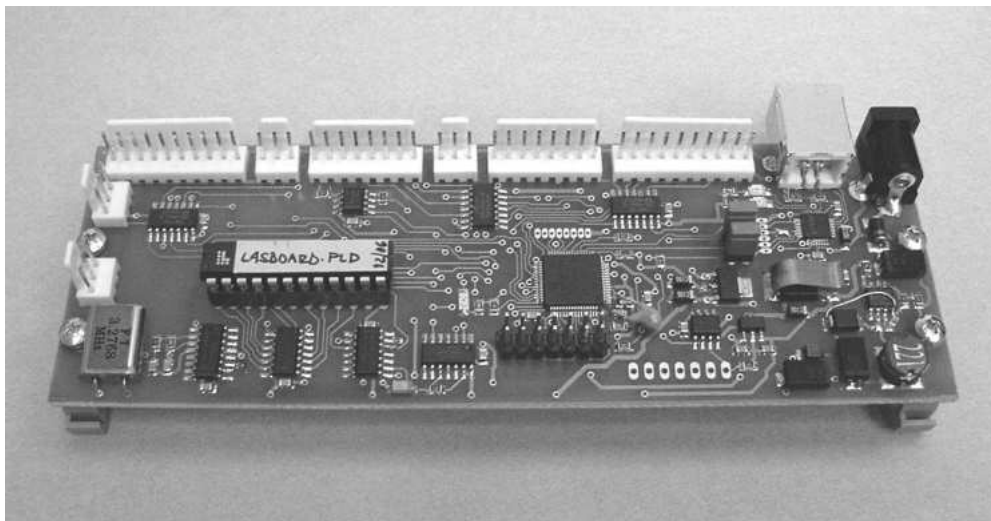
#### 5.3.4 Testovací tabule

Realizované zařízení je určeno koncipováno jako přídavné, tudíž pro jeho použití je třeba jej instalovat na vhodnou pracovní plochu. Pro testování, vývoj programového vybavení a pro demonstrační účely byl vytvořen zmenšený model tabule instalací zkonstruovaného zařízení nad tabulovou desku o úhlopříčce  $0,8 \text{ m}$  v dřevěném rámu. Psací plocha byla po obvodu doplněna o clonící lišty omezující dráhu paprsků scannerů. Snímací zařízení bylo namontováno nad horní hranou pracovní plochy tak, aby rovina snímání byla vzálena  $8 \text{ mm}$  od psací plochy.

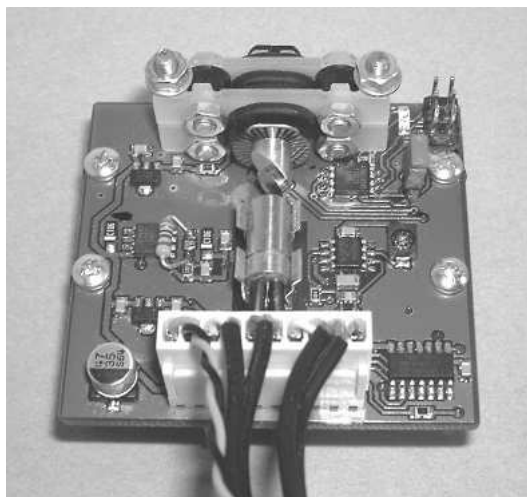
## 6 Dosažené výsledky

### 6.1 Realizované zařízení

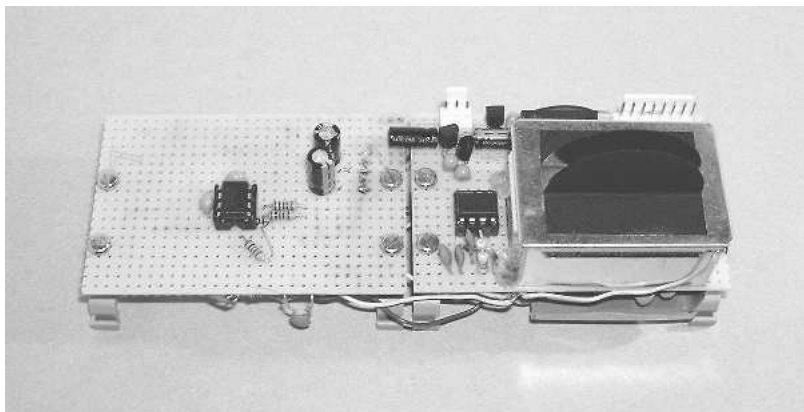
Obr. 52, 53 a 54 ukazují moduly realizovaného zařízení. Na obr. 55 je zachycen detail testovací tabule s namontovaným zařízením.



Obr. 52. Modul zpracování signálu a řízení



Obr. 53. Modul scanneru



Obr. 54. Modul fotodetektoru

## 6.2 Funkce modulů

Testování základní funkčnosti modulů probíhalo současně s oživováním. Po zprovoznění modulů byla ověřována funkčnost komunikace mezi modulem zpracování signálu a připojenými moduly a byly kontrolovány průběhy signálů rozhraní. Hlavní pozornost testů byla zaměřena na schopnost detekce psací pomůcky na pracovní ploše v sestavě testovací tabule, tj. za podmínek odpovídajících skutečnému provozu.

Následující grafy zachycují průběhy nejdůležitějších signálů snímacího systému.

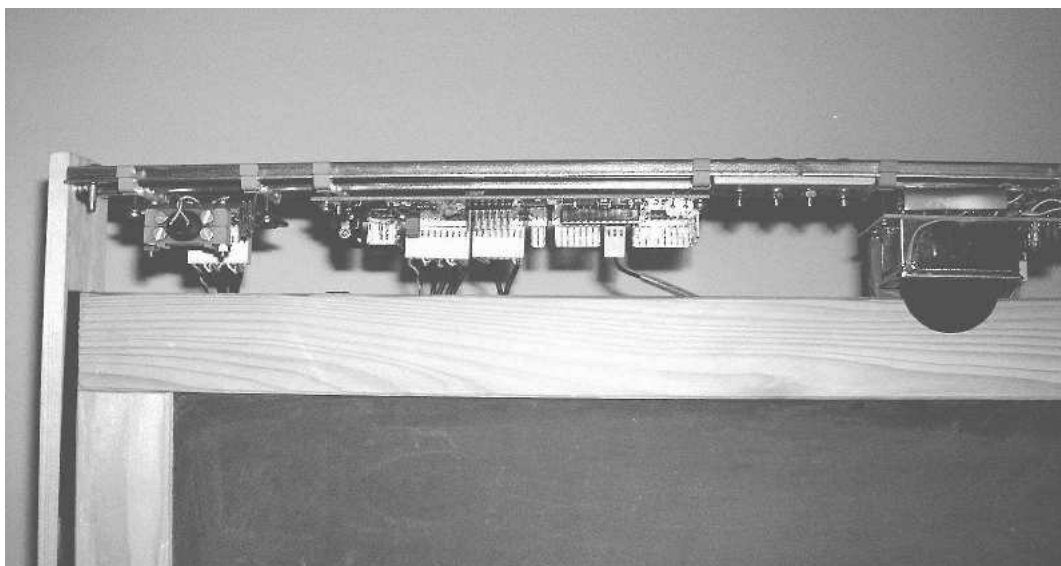
Na obr. 56 a 57 je zobrazen průběh signálů scanneru \*START (výstup detektoru výchozí polohy) a \*SCANCLK (výstup snímače polohy scanneru).

Ukázky výstupního signálu fotodetektoru zachycují obr. 58, 59 a 60. První z grafů ukazuje signál snímáný na výstupu fotodetektoru při kontaktu ruky s rozevřenými prsty s pracovní plochou tabule. Signál vykazuje výrazná maxima odpovídající čtyřem prstům. Další ukázka (obr. 59) představuje výstupní signál fotodetektoru v situaci, kdy se plochy dotýká blízko sebe křída a prst. První maximum zleva odpovídá křídě; na průběhu signálu je patrný rozdíl v odrazivosti křídě a pokožky. Na obr. 60 je zachycen průběh signálu fotodetektoru pro křídu snímánou ze vzdálenosti 1 m<sup>15</sup>. Oproti předchozím snímkům je patrné zhoršení poměru signál/šum, ovšem maximum odpovídající křídě je stále možné odlišit od pozadí.

Dílní funkce modulů byla shledána vcelku dobrou; byly zjištěny mírné nepravidelnosti průběhu signálu \*SCANCLK, které lze patrně přičíst nedokonalostem mechanické části sestavy motoru.

Funkce zařízení jako celku nebyla testována s ohledem na omezení této práce na hardwarovou část; potřebné softwarové komponenty umožňující otestovat celkovou funkci, tj. firmware modulu zpracování signálu a podpůrný software pro PC,

<sup>15</sup>To odpovídá zhruba nejnepříznivější situaci pro tabuli o rozměru 1,2 m × 0,9 m při použití jediného fotodetektoru ve středu horní hrany.



Obr. 55. Detail testovací tabule

nebyly v době testů dosud vytvořeny. Ze stejných důvodů nebylo v této fázi vývoje prováděno ani hodnocení kvantitativních parametrů zařízení.

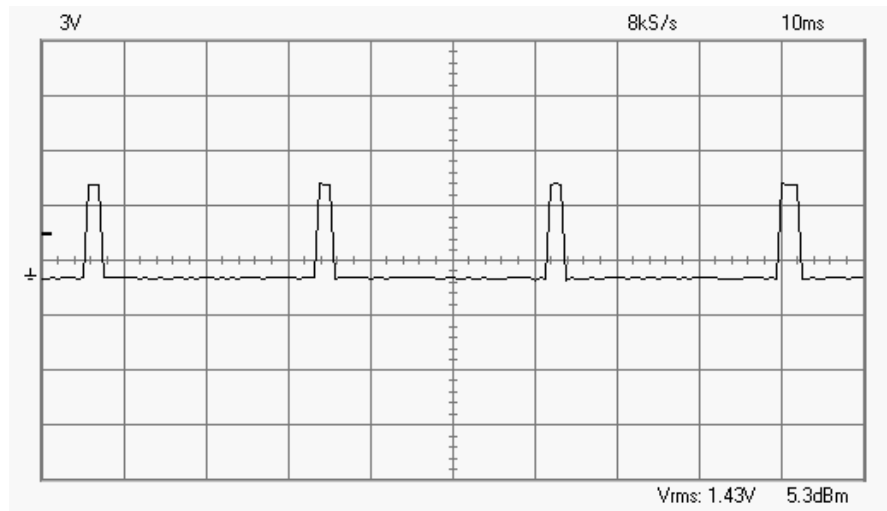
### 6.3 Cena komponentů

Jedním z požadavků kladených na realizované zařízení bylo dosažení co nejnižší ceny. Tab. 4 ukazuje přehled cen materiálu připadajících na jednotlivé moduly. Celková výše materiálových nákladů byla vyčíslena na 3798 Kč, takže požadavek (p5) byl splněn se značnou rezervou.

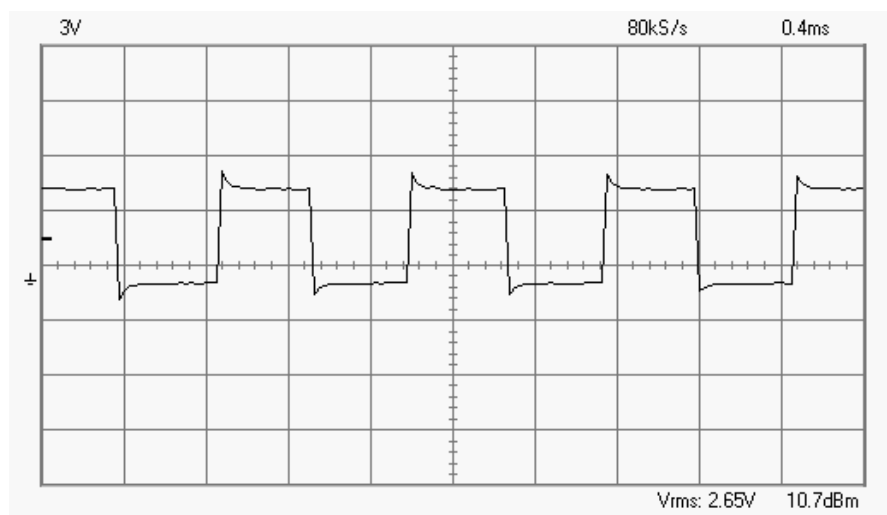
Tab. 4. Ceny komponentů, DPS a montážního materiálu

Položka	Cena [Kč]
Modul zpracování signálu	1364,-
Scanner	2 × 836,-
Fotodetektor	402,-
Propojovací a montážní materiál	360,-
Celkem	3798,-

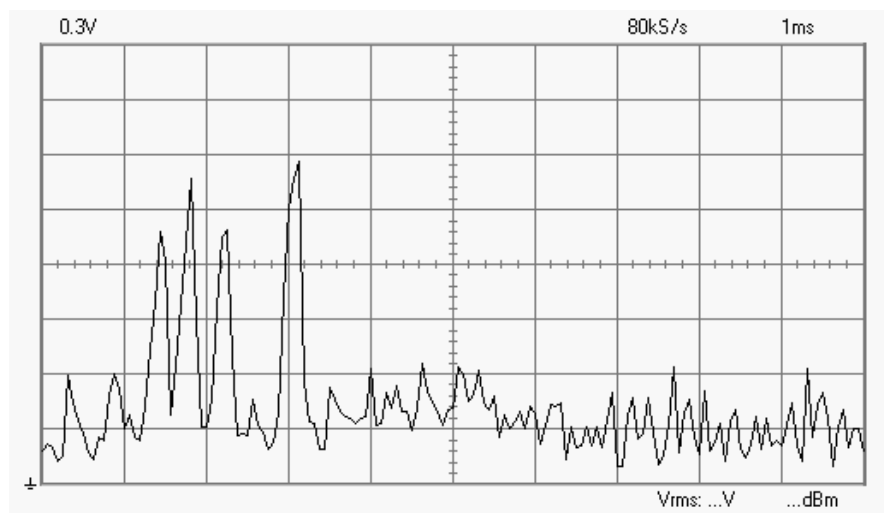




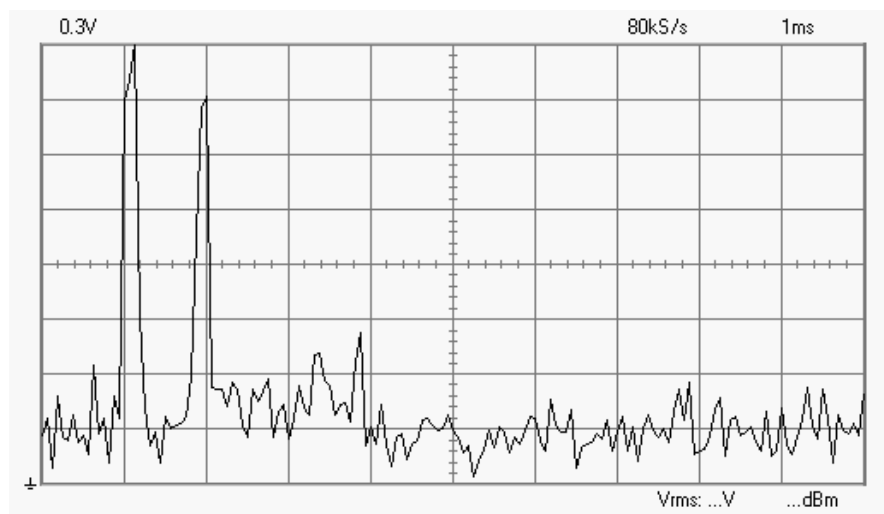
Obr. 56. Signál \*START scanneru



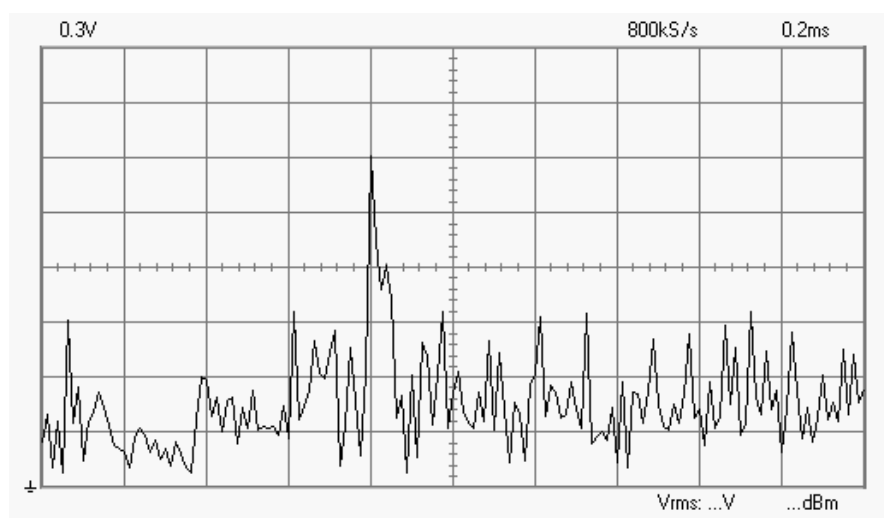
Obr. 57. Signál \*SCANCLK scanneru



Obr. 58. Ukázka výstupu fotodetektoru - prsty ruky  
vzdálenost od fotodetektoru 0,4 m



Obr. 59. Ukázka výstupu fotodetektoru - křída a prst  
vzdálenost od fotodetektoru 0,4 m



Obr. 60. Ukázka výstupu fotodetektoru - křída  
vzdálenost od fotodetektoru 1 m

## 7 Závěr

Tato práce se zabývala návrhem a realizací hardwarové části experimentální elektronické tabule využívající pasivní pracovní plochy a křídly nebo značkovače pro suchou tabuli.

Navržené řešení je založeno na optickém bezkontaktním snímání polohy psací pomůcky, a to pomocí triangulace využívající dvojice laserových scannerů a pevného fotodetektoru. K rozmítání laserových svazků je použito levných mikromotorů a miniaturních šikmých zrcadel s jedinou odraznou plochou. Laserové svazky jsou modulovány a jas scanované scény je vyhodnocován pomocí synchronní detekce.

Zařízení je strukturováno jako modulární, což má za cíl usnadnit budoucí modifikace a další vývoj. Konstrukce počítá především s použitím zařízení pro dodatečnou montáž jako doplněk běžné tabule, a to v současné podobě až do úhlopříčky 1,5 m, výhledově pro tabule s úhlopříčkou přesahující 2 m. Pro demonstrační účely a vývoj programového vybavení v dalších etapách projektu byl prototyp instalován na zmenšený model tabule s úhlopříčkou 0,8 m.

Prototypová konstrukce počítá s implementací části funkčnosti tabule v osobním počítači. Jde zejména o transformaci snímaných úhlových souřadnic psací pomůcky do kartézských souřadnic, korekci systematických chyb polohy pomocí kalibrace a vlastní ukládání dat. Realizovaná hardwarová část je tedy tvořena především vlastní snímací soustavou a prostředky pro připojení k PC. Implementace softwarových funkcí bude předmětem navazující fáze vývoje; cílovým záměrem je implementace této funkčnosti technickými prostředky v samotném zařízení.

Řešení bylo navrhováno s důrazem na minimalizaci ceny zařízení. Cena komponentů použitých pro kusovou stavbu prototypu nepřesáhla 3800 Kč. Při sériové výrobě je oprávněný předpoklad dalšího výrazného poklesu výrobních nákladů až na 50% ceny komponentů prototypu.

Během realizace a ožívání bylo nutno v řadě případů postupovat experimentálně a původní návrh v některých bodech modifikovat a upravit parametry zařízení. Nejzásadnější úpravu představuje zvýšení frekvence scanování z 12,5 Hz na 33,8 Hz, které si vynutily problémy s plynulostí chodu scanovacích motorků při nízkých otáčkách. Změna časování vedla i k dalším modifikacím, zejména ke zvýšení modulační frekvence laserů ze 102 kHz na 138 kHz.

Výsledky práce ukazují, že pro vzdálenosti do přibližně 1 m až 1,2 m je možné úspěšně detekovat odražené modulované záření laserů pomocí fotodiody bez optické soustavy; tímto způsobem se podařilo realizovat fotodetektor se zorným úhlem 180°, kterým je možné pokrýt pracovní plochu s úhlopříčkou 1,5 m.

Dílčí funkčnost modulů prototypu byla úspěšně otestována a shledána dobrou. Vzhledem k omezení první etapy vývoje a obsahu této práce na hardwarovou část zařízení nebyla prozatím ověřována funkce zařízení jako celku, neboť potřebné softwarové komponenty (firmware řídicího modulu, obslužný software pro PC) nebyly v době testů k dispozici. Výsledky dílčích testů však opravňují k předpokladu bezproblémové funkce.

Lze říci, že použitá metoda snímání, navržené řešení a použité komponenty vyhovují účelu záznamu rukopisného textu a kreseb s použitím pasivních psacích pomůcek, zejména křídly. Během realizace byly identifikovány problémové oblasti, na které by měla být zaměřena pozornost při dalším vývoji, zvláště při budoucím zvětšení pracovní plochy; jde zejména o:

- přesnost odečtu úhlové polohy scannerů
- řešení optické soustavy fotodetektoru
- řízení zisku fotodetektoru.

Dlouhodobé testy v dalších etapách vývoje by pak měly ověřit také spolehlivost a živostnost scanovacích motorků a odolnost zařízení vůči prašnosti a dalším nepříznivým vlivům, se kterými je při nasazení v praxi třeba počítat.

Vytýčené cíle práce byly splněny.

## Literatura

- [1] GREIFFENHAGEN, C. *Out of the Office Into the School: Electronic Whiteboards for Education*. Technical report. Oxford University Computing Laboratory, 2000. Dostupné z <<ftp://ftp.comlab.ox.ac.uk/pub/Documents/techreports/TR-16-00.pdf>>.
- [2] LEITNER, R., MAIZE, J. *Telescribing Apparatus*. US Patent 2,975,235. March 1961.
- [3] STAMPS, G. *Sonar Telescriber*. US Patent 3,156,766. November 1964.
- [4] SCHOMAKER, L. *From handwriting analysis to pen-computer applications* [online]. 1998 [cit. 1. 9. 2006]. Dostupné z <<http://www.ai.rug.nl/~lambert/papers/schomaker-IEE-Electronics-Comm-Eng-1998.pdf>>.
- [5] SATO, Y., SHINGYOUUCHI, M., ET AL. *Novel Device for Inputting Handwriting Trajectory* [online]. Technical report. Ricoh, November 2001 [cit. 2. 9. 2006]. Dostupné z <[http://www.ricoh.co.jp/about/business\\_overview/report/27/pdf/A2707.pdf](http://www.ricoh.co.jp/about/business_overview/report/27/pdf/A2707.pdf)>.
- [6] *SMART Board Interactive Whiteboard* [online]. SMART Technologies Inc [cit. 10. 12. 2005]. Dostupné z <<http://smarttech.com/>>.
- [7] *mimio Xi* [online]. mimio [cit. 15. 9. 2005]. Dostupné z <[www.mimio.com](http://www.mimio.com)>.
- [8] TROUSIL, P. AceCAD DigiMemo A501. *Chip*, 15(6), (2005), pp. 72–73. ISSN 1210-0684.
- [9] *DigiMemo A502* [online]. ACE CAD Enterprise [cit. 4. 9. 2006]. Dostupné z <<http://www.acecad.com.tw/dma502.html>>.
- [10] *Anoto* [online]. [cit. 2. 9. 2006]. Dostupné z <<http://www.anoto.com/>>.
- [11] *Nokia Digital Pen* [online]. White paper. Nokia, October 2003 [cit. 2. 9. 2006]. Dostupné z <[http://www.nokia.com/NOKIA\\_COM\\_1/About\\_Nokia/Press/White\\_Papers/pdf\\_files/whitepaper\\_nokiadigitalpen.pdf](http://www.nokia.com/NOKIA_COM_1/About_Nokia/Press/White_Papers/pdf_files/whitepaper_nokiadigitalpen.pdf)>.
- [12] *Nokia Digital Pen SU-1B* [online]. Nokia [cit. 2. 9. 2006]. Dostupné z <<http://www.nokia.com/A4156071>>.
- [13] *Logitech io Pen* [online]. Logitech [cit. 2. 9. 2006]. Dostupné z <<http://www.logitech.com/index.cfm/products/features/digitalwritingtopics/DE/EN,CRID=1558>>.
- [14] *Maxell Digital Pen* [online]. Maxell [cit. 2. 9. 2006]. Dostupné z <<http://www.maxell.co.jp/e/products/industrial/digitalpen/index.html>>.
- [15] HLAVÁČ, V., SEDLÁČEK, M. *Zpracování signálů a obrazů*. Praha: ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 2005, druhé vydání. ISBN 80-01-03110-1.
- [16] VRBOVÁ, M., ET AL. *Lasery a moderní optika*. Praha: Prometheus, 1994. ISBN

- 80-85849-56-9.
- [17] TAPPERT, C., SUEN, C., ET AL. *The State of the Art in On-Line Handwriting Recognition* [online]. August 1990 [cit. 5. 9. 2006]. Dostupné z <<http://csis.pace.edu/~ctappert/dps/pdf/pen-tappert.pdf>>.
- [18] TEULINGS, H.L. *Invariant Handwriting Features Useful in Cursive-Script Recognition* [online]. Nijmegen, Netherlands: Nijmegen Institute for Congition and Information, 1993 [cit. 27. 9. 2005]. Dostupné z <<http://www.ai.rug.nl/~lambert/papers/teulings/recog/bonas93.pdf>>.
- [19] SCHOMAKER, L. *Simulation and recognition of handwriting movements: a vertical approach to modeling human motor behavior* [online]. Dissertation. Nijmegen: Nijmegen University, 1991 [cit. 4. 7. 2006]. Dostupné z <<http://www.ai.rug.nl/~lambert/papers/thesis-schomaker-1991.pdf>>.
- [20] TEULINGS, H. *Handwriting Movement Control* [online]. 1992 [cit. 10. 9. 2006]. Dostupné z <<http://hwr.nici.kun.nl/papers/teulings/move/hb2.ps.gz>>.
- [21] RIPKA, P., ĎAĎO, S., ET AL. *Senzory a převodníky*. Praha: ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 2005. ISBN 80-01-03123-3.
- [22] DONATI, S. *Electro-Optical Instrumentation: Sensing and Measuring with Lasers*. Prentice Hall, 2004. ISBN 0-13-061610-9.
- [23] VOJÁČEK, A. *PMD senzor & 3D měření vzdálenosti - 1. část* [online]. 3. července 2006 [cit. 10. 7. 2006]. Dostupné z <<http://automatizace.hw.cz/view.php?cisloclanku=2006070301>>.
- [24] KAŠPAR, M., POSPÍŠIL, J., ET AL. *Laserové skenovací systémy ve stavebnictví*. Hradec Králové: Vega, 2004. ISBN 80-900860-3-9.
- [25] JAN, J. *Číslicová filtrace, analýza a restaurace signálů*. Brno: VUTIUM, 2002. ISBN 80-214-1558-4.
- [26] *BPW34* [online]. Datasheet. Vishay Semiconductor, March 2005.
- [27] MIKULČÁK, J., KLIMEŠ, B., ET AL. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. Praha: Prometheus, 2002, 3. vydání. ISBN 80-85849-84-4.
- [28] *Výpočet osvětlení snímáče při použití objektivu* [online]. Studijní materiál předmětu 38OSV. ČVUT, Fakulta elektrotechnická, Katedra měření [cit. 8. 2. 2006]. Dostupné z <<http://measure.feld.cvut.cz/groups/edu/osv/optika/Osvetleni.html>>.
- [29] HISCOCKS, P. *Modulated Beam Photodetector for Mobile Robots* [online]. Ryerson Polytechnic University, Department of Electrical and Computer Engineering, 2002 [cit. 20. 8. 2006]. Dostupné z <<http://www.ee.ryerson.ca/~phiscock/papers/photo-detector.pdf>>.
- [30] VEDRAL, J., FISCHER, J. *Elektronické obvody pro měřicí techniku*. Praha:

- Vydavatelství ČVUT, 2004, 2. vydání. ISBN 80-01-02966-2.
- [31] SCOFIELD, J. A frequency-domain description of a lock-in amplifier. *American Journal of Physics*, 62(2), (1994), pp. 129–133. Dostupné z <[http://www.oberlin.edu/physics/Scofield/pdf\\_files/ajp-94.pdf](http://www.oberlin.edu/physics/Scofield/pdf_files/ajp-94.pdf)>.
- [32] PLATIL, A. *Synchronní detekce* [online]. [cit. 26. 10. 2006]. Dostupné z <[http://measure.feld.cvut.cz/groups/edu/sz/pdfs/synchronni\\_detekce.pdf](http://measure.feld.cvut.cz/groups/edu/sz/pdfs/synchronni_detekce.pdf)>.
- [33] *Visible laser diodes* [online]. Roithner LaserTechnik [cit. 27. 10. 2006]. Dostupné z <<http://www.roithner-laser.com/LP-laserdiodesIR.htm>>.
- [34] *InGaAs PIN Photodiode*. Catalogue. Hamamatsu Photonics, May 2003. Cat. No. KIRD0003E02.
- [35] *Polyvision LTX* [online]. Polyvision [cit. 15. 9. 2005]. Dostupné z <[www.polyvision.com](http://www.polyvision.com)>.
- [36] *EPD660-5/0.5*. Datasheet. EPIGAP Optoelektronik.
- [37] ŠPANĚL, M., BERAN, V. *Obrazové segmentační techniky: přehled existujících metod* [online]. Brno: VUT, Fakulta informačních technologií, Ústav počítačové grafiky a multimédií, 2005 [cit. 6. 6. 2006]. Dostupné z <<http://www.fit.vutbr.cz/~spanel/segmentace/>>.
- [38] ŠONKA, M., HLAVÁČ, V. *Počítačové vidění*. Praha: Grada, 1992. ISBN 80-85424-67-3.
- [39] *Elektrotechnická měření*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-022-9.
- [40] ŠŤASTNÝ, F. *Zpracování experimentálních dat* [online]. [cit. 26. 11. 2006]. Dostupné z <[http://amper.ped.muni.cz/jenik/nejistoty/frst\\_zed.pdf](http://amper.ped.muni.cz/jenik/nejistoty/frst_zed.pdf)>.
- [41] ET AL., T. T. *Fyzikální praktikum*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2002, 5. vydání. ISBN 80-7082-851-X.
- [42] *LPC2136*. Datasheet. Philips Semiconductors, April 2005 [cit. 10. 10. 2005].
- [43] MATOUŠEK, D. *Číslicová technika*. Praha: BEN - technická literatura, 2001. ISBN 80-7300-025-3.
- [44] *UM10120: LPC213x User Manual*. Philips Semiconductors, 2005 [cit. 10. 10. 2005].
- [45] KREJČIŘÍK, A. *Spínané zdroje s časovačem 555*. Praha: BEN - technická literatura, 1999. ISBN 80-86056-76-7.
- [46] *Miniaturní laserový modul 650 nm* [online]. GM Electronic [cit. 20. 10. 2006]. Dostupné z <<http://www.gme.cz/index.php?action=detail&sklcis=758-009&lk=&sk=&pict=&jaz=>>.
- [47] MALZAHN, U. *Driving Diode Lasers Is Straightforward* [online]. 2004 [cit. 14. 11. 2005]. Dostupné z <<http://www.ichaus.com/upload/pdf/>>



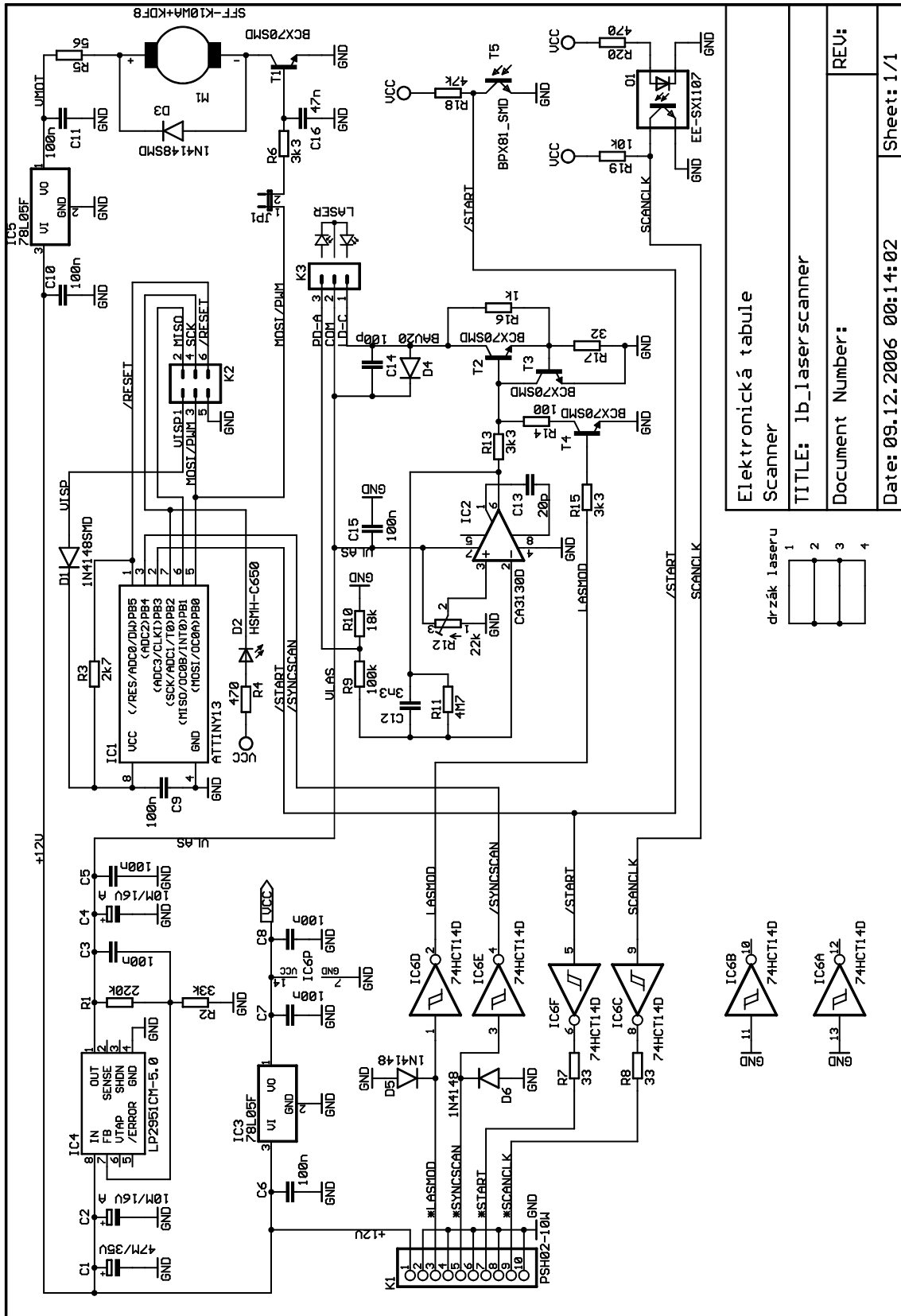
- EuroPhotonics\_H89\_2004\_Driving\_Diode\_Lasers.pdf>.
- [48] LUKÁŠ, M. *Laserové diody 4 – Napájení, impulsní režim a aplikace laserových diod* [online]. 21. listopadu 2002 [cit. 15. 11. 2005]. Dostupné z <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/02059/>>.
- [49] LUKÁŠ, M. *Laserové diody; Část 1 – Princip funkce laserových diod* [online]. 1. října 2001 [cit. 15. 11. 2005]. Dostupné z <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/>>.
- [50] *Sanyo Laser Diode* [online]. Catalogue. Tottori SANYO Electric, March 2005 [cit. 28. 10. 2006]. Dostupné z <[http://www.photonics.uk.com/techinfo/sanyo\\_tech/sanyo\\_catalogue2005.pdf](http://www.photonics.uk.com/techinfo/sanyo_tech/sanyo_catalogue2005.pdf)>.
- [51] MATOUŠEK, V., ČÍP, O. *Stabilizace teploty laserové diody typu VCSEL* [online]. 2003 [cit. 10. 9. 2006]. Dostupné z <Stabilizace teploty>.
- [52] DREXLER, P. *Elektronická část měřicí sondy magnetického pole* [online]. Diplomová práce. Brno: VUT, 2004 [cit. 9. 9. 2005]. Dostupné z <[http://www.ieee.cz/mtt/soutez04/prace/DP\\_petr\\_drexler.pdf](http://www.ieee.cz/mtt/soutez04/prace/DP_petr_drexler.pdf)>.
- [53] KVÍČALA, R. *Universální optický vysílač* [online]. 20. ledna 2005 [cit. 15. 11. 2005]. Dostupné z <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/05006/>>.
- [54] *Visible-Laser Driver Has Digitally Controlled Power Modulation* [online]. Application note. Maxim Integrated Products, July 2001 [cit. 6. 11. 2005]. Dostupné z <<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN1811.pdf>>.
- [55] FISCH, M. *Circuit provides laser-diode control* [online]. September 2002 [cit. 14. 11. 2005]. Dostupné z <<http://www.edn.com/article/CA243224.html>>.
- [56] GOLDWASSER, S.M. *Diode Laser Power Supplies* [online]. [cit. 16. 10. 2006]. Dostupné z <<http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Lab/3931/laserdps.htm>>.
- [57] JOHNSON, D. *Handbook of Optical Through the Air Communications* [online]. [cit. 22. 8. 2006]. Dostupné z <<http://www.imagineeringezine.com/files/air-bk2.html>>.
- [58] PUNČOCHÁŘ, J. *Operační zesilovače v elektronice*. Praha: BEN - technická literatura, 2002, páté vydání. ISBN 80-7300-059-8.
- [59] *SFF-K10WA* [online]. Datasheet. SGST [cit. 28. 10. 2006]. Dostupné z <<http://www.sgstcl.com/up/21/engpdf/SFFK10WAseries.pdf>>.
- [60] *SFF-K20WA* [online]. Datasheet. SGST [cit. 28. 10. 2006]. Dostupné z <<http://www.sgstcl.com/up/6/engpdf/SFFK20WDseries.pdf>>.
- [61] LEE, G., KING, R. *Optical Incremental and Absolute Rotary Encoders* [online]. Whitepaper. TAOS Inc. [cit. 8. 12. 2006]. Dostupné z <<http://www.taosinc.com/downloads/pdf/opticalencoders.pdf>>.

- [62] *EE-SX-1107* [online]. Datasheet. Omron [cit. 28. 10. 2006]. Dostupné z <[http://www.omron.com/ecb/products/photo/3/ee\\_sx1107.html](http://www.omron.com/ecb/products/photo/3/ee_sx1107.html)>.
- [63] *ATtiny13* [online]. Datasheet. Atmel, October 2004 [cit. 14. 22. 2006]. Dostupné z <[http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc2535.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2535.pdf)>.
- [64] KEJZLAR, L. *Detektory optického záření* [online]. Rešerše. 2001 [cit. 6. 6. 2006]. Dostupné z <<http://www.sweb.cz/kejzlar/detektory/detektory.pdf>>.
- [65] *Convex Lenses for Receiver Components* [online]. Datasheet. Mentor [cit. 20. 8. 2006]. Dostupné z <<http://www.mentor-components.com/products.phtml?cat=115#14653>>.
- [66] PEASE, R. *What's All This Transimpedance Amplifier Stuff, Anyhow?* [online]. Electronic design, January 8 2001 [cit. 27. 8. 2006]. Dostupné z <<http://www.elecdesign.com/Articles/Index.cfm?AD=1&AD=1&ArticleID=4346>>.
- [67] *Application Circuit Examples of Si Photodiode* [online]. Application note. Hamamatsu Photonics, June 2004 [cit. 22. 8. 2006]. Dostupné z <[http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/SSD/si\\_pd\\_circuit\\_examples.pdf](http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/SSD/si_pd_circuit_examples.pdf)>.
- [68] STITT, M., MEINEL, W. *OPT201 Photodiode Amplifier Rejects Ambient Light* [online]. Application note. Burr Brown, November 1993 [cit. 24. 8. 2006]. Dostupné z <<http://www.nalanda.nitc.ac.in/industry/AppNotes/BurrBrown/appnotes/AB-061.pdf>>.
- [69] BELZA, J. *Operační zesilovače pro obyčejné smrtelníky*. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-115-2.
- [70] *MCP6S91/2/3 – Single-Ended, Rail-to-Rail I/O, Low-Gain PGA* [online]. Datasheet. Microchip, 2004 [cit. 8. 12. 2006]. Dostupné z <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21908a.pdf>>.
- [71] *MC34063* [online]. Datasheet. On Semiconductor, December 2005 [cit. 20. 3. 2006]. Dostupné z <<http://www.onsemi.com/pub/Collateral/MC34063A-D.PDF>>.
- [72] ALBERKRACK, J. *AN290/D: Theory and Applications of the MC34063 and  $\mu A78S40$  Switching Regulator Control Circuits* [online]. Application note. ON Semiconductor, April 2002 [cit. 26. 7. 2004]. Dostupné z <<http://www.onsemi.com/pub/Collateral/AN920-D.PDF>>.
- [73] FISCHER, J. *Optoelektronické senzory a videometrie*. Praha: ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 2002. ISBN 80-01-02525-X.
- [74] HUMLHANS, J. *Zajímavá zapojení 3*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-152-7.
- [75] HINCKLEY, K. *Handbook of Human-Computer Interaction* [online]. [cit. 6. 7. 2006]. Dostupné z <<http://research.microsoft.com/users/kenh/>>

- papers/input-technologies-and-techniques-2006.pdf>.
- [76] BERAN, V., GIRG, J., ET AL. *Měření neelektrických veličin*. Plzeň: Západočeská univerzita, 1994. ISBN 80-7082-158-2.
- [77] *Si Photodiode*. Catalogue. Hamamatsu Photonics, March 2004. Cat. No. KSPD0001E01.
- [78] ERRICO, J., MURDOCH, M., ET AL. *Method and system for velocity-based handwriting recognition*. US Patent 5,768,417. June 1998.

## **Přílohy**

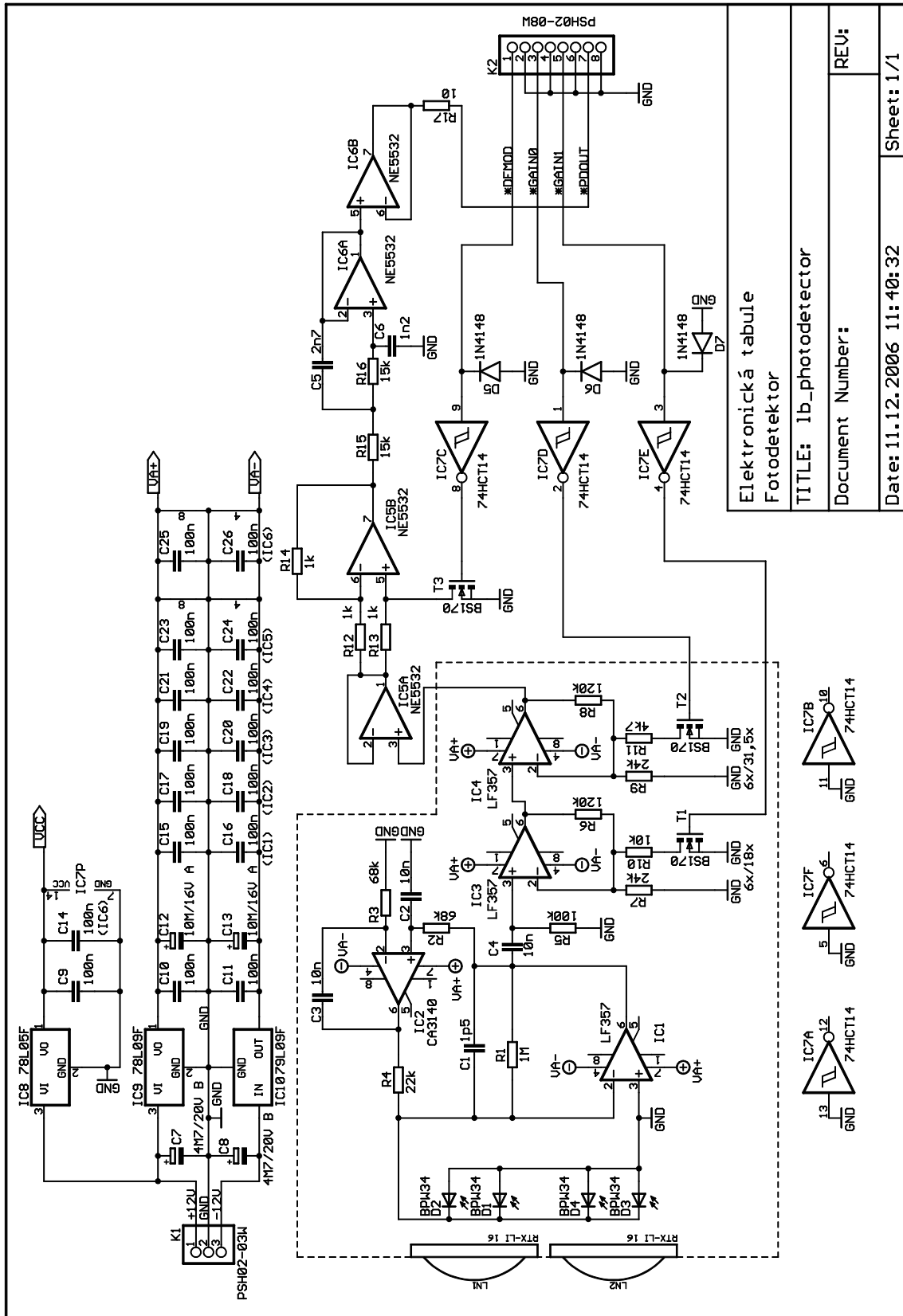
## **A Schémata zapojení modulů**



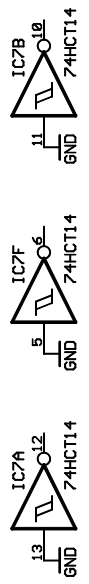
Elektronická tabule  
Scanner  
TITLE: lb\_laser scanner  
Document Number:  
Date: 09.12.2006 00:14:02  
Sheet: 1/1



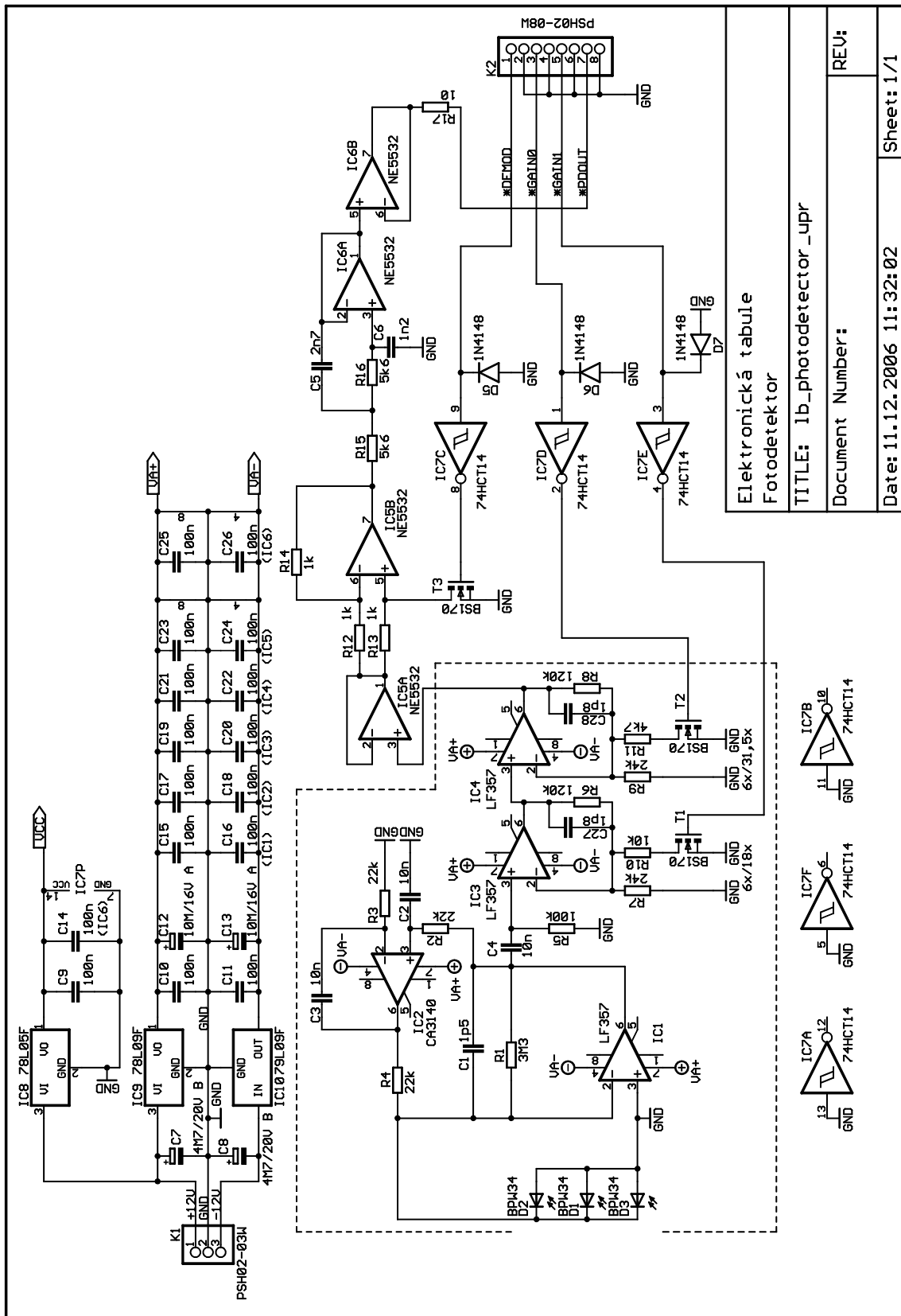
Obr. 61. Schéma scanneru



Elektronická tabule  
Fotodetektor  
TITLE: lb\_photodetector  
Document Number:  
Date: 11.12.2006 11:40:32



Obr. 62. Schéma fotodetektoru



Elektronická tabule  
Fotodetektor

TITLE: lb\_photodetector\_upr

Document Number:

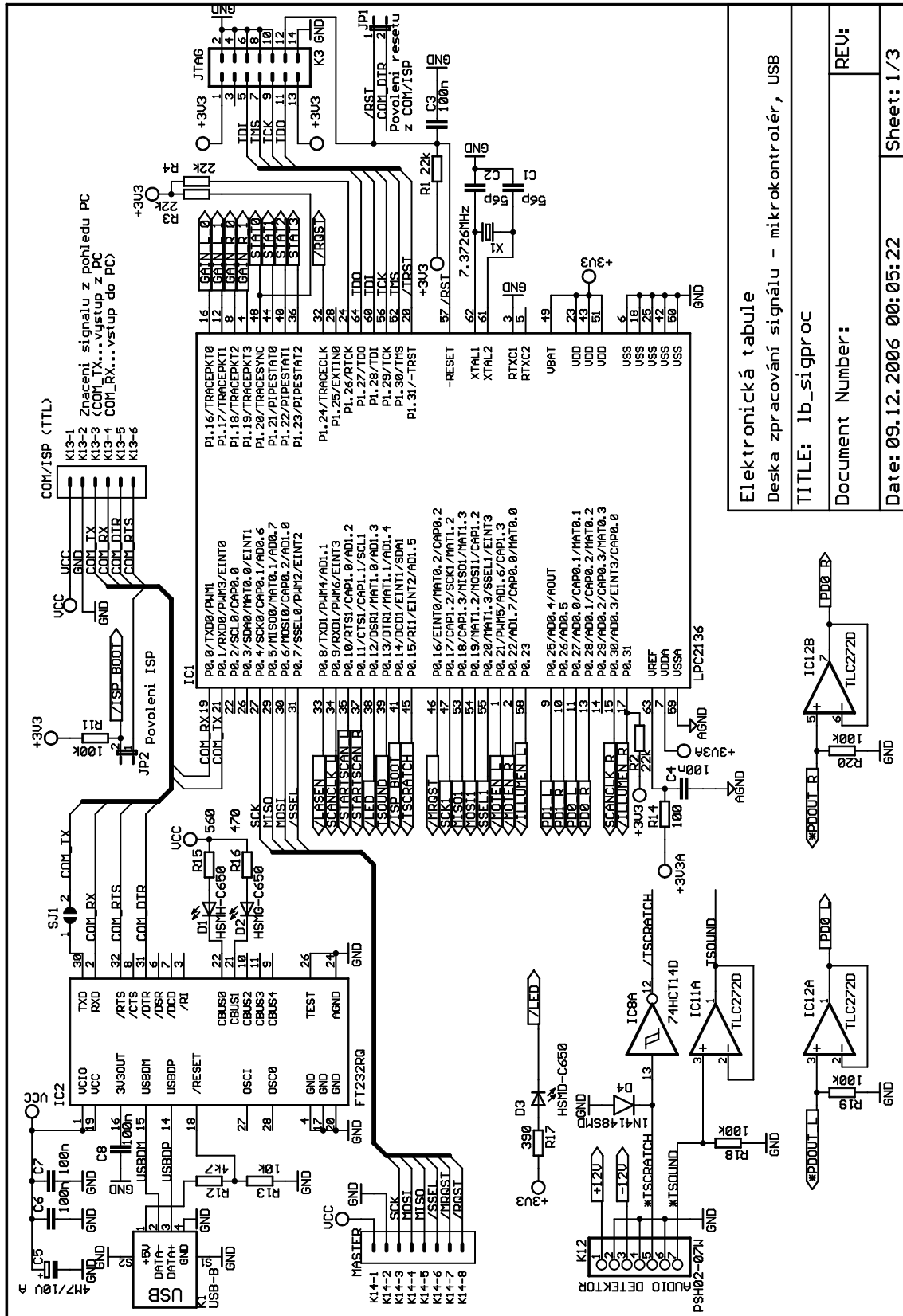
Date: 11.12.2006 11:32:02

REV:

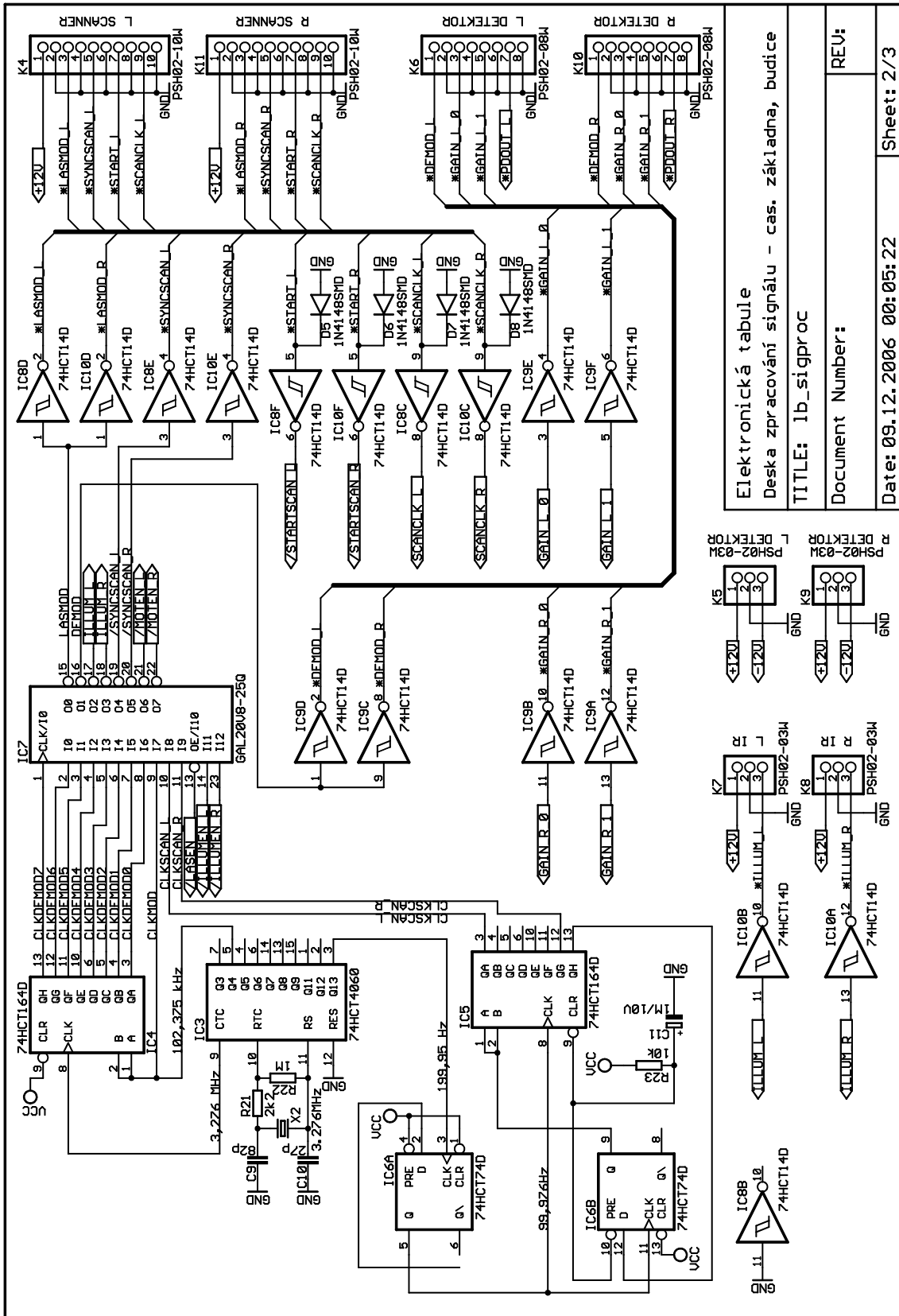
Sheet: 1/1

Obr. 63. Schéma fotodetektoru po úpravách během stavby a ožívování



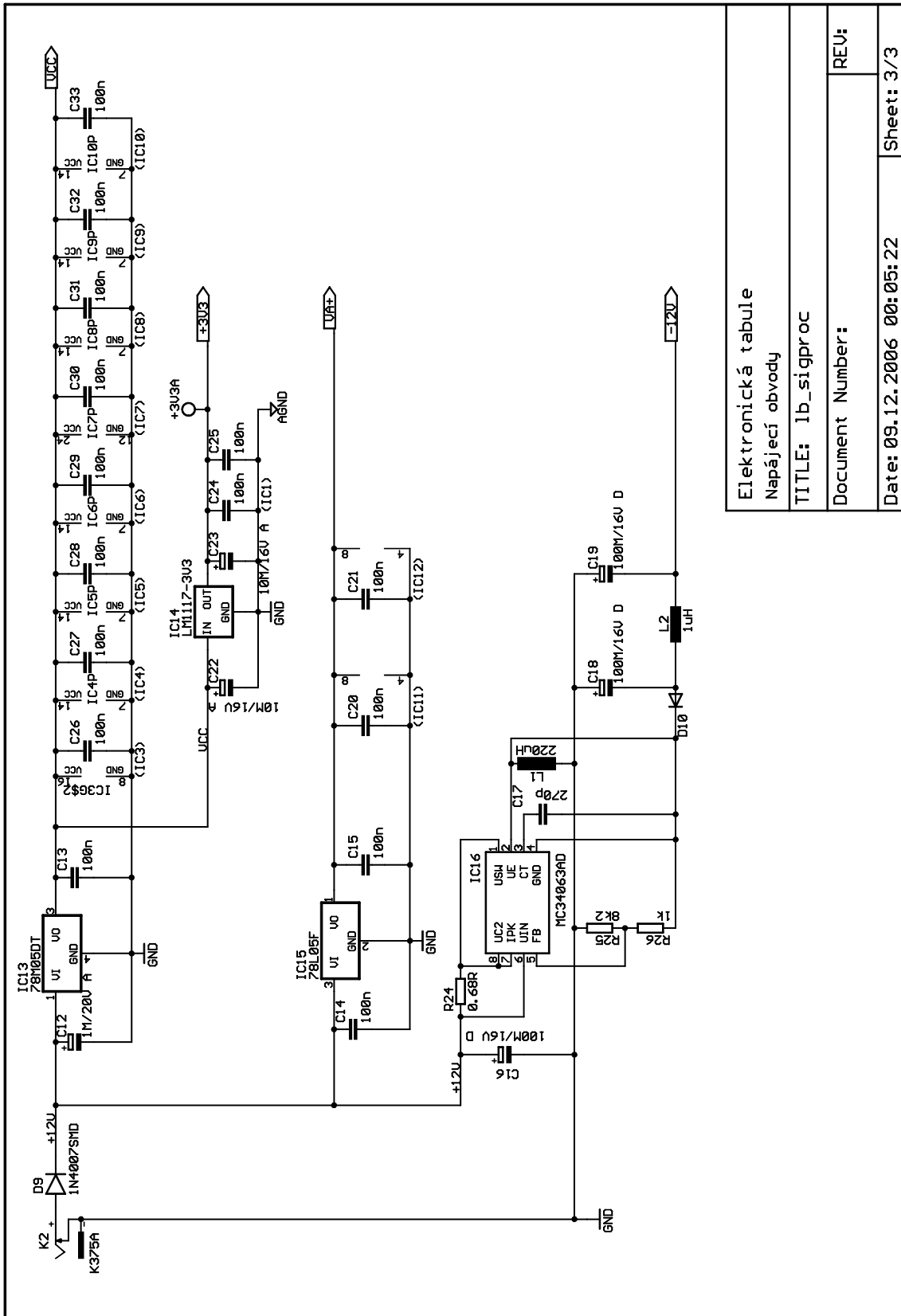


Obr. 64. Schéma modulu zpracování signálu a řízení – list 1



Elektronická tabule	
Deska zpracování signálu - čas. základna, budice	
TITLE: lb_sigproc	
Document Number:	
REV:1	
Date: 09.12.2006 00:05:22	Sheet: 2/3

Obr. 65. Schéma modulu zpracování signálu a řízení – list 2



Elektronická tabule	
Napájecí obvody	
TITLE: 1b_sigproc	
Document Number:	REV:
Date: 09.12.2006 00:05:22	Sheet: 3/3

Obr. 66. Schéma modulu zpracování signálu a řízení – list 3

## B Výpis definičního souboru IC7 desky zpracování signálu a řízení

Následující výpis je obsahem souboru .pld pro návrhový systém WinCUPL, z něž byl vygenerován JEDEC souboru pro naprogramování obvodu GAL20V8, sloužícího jako výstupní řadič hodinových a synchronizačních signálů (IC7 na desce zpracování signálu a řízení).

```
Name      LaserBoard ;
PartNo    00 ;
Date      25.11.2006 ;
Revision  00 ;
Designer  Ivan Stancl ;
Company   Ivan Stancl ;
Assembly  None ;
Location  None;
Device    g20v8a;
```

```
/*
*****
/* Obvod ridici logiky desky SigProc
*****
*/
```

```
/** Inputs **/
```

```
Pin 1 = CLKDEM0D7; /* hodinovy signal demodulace - posun o 8 st. */
Pin 2 = CLKDEM0D6; /* hodinovy signal demodulace - posun o 7 st. */
Pin 3 = CLKDEM0D5; /* hodinovy signal demodulace - posun o 6 st. */
Pin 4 = CLKDEM0D4; /* hodinovy signal demodulace - posun o 5 st. */
Pin 5 = CLKDEM0D3; /* hodinovy signal demodulace - posun o 4 st. */
Pin 6 = CLKDEM0D2; /* hodinovy signal demodulace - posun o 3 st. */
Pin 7 = CLKDEM0D1; /* hodinovy signal demodulace - posun o 2 st. */
Pin 8 = CLKDEM0D0; /* hodinovy signal demodulace - posun o 1 st. */
Pin 9 = CLKMOD; /* hodinovy signal modulace laseru */
Pin 10 = CLKSCAN_L; /* synchronizacni signal leveho scanneru */
Pin 11 = CLKSCAN_R; /* synchronizacni signal praveho scanneru */
Pin 13 = !LASEN; /* povolovaci signal modulace laseru */
Pin 14 = !ILLUMEN_L; /* povolovaci signal leveho IR osvetlovace */
Pin 23 = !ILLUMEN_R; /* povolovaci signal praveho IR osvetlovace */
Pin 21 = !MOTEN_L; /* povolovaci signal leveho motoru scanneru */
Pin 22 = !MOTEN_R; /* povolovaci signal praveho motoru scanneru */
```

```
/** Outputs **/
```

```
Pin 15 = LASMOD;      /* modulacni signal laseru a IR osvetlovacu */  
Pin 16 = DEMOD;      /* demodulacni signal */  
Pin 17 = ILLUM_L;    /* modulacni signal leveho IR osvetlovace */  
Pin 18 = ILLUM_R;    /* modulacni signal praveho IR osvetlovace */  
Pin 19 = !SYNCSCAN_L; /* synchron. signal leveho motoru scanneru */  
Pin 20 = !SYNCSCAN_R; /* synchron. signal praveho motoru scanneru */
```

```
/** Equations **/
```

```
LASMOD = CLKMOD # !LASEN;  
/* spolecny modulacni signal pro oba lasery; plny vykon laseru je  
pro LASMOD=0; v klidu (LASMOD=1) vyzaruje laser pouze klidovy  
vykon;  
pri povoleni sleduje LASMOD modulacni hodiny, pri zablockovani  
musi byt 1, proto je hradlovani provedeno log. souctem  
s negovanyim povolovacim signalem */
```

```
DEMOD = !CLKMOD;  
/* predpis pro demodulacni signal; musi byt pripojen k takovemu ze  
signalu CLKDEMODOx, aby fazovy posuv mezi detekovanyim a demodulacnim  
signalem byl idealne nulovy; volba signalu CLKDEMODOx predstavuje  
posuv 0..T/4; zamena CLKMOD/CLKDEMODOx umoznuje volit znamenko posuvu  
negaci CLKDEMODOx je mozne posuv upravit o T/2 */
```

```
ILLUM_L = CLKMOD & ILLUMEN_L;  
/* modulacni signal pro levy pomocny osvetlovac  
hradlovany signalem ILLUMEN_L */
```

```
ILLUM_R = CLKMOD & ILLUMEN_R;  
/* modulacni signal pro pravy pomocny osvetlovac  
hradlovany signalem ILLUMEN_R */
```

```
SYNCSCAN_L = CLKSCAN_L & MOTEN_L;  
/* synchronizacni signal pro levy motor scanneru  
hradlovany signalem MOTEN_L */
```

```
SYNCSCAN_R = CLKSCAN_R & MOTEN_R;  
/* synchronizacni signal pro pravy motor scanneru
```

hradlovany signalem MOTEN\_R \*/