



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

# NÁVRH A REALIZACE ŘÍDICÍ ELEKTRONIKY PRO MIKROPOZIČNÍ SYSTÉM UNIVERSÁLNÍHO HROTOVÉHO MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ

DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE DRIVE UNIT  
FOR UNIVERSAL TIPS MEASUREMENT MICROPOSITIONING SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

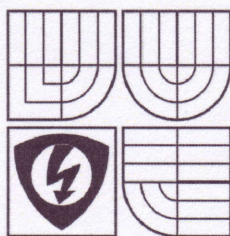
PAVEL ZEMAN

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL PAVLÍK

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Mikroelektronika a technologie

**Student:** Zeman Pavel

**Ročník:** 3

**ID:** 77819

**Akademický rok:** 2007/08

**NÁZEV TÉMATU:**

## Návrh a realizace řídicí elektroniky pro mikropoziční systém universálního hrotového měřicího zařízení

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Návrhněte a realizujte systém pro řízení krokových a stejnosměrných motorů mikroposunů. Jako snímače polohy použijte CCD čip. Systém realizujte jako modulární s hlavní řídicí jednotkou a podřízenými moduly. Pro vzájemnou interakci mezi moduly specifikujte komunikační protokol vystavěný na sériovém synchnonním rozhraní.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 5.10.2007

**Termín odevzdání:** 30.5.2008

**Vedoucí projektu:** Ing. Michal Pavlík

**prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.**

*předseda oborové rady*



**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

# LICENČNÍ SMLOUVA

## POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

### 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Pavel Zeman  
Bytem: náměstí Komenského 194, 56112, Brandýs nad Orlicí  
Narozen/a (datum a místo): 6.1.1986, Ústí nad Orlicí

(dále jen "autor")

a

### 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 244/53, 60200 Brno 2  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
Ing. Zdenka Rozsivalová

(dále jen "nabyvatel")

## Článek 1

### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
- diplomová práce
- bakalářská práce

jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Návrh a realizace řídicí elektroniky pro mikropoziční systém  
universálního hrotového měřicího zařízení

Vedoucí/školitel VŠKP: Ing. Michal Pavlík

Ústav: Ústav mikroelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: .....

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- tištěné formě - počet exemplářů 2
- elektronické formě - počet exemplářů 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## Článek 2

### Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevydělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## Článek 3

### Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: .....

.....

Nabyvatel

.....

Autor

## Abstrakt

Práce se zabývá problematikou snímání polohy a řízení pohybu mikropozičního zařízení. Jejím cílem je navrhnout a zkonstruovat řídicí elektroniku pro mikropoziční systém universálního hrotového měřicího zařízení, které může být využito například pro měření parametrů struktur tlustovrstvých a tenkovrstvých technologií. Parametry substrátu budou měřeny prostřednictvím měřicích hrotů. Ty musí být zaměřeny na měřenou pozici s vysokou přesností, která je zajištěna použitím krokových motorů. Pro pohyb pojezdu s vlastním substrátem je použito stejnosměrných motorů. Pozice pojezdu je snímána ve dvou osách optickými CCD snímači polohy. Práce zahrnuje i návrh řídicího programu pro mikrokontrolery všech navržených elektronických systémů, jejichž činnost je řízena prostřednictvím vybrané sériové sběrnice.

## Abstract

This work deals with design and construction of the drive unit for universal tips measurement micropositioning system. Measurement system can be used for measuring parameters of structures as thick film layers and thin film layers. The parameters of substrate will be measured by measuring tips. These tips must be fixed on target position by using stepper motors with high accuracy. For movement of substrate will be used two direct-current motors. Position of this substrate is scanned in two axes by two optical CCD chips. This work contains the proposal of software for all used microcontrollers. Activity of system is controlled by certain serial bus.

## Klíčová slova

Poziční systém, CCD chip, mikrokontroler.

## Keywords

Positioning system, CCD chip, microcontroller.

## Bibliografická citace práce

ZEMAN, P. *Návrh a realizace řídicí elektroniky pro mikropoziční systém universálního hrotového měřicího zařízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 72 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Pavlík.

## Prohlášení autora o původnosti díla

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh a realizace řídicí elektroniky pro mikropoziční systém universálního hrotového měřicího zařízení jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 25. května 2008

.....  
podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Pavlíkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 25. května 2008

.....  
podpis autora

## OBSAH

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 ÚVOD</b> .....   | <b>12</b> |
| <b>2 TEORETICKÉ POZNATKY</b> .....                                | <b>13</b> |
| 2.1 SNÍMAČE POLOHY A ÚHLU NATOČENÍ.....                           | 13        |
| 2.1.1 <i>Optický inkrementální snímač polohy</i> .....            | 13        |
| 2.1.2 <i>Lineární induktivní snímač polohy</i> .....              | 14        |
| 2.1.3 <i>Magnetický snímač úhlu natočení</i> .....                | 15        |
| 2.1.4 <i>Optoelektronický CCD snímač polohy</i> .....             | 16        |
| 2.2 STEJNOSMĚRNÝ MOTOR.....                                       | 18        |
| 2.2.1 <i>Princip činnosti stejnosměrného DC motoru</i> .....      | 18        |
| 2.2.2 <i>Princip činnosti stejnosměrného EC motoru</i> .....      | 19        |
| 2.2.3 <i>Řízení otáček stejnosměrného DC motoru</i> .....         | 19        |
| 2.3 KROKOVÝ MOTOR.....  | 20        |
| <b>3 VÝBĚR ŘEŠENÍ A NÁVRH ŘÍDICÍ ELEKTRONIKY</b> .....            | <b>23</b> |
| 3.1 VÝBĚR POHONŮ PRO MIKROPOZIČNÍ SYSTÉM A JEJICH ŘÍZENÍ.....     | 23        |
| 3.2 ELEKTRONIKA PRO ŘÍZENÍ POHYBU POJEZDU SUBSTRÁTU.....          | 25        |
| 3.2.1 <i>Detekce polohy pojezdu substrátu</i> .....               | 25        |
| 3.2.2 <i>Řídicí mikrokontroler ATmega16</i> .....                 | 26        |
| 3.2.3 <i>Výkonová část pro řízení stejnosměrných motorů</i> ..... | 27        |
| 3.3 ELEKTRONIKA PRO ŘÍZENÍ POHYBU MĚŘICÍCH HROTŮ.....             | 30        |
| 3.4 KOMUNIKACE MEZI ELEKTRONICKÝMI ZAŘÍZENÍMI.....                | 32        |
| 3.4.1 <i>Sběrnice SPI</i> .....                                   | 32        |
| 3.4.2 <i>Rozhraní JTAG</i> .....                                  | 33        |
| 3.5 POSUN SUBSTRÁTU V HORIZONTÁLNÍM SMĚRU.....                    | 33        |
| 3.6 ROZŠÍŘENÍ SYSTÉMU.....  | 33        |
| <b>4 DOKUMENTACE</b> .....  | <b>34</b> |
| 4.1 ELEKTRONIKA PRO ŘÍZENÍ POHYBU POJEZDU SUBSTRÁTU.....          | 34        |
| 4.2 ELEKTRONIKA PRO ŘÍZENÍ POHYBU MĚŘICÍCH HROTŮ.....             | 34        |
| <b>5 PROGRAMY PRO ŘÍDICÍ ELEKTRONIKU</b> .....                    | <b>36</b> |
| 5.1 PROGRAM PRO ŘÍDICÍ ELEKTRONIKU POHYBU POJEZDU SUBSTRÁTU.....  | 36        |
| 5.1.1 <i>Inicializace periférií mikrokontroleru</i> .....         | 37        |
| 5.1.2 <i>Inicializace snímačů polohy</i> .....                    | 37        |
| 5.1.3 <i>Zpracování dat ze snímačů polohy</i> .....               | 37        |
| 5.1.4 <i>Řízení pohybu pojezdu, režimy činnosti motorů</i> .....  | 38        |
| 5.1.5 <i>Komunikační rozhraní SPI a použitý protokol</i> .....    | 39        |
| 5.1.6 <i>Přehled příkazů rozhraní SPI</i> .....                   | 40        |
| 5.2 PROGRAM PRO ŘÍDICÍ ELEKTRONIKU POHYBU MĚŘICÍCH HROTŮ.....     | 43        |
| 5.2.1 <i>Princip činnosti programu</i> .....                      | 44        |
| 5.2.2 <i>Popis použitého algoritmu</i> .....                      | 45        |
| 5.2.3 <i>Přehled příkazů rozhraní SPI</i> .....                   | 47        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>6 ZÁVĚR .....</b>   | <b>50</b> |
| 6.1 DOSAŽENÉ PARAMETRY SYSTÉMU POJEZDU SUBSTRÁTU PO KALIBRACI ZAŘÍZENÍ ... | 50        |
| 6.2 DOSAŽENÉ PARAMETRY SYSTÉMU MĚŘICÍCH HROTŮ .....                        | 50        |
| 6.3 SHRUTÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ .....                                       | 50        |
| 6.4 MOŽNOSTI ROZŠÍŘENÍ MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ .....                             | 50        |
| <b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>                                       | <b>51</b> |
| <b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>  | <b>53</b> |

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|   |    |
|---|----|
| <b>Obr. 2.1:</b> Princip funkce optického inkrementálního snímače [3].....  | 13 |
| <b>Obr. 2.2:</b> Výstupní signály A, B optického inkrementálního snímače [1] .....                                    | 14 |
| <b>Obr. 2.3:</b> Princip indukčního snímače polohy .....  | 14 |
| <b>Obr. 2.4:</b> Příklad indukčních snímačů polohy [5].....   | 15 |
| <b>Obr. 2.5:</b> Příklad magnetického snímače úhlu natočení [6] .....   | 16 |
| <b>Obr. 2.6:</b> Příklad magnetického snímače úhlu natočení ve formě čipu [6] .....                                   | 16 |
| <b>Obr. 2.7:</b> Zvětšený optoelektronický CCD snímač počítačové myši [7].....  | 17 |
| <b>Obr. 2.8:</b> Příklad vícepólového rotoru u DC motoru – mechanický komutátor v levé části ...                      | 18 |
| <b>Obr. 2.9:</b> Stejnoseměrný EC motor – vlevo snímací část pro elektronickou komutaci [9].....                      | 19 |
| <b>Obr. 2.10:</b> Princip mostového zapojení čtyř spínačů (H-most) [11] .....   | 20 |
| <b>Obr. 2.11:</b> Stator krokového motoru a rotor s velkým množstvím pólových nástavců [13] ..                        | 21 |
| <b>Obr. 2.12:</b> Princip unipolárního řízení krokového motoru [14] .....   | 21 |
| <b>Obr. 2.13:</b> Princip bipolárního řízení krokového motoru [14] .....  | 22 |
| <b>Obr. 3.1:</b> Blokový diagram elektroniky pro řízení DC motorů .....   | 25 |
| <b>Obr. 3.2:</b> Mikrokontroler ATmega16 v provedení TQFP [15].....   | 26 |
| <b>Obr. 3.3:</b> Blokové schéma mikrokontrolerů s architekturou AVR [15].....   | 27 |
| <b>Obr. 3.4:</b> Zapojení H-mostu pro řízení DC motoru .....  | 28 |
| <b>Obr. 3.5:</b> Spínací elektronika krokových motorů .....   | 31 |
| <b>Obr. 3.6:</b> Princip komunikace prostřednictvím SPI [18].....   | 32 |
| <b>Obr. 5.1:</b> Blokový diagram programu pro řídicí elektroniku pohybu pojezdu substrátu .....                       | 36 |
| <b>Obr. 5.2:</b> Ilustrativní zobrazení trajektorie pojezdu, který bude měnit svou pozici .....                       | 38 |
| <b>Obr. 5.3:</b> Protokol popisující přenos dat mezi nadřazeným řídicím systémem (masterem)<br>a zařízením slave..... | 40 |
| <b>Obr. 5.4:</b> Krokový motor pracující v režimu přesnosti č.1.....  | 44 |
| <b>Obr. 5.5:</b> Charakteristika natočení rotoru krokového motoru v závislosti<br>na střídě generovaného signálu..... | 47 |

# 1 Úvod

V dnešní době se klade důraz na miniaturizaci a s ní spojenou přesnost používaných zařízení, a to nejen v elektrotechnice a ve strojírenském průmyslu, ale i v dalších průmyslových odvětvích. Například v mikroelektronice se dnes běžně používají technologické postupy pro výrobu čipů s rozlišením 45nm, obráběcí stroje ve strojírenství pracují v řádech stovek nanometrů (broušení čoček) a podobně. Do budoucna se bude miniaturizace ještě více rozšiřovat. Proto je důležité věnovat jí náležitou pozornost.

Náplní této práce je návrh a konstrukce řídicí elektroniky pro mikropoziční systém universálního hrotového měřicího zařízení. To může být využito například pro měření parametrů tlustovrstvých a tenkovrstvých technologií, čipů na waferech a jiných elektronických struktur.

Práce je rozčleněna do několika kapitol. Před vlastním návrhem celého zařízení je nutné se seznámit s možnostmi a problematikou snímání polohy a s řízením elektrických pohonů (kapitola 2 – Teoretické poznatky). Z těchto možností je vybráno vhodné řešení, na základě kterého je navržen řídicí elektronický systém (kapitola 3 – Výběr řešení a návrh řídicí elektroniky). V kapitole 4 – Dokumentace se nachází popis veškerých schémat, desek plošných spojů a ostatních příloh, které jsou umístěny na konci práce. Poslední kapitola (5 – Programy pro řídicí elektroniku) popisuje algoritmy použité při řízení navržených elektronických zařízení.

## 2 Teoretické poznatky

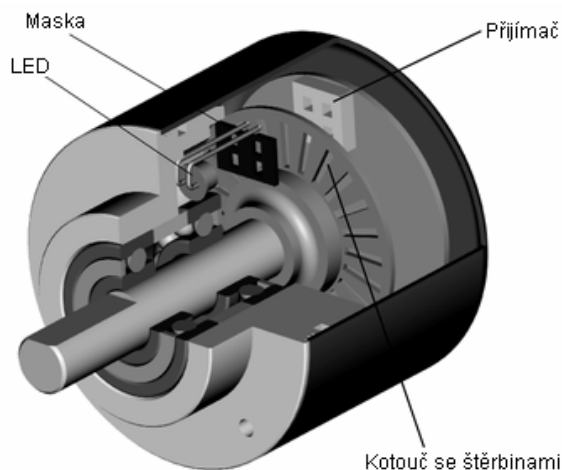
Při návrhu řídicí elektroniky pro mikropoziční systém bylo nutné nastudovat problematiku přesných mikroposunů a snímání polohy, které jsou pro přesné zaměření hrotu na danou pozici zásadní. Cílem této kapitoly je nastínit možnosti snímání polohy a výběr vhodných pohonů pro mikropoziční zařízení, přinést informace o nových možnostech a trendech v tomto směru. Na základě popsanych informací bude vybráno vhodné řešení pro vyvíjený systém.

### 2.1 Snímače polohy a úhlu natočení

Existuje mnoho obráběcích zařízení, tvářecích a dělicích strojů, jako jsou různé CNC frézky, soustruhy, vrtačky či svářečky, u kterých je nutné znát přesnou pozici obráběcích nožů, vrtáků, elektrod apod. U takovýchto zařízení je možné setkat se s rozmanitými způsoby snímání polohy.

#### 2.1.1 Optický inkrementální snímač polohy

Optický inkrementální snímač (IRC) [1] patří dnes k nejčastěji používaným snímačům polohy. Jeho předností je velká rozlišovací schopnost (závisí na rozlišení kotouče). Nevýhodou je možnost akumulace chyb při přeskočení štěrbin.

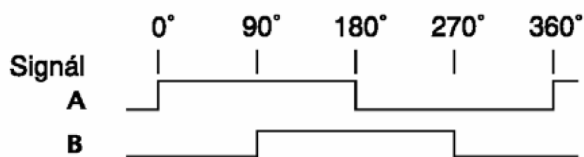


**Obr. 2.1:** Princip funkce optického inkrementálního snímače [3]

Vlastní snímač [2] se skládá z kotouče s řádově stovkami až tisíci po obvodu rovnoměrně rozmístěných štěrbin, které při jeho otáčení způsobují přerušování paprsku světla (obr. 2.1). Světelný paprsek je snímán přijímačem tvořeným dvojicí fototranzistorů. Počet štěrbin určuje rozlišení snímače a udává se jako počet impulsů na otáčku (např. 1024 imp/ot).

Fototranzistory jsou navzájem posunuty o polovinu úhlového rozlišení snímače. Díky tomu je možné určit směr pohybu otáčení a dokonce zvýšit rozlišení snímače až na čtyřnásobek základního rozlišení, určeného počtem štěrbin v kotouči.

Snímače se vyrábí s integrovanou elektronikou, která zesiluje a tvaruje signál od fototranzistoru obvykle do úrovně TTL. Dvojice výstupních signálů se označuje A, B (obr. 2.2).



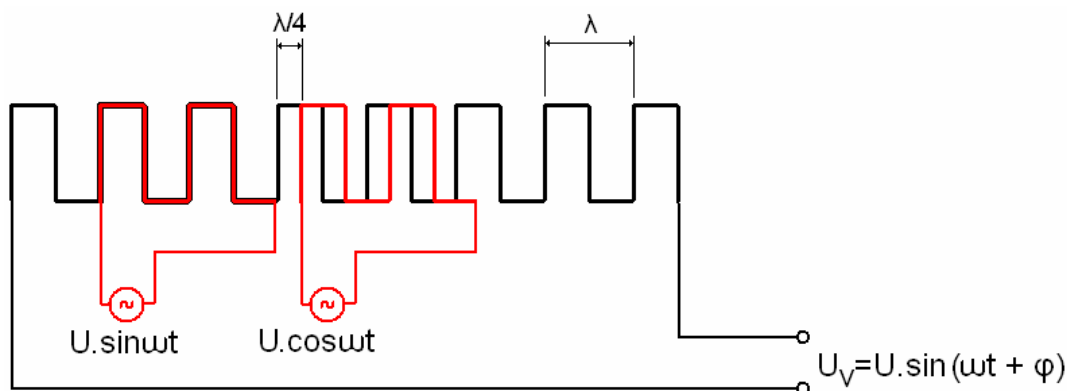
**Obr. 2.2:** Výstupní signály A, B optického inkrementálního snímače [1]

Tyto snímače jsou v dnešní době hojně využívány jak v tiskárnách a kuličkových myších, tak v různých průmyslových zařízeních. Proto je jejich cena relativně nízká, což platí pouze pro velkosériovou výrobu. Pro amatérské účely není snímač lacinou volbou, a to především, pokud je požadována vysoká citlivost snímače.

### 2.1.2 Lineární induktivní snímač polohy

Lineární induktivní snímače polohy [4] se vyznačují bezdotykovým snímáním a vysokou přesností a stabilitou elektrických parametrů.

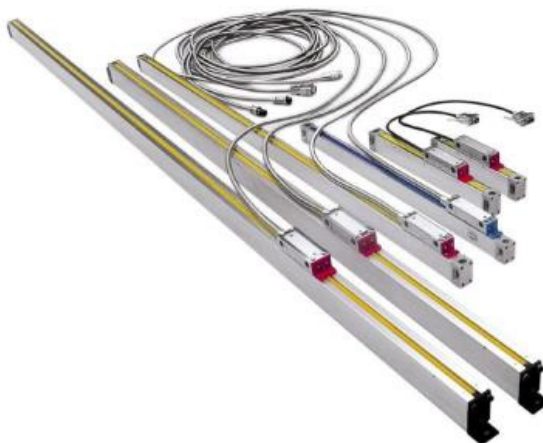
Lineární induktivní snímač je sestaven z měřítka a jezdce. Měřítka, je vyrobeno z ocelové planžety, na které je přilepena izolační podložka s obrazcem plošného měděného spoje ve tvaru pravidelného meandru s definovaným krokem. Jezdec, který se pohybuje nad měřítkem je též tvořen pravidelným obrazcem ve tvaru meandru a obsahuje dvě vinutí, které jsou posunuty o čtvrtinu periody meandru (o vzdálenost  $\lambda/4$ ) (obr. 2.3).



**Obr. 2.3:** Princip induktivního snímače polohy

První část vinutí jezdce je napájena sinusovým napětím, druhá napětím stejné amplitudy a frekvence, ale kosinového průběhu. To způsobí, že se do vinutí měřítka indukují napětí harmonického průběhu, které je fázově posunuto o úhel  $\varphi$  v závislosti na poloze jezdce. Zpoždění mezi vstupním napětím a výstupním napětím je mírou posunu jezdce. Velikost zpoždění je dále převedena na digitální údaj, se kterým již můžeme dále pracovat.

Jak může ve skutečnosti vypadat inдуктивní snímač polohy je vidět na obrázku (obr. 2.4).



**Obr. 2.4:** Příklad inдуктивních snímačů polohy [5]

Přesnost takovýchto snímačů se může pohybovat řádově i v jednotkách mikrometru. Jejich cena se však pohybuje řádově v tisících korun.

### **2.1.3 Magnetický snímač úhlu natočení**

Použití magnetického způsobu snímání je velice výhodné především díky konstrukční jednoduchosti a možnosti krytování snímače[6].

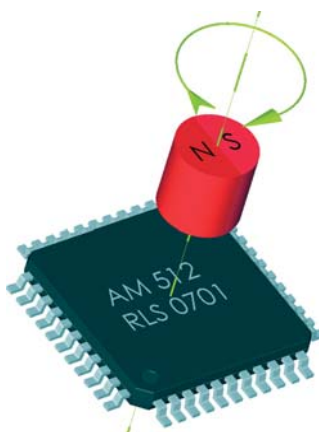
Na rozdíl od optických inkrementálních snímačů obsahuje magnetický snímač úhlu natočení takřka o polovinu méně konstrukčních prvků. Ve snímači nejsou použita ložiska ani jiné pohyblivé mechanické části. Snímač je tvořen snímacím čipem, který obsahuje hustou matici snímacích Hallových prvků. Pole Hallových snímacích prvků detekuje s vysokou citlivostí úhlovou pozici polarizovaného magnetu, který se otáčí nad povrchem snímače. Magnet může být připevněn například na hřídel motoru. Analogový signál z Hallových prvků je převeden na výstupní digitální polohový signál.

Citlivost takovýchto snímačů se pohybuje mezi 8-mi a 13-ti bity (256 až 8 192 údajů o poloze na jednu otáčku).



**Obr. 2.5:** Příklad magnetického snímače úhlu natočení [6]

Snímač se vyrábí v provedení, které je vhodné k okamžité instalaci do zařízení (obr. 2.5). Novinkou mezi těmito snímači je čip, který lze implementovat do vlastního plošného spoje (obr. 2.6).



**Obr. 2.6:** Příklad magnetického snímače úhlu natočení ve formě čipu [6]

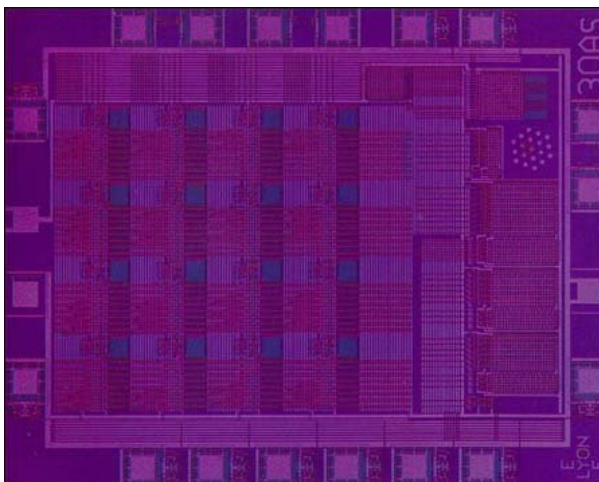
Tento způsob měření úhlu natočení lze považovat za velice praktický a do budoucna se jistě hojně rozšíří. V dnešní době jsou však tyto snímače horkou novinkou a tomu odpovídá i jejich cena.

#### **2.1.4 Optoelektronický CCD snímač polohy**

S tímto snímačem se setkal snad každý z nás. Je to nejdůležitější součást optické počítačové myši.

Dnešní optické myši [7] využívají optoelektronické čipy CCD, které jsou známé především z digitálních kamer a fotoaparátů. CCD čipy použité v myších se však od těch, které jsou použity ve fotoaparátech a kamerách značně liší (obr. 2.7). Využívají se zde senzory s mnohem menším počtem pixelů (matice od 16x16 po 30x30 pixelů). Tyto senzory snímají povrch podložky, po které se myš pohybuje. CCD snímače obecně dokáží snímat pouze jas, proto jsou nasnímané obrázky ve stupních šedi. Podložka je v místě snímání osvětlována LED diodou nebo laserovou diodou. Čip v myši poté snímá obraz

zaostřený čočkou, porovnává nasnímané obrázky a vyhodnocuje, jakým směrem a jak rychle se myš pohybuje.



**Obr. 2.7:** Zvětšený optoelektronický CCD snímač počítačové myši [7]

Vlastnosti snímání se odvíjí od několika parametrů snímače. Pro účely měření polohy je zásadní optické rozlišení myši, které je dáno vlastnostmi zaostřovací čočky a velikostí CCD senzoru. Rozlišení se udává v jednotkách DPI (někdy také CPI). Jedná se o počet pixelů na vzdálenost jednoho palce, které optický senzor „vidí“. Z údaje lze spočítat, jakou nejmenší vzdálenost je snímač schopen rozeznat

Dalším parametrem snímacího čipu je obnovovací frekvence. Na té závisí možná maximální rychlost pohybu myši. Obnovovací frekvence se pohybuje zhruba od 1 kHz po 10 kHz.

Někdy je možné se setkat s parametrem, který udává množství dat, jež senzor dokáže zpracovat. Tato hodnota je udána v jednotkách Mpx za sekundu. Z výše zmíněných parametrů ji lze spočítat vynásobením frekvence snímání a počtu u pixelů CCD senzoru.

## 2.2 Stejnosměrný motor

V této kapitole bude popsán princip činnosti stejnosměrného DC motoru klasické koncepce v porovnání s moderním EC motorem a způsoby řízení otáček stejnosměrných motorů.

### 2.2.1 Princip činnosti stejnosměrného DC motoru

V dnešní době se od používání stejnosměrného DC motoru upouští především z důvodu přítomnosti mechanického komutátoru. V modelářství a v jednoduchých amatérských aplikacích je však stále velmi hojně využíván především z důvodu konstrukční jednoduchosti a snadného řízení.

DC motor [8] obsahuje stator, který je tvořen permanentním magnetem a rotující kotvou. Ta je tvořena elektromagnetem s minimálně dvěma póly. Kotva je však obvykle tři a vícepólová, aby nevznikal problém s mrtvým úhlem motoru. Motor obsahuje mechanický rotační přepínač zvaný komutátor (obr. 2.8), který mění směr elektrického proudu a polaritu magnetického pole procházejícího kotvou vždy několikrát během každé otáčky (závisí na počtu pólových nastavců kotvy). Tím vzniká rotační pohyb motoru.



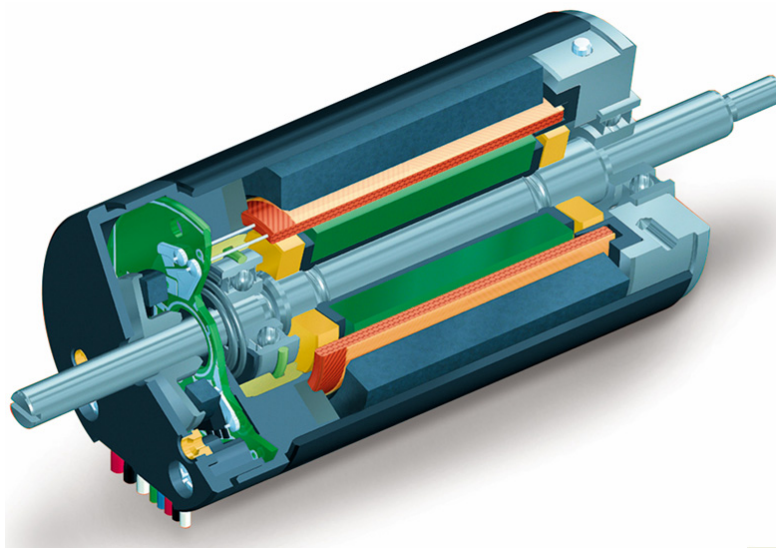
**Obr. 2.8:** Příklad vícepólového rotoru u DC motoru – mechanický komutátor v levé části

Výhodou motoru je kromě dostupnosti a nízké ceny možnost snadno měnit směr otáčení polaritou vstupního napětí a řídit otáčky změnou úrovně napětí. Motor bohužel obsahuje mechanický komutátor, který je zdrojem nejrůznějších elektrických rušení. Proto se dnes začínají uplatňovat moderní stejnosměrné EC motory.

### **2.2.2 Princip činnosti stejnosměrného EC motoru**

Motory EC [9] jsou stejnosměrné motory s elektronickou komutací, u kterých je odstraněn mechanický komutátor. Tím se mnohonásobně zvýší jejich životnost, která je omezena pouze ložisky.

Hlavní podstata motoru spočívá v tom, že je jeho vinutí přemístěno do statoru a součástí rotoru je naopak permanentní magnet (obr. 2.9). Proud do jednotlivých sekcí vinutí přepíná elektronika na základě informace o poloze rotoru. Tu poskytují snímače polohy, které jsou tvořeny třemi Hallovy sondami. Pro EC motory je tedy nezbytné použít řídicí jednotku.



**Obr. 2.9:** Stejnosměrný EC motor – vlevo snímací část pro elektronickou komutaci [9]

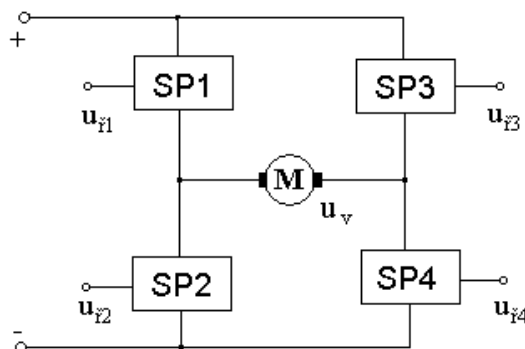
Nevýhodou motoru je vyšší pořizovací cena. Konstrukce EC motoru má však mezi malými stejnosměrnými motory dobrou budoucnost.

### **2.2.3 Řízení otáček stejnosměrného DC motoru**

Jak je z principu činnosti DC motoru známo [10], jeho otáčky lze regulovat změnou úrovně napájecího napětí. Tento způsob však není vhodný pro řízení mikrokontrolerem.

Mnohem lepší možností, jak řídit otáčky DC motoru je využít pulzně šířkovou modulaci PWM (Pulse Width Modulation). Jedná se vlastně o rychlou skokovou změnu napájecího napětí na motoru (vypnuto/zapnuto), přičemž se využívá změny střídy napájecího signálu. Řídicí tranzistory jsou vždy buď zcela otevřené, nebo uzavřené.

Pro řízení otáček pomocí PWM již existuje řada obvodů (tzv. H-můstky), které jsou schopny efektivního řízení motoru v různých režimech i se změnou smyslu otáčení motoru. Tyto obvody mají bohužel vyšší pořizovací cenu. Další možností je sestavit takovýto H-můstek z jednotlivých součástek. Princip funkce H-můstku je patrný z obrázku (obr. 2.10) [11]. Motor se roztočí, pokud sepneme spínací polovodiče v jedné z úhlopříček mostu.



**Obr. 2.10:** Princip mostového zapojení čtyř spínačů (H-most) [11]

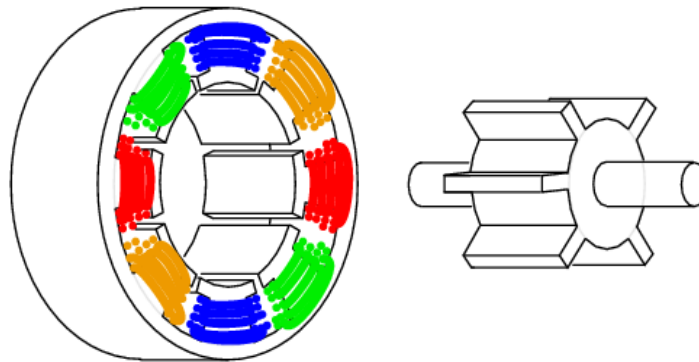
U řízení PWM se využívá vnitřní indukčnosti motoru, aby došlo k vyhlazení PWM signálu. Pokud však motor neobsahuje dostatečně velkou indukčnost, při nízkých frekvencích PWM hrozí jiskření na komutátoru, přehřívání a možné trvalé poškození motoru. To lze vyřešit přidáním externí indukčnosti, nebo zvýšením frekvence PWM. Lze se inspirovat například řídicí elektronikou pro DC motory od firmy Maxon. Jejich řízení pracuje na frekvenci 40 kHz – 50 kHz a navíc umožňuje i přidání externí indukčnosti.

### 2.3 Krokový motor

Předností krokových motorů [12] je, že pracují bez snímačů otáček nebo polohy, mají vysokou životnost a jsou bezúdržbové. Jejich největší nevýhodou je jejich stálý odběr proudu i při klidové poloze.

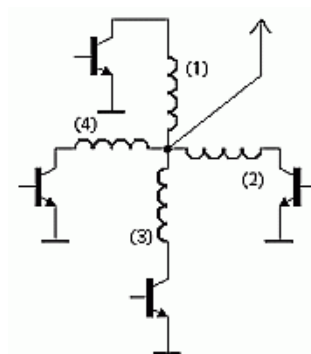
Pro profesionální průmyslové aplikace se dnes nejčastěji používají především třífázové krokové motory, které jsou posledním vývojovým typem v tomto odvětví. Existují i pětifázové krokové motory, které jsou dnes již přežitkem. Nejčastěji se však stále setkáme s dvoufázovými motory, které jsou pro amatérské účely nejlepší volbou především díky možnosti snadného řízení.

Krokové motory mají obvykle desítky až stovky poloh na jednu otáčku. Toho je docíleno rotorem, který je tvořen velkým množstvím pólových nástavců permanentních magnetů (obr. 2.11). Stator je tvořen magnetickými cívkami, které se postupně přepínají, aby se motor pohyboval.



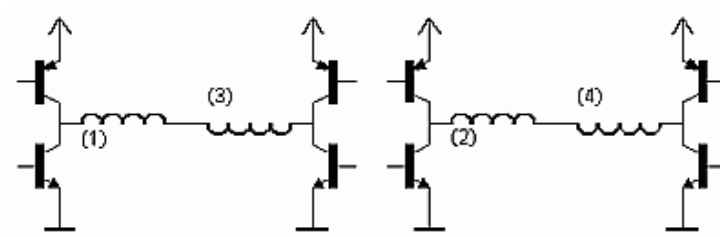
**Obr. 2.11:** Stator krokového motoru a rotor s velkým množstvím pólových nástavců [13]

Nyní bude popsáno, jakými způsoby lze takový 2-fázový krokový motor řídit. Rozlišujeme mezi unipolárním a bipolárním řízením a mezi jednofázovým řízením, dvoufázovým řízením a řízením s plným krokem.



**Obr. 2.12:** Princip unipolárního řízení krokového motoru [14]

Při unipolárním řízení [14] prochází v každém okamžiku proud právě jedinou cívkou (obr. 2.12). Při unipolárním řízení má motor nejmenší odběr, ale také poskytuje nejmenší točivý moment. Předností je jednoduché zapojení řídicí elektroniky. Na spínání každé cívky postačí jediný tranzistor. Vhodné je použít např. integrovaný obvod ULN2803, který obsahuje budiče pro krokové motory.



**Obr. 2.13:** Princip bipolárního řízení krokového motoru [14]

Pro bipolární řízení musíme zajistit, aby proud procházel dvěma protilehlými cívkami tak, aby měly navzájem opačně orientované magnetické pole. K tomu je zapotřebí zapojení, které sestává z dvou H-můstků (pro každou větev jeden) (obr. 2.13). Motor v bipolárním režimu poskytuje větší točivý moment, má však vyšší spotřebu. Bipolární zapojení je složitější, vhodným integrovaným obvodem pro realizaci bipolárního řízení je např. H-můstek L293D.

Při jednofázovém řízení magnetické pole generuje pouze jedna cívka (v případě unipolárního řízení).

Dvoufázové řízení je realizováno tak, že shodně orientované magnetické pole generují vždy dvě sousední cívky. Zvýší se tak točivý moment, ale také spotřeba energie.

Jednofázovému a dvoufázovému řízení se také říká 4-taktní. Pokud skombinujeme jednofázové a dvoufázové řízení, vznikne tzv. řízení s plným krokem (8mi-taktní řízení). Získáme tak dvojnásobný počet kroků na jednu otáčku motoru. Dochází však ke kolísání točivého momentu při otáčení rotoru.

### 3 Výběr řešení a návrh řídicí elektroniky

V této kapitole je popsán způsob činnosti vyvíjeného zařízení a jsou stanoveny požadavky na výběr jednotlivých pohonů a snímačů. Pro vybrané řešení je navržena řídicí elektronika.

#### 3.1 Výběr pohonů pro mikropoziční systém a jejich řízení

Do vyvíjeného zařízení je nutné implementovat pohony, které zajistí posun pojezdu substrátu jak ve vertikální rovině, tak horizontálně. Zařízení bude dále obsahovat 8 měřicích hrotů. Po přesném dostavení substrátu na danou pozici se každý z hrotů zaměří na určené místo substrátu. Poté dojde k přiblížení substrátu k měřicím hrotům tak, aby bylo možné realizovat dané měření. Na pohyb pojezdu substrátu i hrotů jsou kladeny jiné požadavky, proto je nutné zamyslet se nad několika různými kritérii, které jsou pro výběr vodného pohonu a jeho regulaci zásadní.

Pohyb substrátu ve vertikální rovině bude realizován ve dvou osách na vzdálenosti řádově desítek centimetrů s vysokou přesností. V horizontálním směru (přiblížení substrátu k měřicím hrotům) se bude jednat o pohyb řádově v jednotkách milimetru. Měřicí soustava se bude skládat z 8-mi miniaturních měřicích hrotů, které bude nutné po přesném nastavení substrátu na definovanou pozici zaměřit na jeho jednotlivé měřené části. Každým hrotem bude pohybováno samostatně, a to ve vertikální rovině (ve dvou osách) a velice jemně.

Nyní jsou stanoveny požadavky pro pohyb substrátu i jehliček, na jejichž základě zbývá vybrat konkrétní vhodné řešení - jednotlivé elektronické pohony, jejich řízení a regulaci.

Pro pohyb substrátu ve vertikální rovině se naskýtá několik různých řešení. Vhodné je inspirovat se u již existujících pozičních zařízení, jako jsou například různé CNC stroje. Zde se používají různé typy elektromotorů, které jsou regulovány induktivními, nebo inkrementálními snímači. Pro jednoduché a nízkopříkonové aplikace, jako je tato, je vhodné použít stejnosměrný motor. Další otázkou je, zda použít moderního způsobu a sáhnout po motoru typu MC, nebo zda zvolit DC motor klasické koncepce s mechanickým komutátorem. Primárním kritériem pro toto zařízení je však cena. Proto byl zvolen standardní typ DC motoru, který lze získat za rozumnou cenu v různých rozmanitých variantách. Jako nejvhodnější řešení se ukázal DC motor s mechanickým převodem. Ten nabízí kromě zvýšeného točivého momentu prostor pro přesnější regulaci polohy substrátu. Pro realizaci pohybu v obou osách vertikální roviny je zapotřebí použít dva takovéto motory.

DC motor však bez přesného řízení nedokáže nastavit pojezd na námi požadovanou pozici. Proto je nutné nalézt vhodný způsob jeho regulace. U CNC strojů se obvykle používá induktivních nebo inkrementálních snímačů polohy. Tyto snímače nejsou pro laboratorní zařízení levná záležitost, proto byla zvolena mnohem levnější varianta snímání polohy, která zaručuje dostatečnou přesnost. Tou je použití optoelektronického CCD snímače z laserové počítačové myši. Pro každou osu vertikálního pohybu pojezdu je použita jedna počítačová myš.

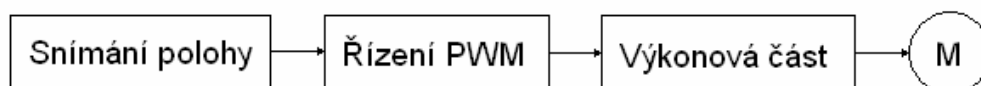
Pro pohyb měřicího hrotu ve vertikální rovině se nabízí použít dvou krokových motorů (pro každou osu jeden). Znamená to, že je zapotřebí celkem 16-ti krokových motorů. Pro tyto účely by bylo vhodné použít motory s řádově několika sty polohami na jednu otáčku. Krokové motory jsou však velice drahá záležitost, obzvláště v námi požadovaném množství. Proto byly použity lacinější dózické krokové motory, které se bohužel vyznačují nízkým počtem kroků na otáčku (konkrétně 48 kroků). S tímto problémem je nutné se vypořádat návržením vhodného řízení, kterým bude možné absenci kroků nahradit elektronicky.

Jak již bylo zmíněno, po dostavení pojezdu substrátu a zafixování poloh jednotlivých měřicích hrotů na požadovanou pozici je nutné přiblížit měřený substrát k těmto hrotům. Jako nejjednodušší řešení se ukázalo použití pneumatického posuvného zařízení.

Z výše uvedeného popisu je patrné, že je realizace zařízení velice náročná, což se týká nejen mechanické, ale i elektronické části.

### 3.2 Elektronika pro řízení pohybu pojezdu substrátu

V této části bude podrobněji rozebrán systém snímání pozice pojezdu substrátu pro řízení stejnosměrných motorů a elektronika, která toto řízení zajišťuje. Problematiku řízení DC motoru jsem rozdělil na určité dílčí části, znázorněné v blokovém diagramu (obr. 3.1). Tyto části budou rozebrány jednotlivě v této kapitole a pro každou z nich bude navrženo vhodné řešení.



Obr. 3.1: Blokový diagram elektroniky pro řízení DC motorů

#### 3.2.1 Detekce polohy pojezdu substrátu

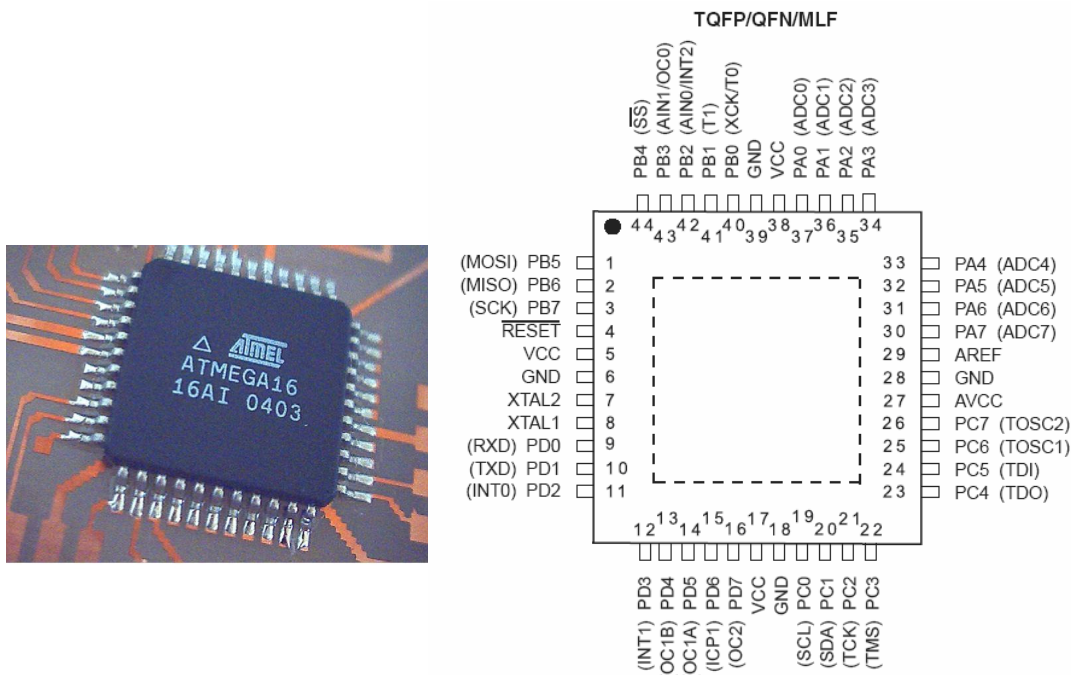
Jak již bylo zmíněno, pro detekci polohy pojezdu je využito dvou optoelektronických CCD snímačů z laserových počítačových myší. Ty jsou dále připojeny k mikrokontroleru, který realizuje řízení motoru PWM signálem. Nejjednodušším řešením bylo navrhnout elektroniku, která je kompatibilní s komunikačním protokolem myši (protokol PS/2). Nyní bude popsáno, jakým způsobem komunikuje myš s osobním počítačem a jak lze propojit řídicí jednotku tvořenou mikrokontrolerem se snímači.

PC komunikuje s myší prostřednictvím synchronního obousměrného protokolu [16], který umožňuje připojit jen jediné zařízení slave (myš). Důležitou vlastností je, že hodiny (CLK) generuje slave. Master (PC nebo v našem případě mikrokontroler) je však nadřazen a pomocí CLK signálu povoluje, zakazuje nebo přerušuje přenos dat. Hodinový kmitočet generovaný myší se pohybuje v rozmezí cca 10 kHz -16 kHz. Obě komunikační linky (data i CLK) jsou realizovány s otevřeným kolektorem. Z toho vyplývá, že je nutné připojit na obě linky zdvihací rezistory. V různých zdrojích lze zjistit, že jejich vhodná hodnota je asi 1 k $\Omega$  – 2,2 k $\Omega$ . Vyšší hodnoty zdvihacích odporů by už mohly nepříznivě tvarovat hrany signálů.

Tato pravidla je nutné dodržet i při komunikaci s mikrokontrolerem. Jak bylo řečeno, hodinový signál je generován myší. Nejvhodnější řešení je přivést signál do mikrokontroleru na vstup vnějšího přerušení. To velice usnadní návrh algoritmu obsluhy této komunikace a ta se tak stane bezpečnější. Při vyvolání přerušení, které je způsobeno hodinovým signálem myši, bude načtena logická úroveň na její datové lince. Jelikož má zvolený mikrokontroler dva zdroje vnějšího přerušení, bude použit každý zdroj přerušení pro jeden snímač. K oběma linkám (data i CLK) je nutné připojit zdvihací rezistory.

Interní pull-up rezistory v mikrokontroleru není vhodné použít, protože hodnota jejich odporu je příliš vysoká a komunikace by nemusela probíhat korektně. Proto byly připojeny externí 1 k $\Omega$  zdvihací rezistory (R21 – R24).

### 3.2.2 Řídící mikrokontroler ATmega16



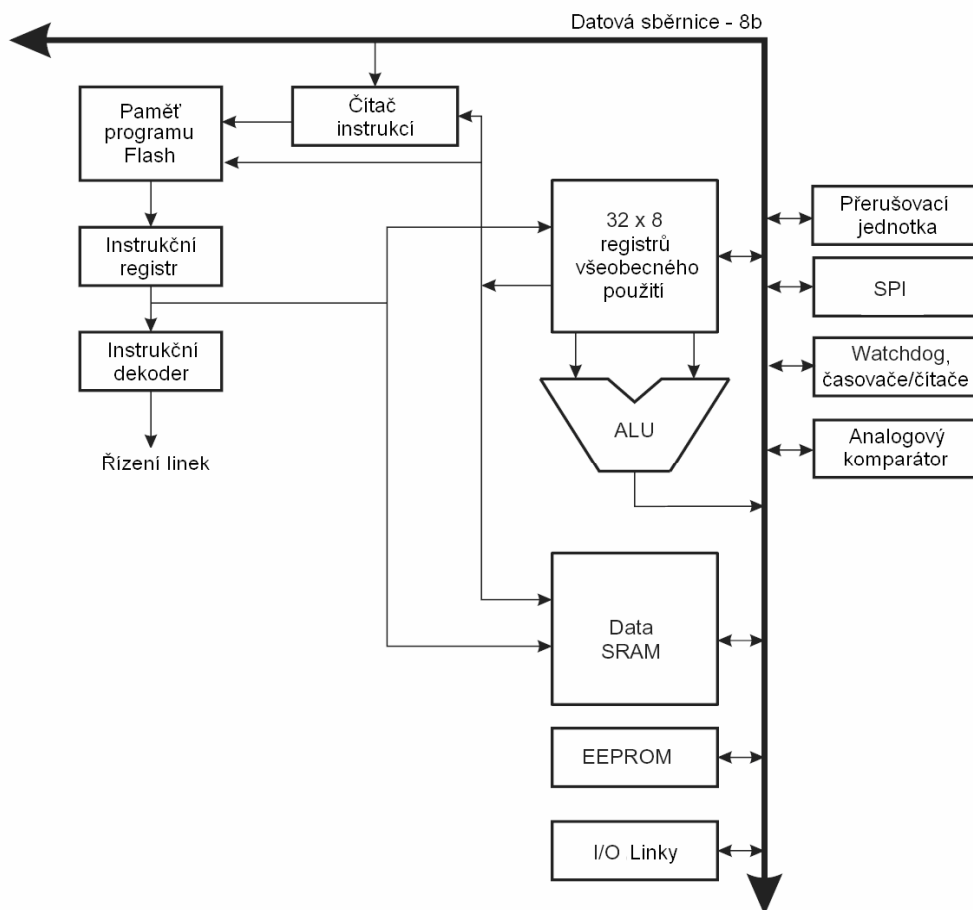
**Obr. 3.2:** Mikrokontroler ATmega16 v provedení TQFP [15]

Pro řízení celého elektronického zařízení, což obnáší především generování řídicího PWM signálu pro spínání DC motorů na základě vstupních dat od snímačů polohy, byl zvolen mikrokontroler ATmega16 (obr. 3.2) [15], který patří mezi zástupce rodiny AVR (obr. 3.3) od společnosti Atmel. Jedná se o 8-mi bitový mikrokontroler harvardské architektury s jádrem typu RISC. Je optimalizován pro vývoj ve vyšších programovacích jazycích.

Pro použití v této práci je vhodný z následujících důvodů. Mikrokontroler má dostačující počet vstupně/výstupních linek (konkrétně 32) a propracovaný systém přerušení (rozeznává celkem 19 zdrojů přerušení). Mikrokontroler obsahuje 16kB paměti programu typu Flash, což je dostatečná velikost pro tuto aplikaci. Pro data je určen 1kB paměti typu SRAM a 512B paměti EEPROM. Paměť Flash i EEPROM může být aktualizována prostřednictvím sběrnice SPI nebo JTAG.

Mikrokontroler obsahuje 3 čítače/časovače. Čítač/časovač č.0 a č.2 je 8-mi bitový, čítač/časovač č.1 je 16-ti bitový. Všechny časovače disponují vlastní předděličkou

a systémem přerušení Output Compare (umožňuje generovat přerušení při shodě obsahu čítače/časovače s danou hodnotou).



**Obr. 3.3:** Blokové schéma mikrokontrolerů s architekturou AVR [15]

Mikrokontroler je také vybaven obvodem USART pro asynchronní sériový příjem a vysílání dat a obvodem pro podporu synchronní sériové komunikace SPI. Obsahuje také rozhraní JTAG, jehož prostřednictvím lze obvod snadno programovat a ladit přímo v aplikaci.

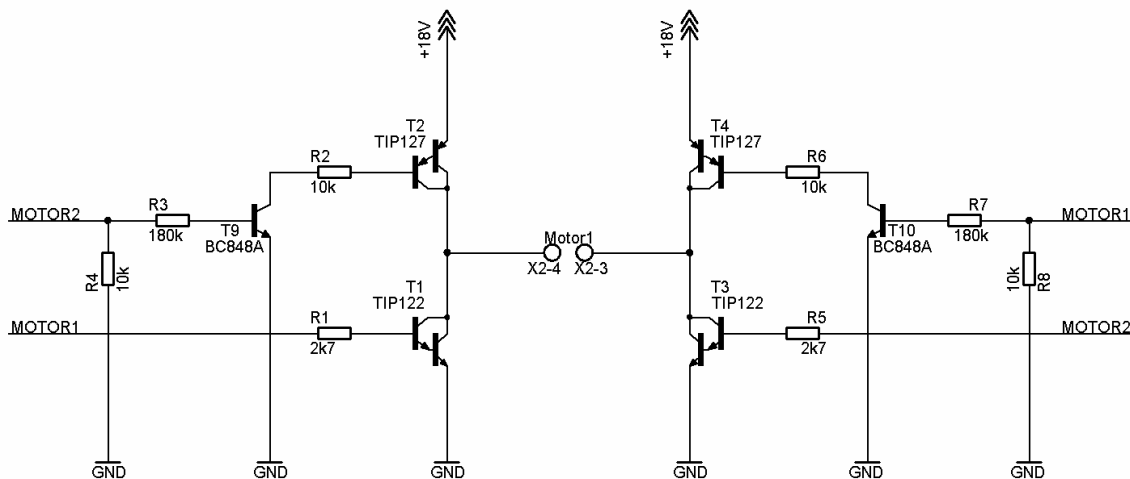
Jak je z výše uvedeného popisu patrné, jedná se o velmi dobře vybavený, rychlý mikrokontroler. Podrobnější informace lze získat v katalogovém listu obvodu [15].

### 3.2.3 Výkonová část pro řízení stejnosměrných motorů

Z popisu v kapitole „Teoretické poznatky“ je zřejmé, že nejvhodnějším způsobem regulace DC motorů je využití pulzně šířkové modulace PWM (pulse width modulation). O generování PWM signálu se stará použitý mikrokontroler.

Pro řízení rotace DC motoru oběma směry je zapotřebí využít H-mostu. V dnešní době lze zakoupit mnoho rozmanitých integrovaných obvodů, které jsou k řízení DC motorků určeny

a obsahují H-mosty. Jejich cena se však pohybuje řádově ve stovkách korun. Při návrhu řídicí elektroniky jsem nebyl limitován prostorem, aby bylo nezbytné využívat těchto integrovaných obvodů. Proto byla zvolena lacinější varianta - vytvořit H-most z jednotlivých součástek.



**Obr. 3.4:** Zapojení H-mostu pro řízení DC motoru

Na obrázku (obr. 3.4) je znázorněno použité schéma H-mostu. Signály MOTOR jsou připojeny přímo k mikrokontroleru, který pracuje s napětím 5V. Ke spínání motoru byly zvoleny výkonové darlingtonovy tranzistory. Ve spodní větvi NPN tranzistor TIP 122 (T1) a v horní větvi PNP tranzistor TIP127 (T2). Jelikož jsou tyto tranzistory použity jako spínače, je zapotřebí nastavit jejich pracovní bod do plné saturace.

Pracovní bod tranzistoru T1 je nastaven rezistorem R1 a signál MOTOR1 je dále připojen přímo na mikrokontroler. Parametry pro výpočet hodnoty rezistoru R1 jsou:

|   |                          |
|---|--------------------------|
| Maximální spínaný proud tranzistorem T1 (TIP122)          | $I_C = 1 \text{ A}$      |
| Proudový zesilovací činitel tranzistoru TIP122            | $h_{FE} > 1000$          |
| Napětí mezi bází a emitorem tranzistoru TIP122 v saturaci | $U_{BE} = 1,4 \text{ V}$ |
| Pracovní napětí mikrokontroleru                           | $U_{IC} = 5 \text{ V}$   |
| Proud do báze tranzistoru T1                              | $I_B$                    |
| Hodnota odporu bázevého rezistoru pro tranzistor T1       | R1                       |

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = \frac{1}{1000} = 1 \text{ mA} \quad (3.1)$$

$$R1 = \frac{U_{IC} - U_{BE}}{I_B} = \frac{5 - 1,4}{1 \cdot 10^{-3}} = 3,6 \text{ k}\Omega \quad (3.2)$$

Součástka TIP122 obsahuje kromě dvojice tranzistorů v darlingtonově zapojení ještě rychlou ochrannou diodu a také rezistory pro urychlení zavření tranzistoru a pro vytvoření předpětí, kterými také protéká určitá minimální hodnota proudu. Aby byl tranzistor zaručeně v plné saturaci, hodnota odporu byla zvolena nižší z řady, konkrétně  $R1 = 2,7 \text{ k}\Omega$ .

Nyní je nutné nastavit pracovní bod i pro PNP tranzistor T2 (TIP127). Jelikož je emitor tranzistoru T2 připojen na vyšší potenciál než řídicí mikrokontroler, je nutné použít k jeho spínání ještě jeden pomocný tranzistor (T9) (obr. 3.4). Na něj nejsou kladeny žádné výkonové požadavky, proto byl vybrán universální tranzistor BC848. Pracovní bod tranzistoru T2 je nastaven rezistorem R2 a pracovní bod tranzistoru T9 je nastaven rezistorem R3. Nyní je zapotřebí vypočítat hodnoty těchto rezistorů. Parametry pro jejich výpočet jsou:

|   |                              |
|---|------------------------------|
| Maximální spínaný proud tranzistorem T2 (TIP127)          | $I_{C(T2)} = 1 \text{ A}$    |
| Proudový zesilovací činitel tranzistoru TIP127            | $h_{FE(T2)} > 1000$          |
| Napětí mezi emitorem a bází tranzistoru TIP127 v saturaci | $U_{EB(T2)} = 1,4 \text{ V}$ |
| Napájecí napětí výkonové části                            | $U_V = 18 \text{ V}$         |
| Proudový zesilovací činitel tranzistoru BC848             | $h_{FE(T9)} = 100$           |
| Pracovní napětí mikrokontroleru                           | $U_{IC} = 5 \text{ V}$       |
| Proud tekoucí z báze tranzistoru T2 přes tranzistor T9    | $I_{B(T2)} = I_{C(T9)}$      |
| Hodnota odporu bázevého rezistoru pro tranzistor T2       | R2                           |
| Proud do báze tranzistoru T9                              | $I_{B(T9)}$                  |
| Hodnota odporu bázevého rezistoru pro tranzistor T9       | R3                           |

$$I_{B(T2)} = \frac{I_{C(T2)}}{h_{FE(T2)}} = \frac{1}{1000} = 1 \text{ mA} \quad (3.3)$$

$$R2 = \frac{U_V - U_{EB(T2)}}{I_{B(T2)}} = \frac{18 - 1,4}{1 \cdot 10^{-3}} = 16,6 \text{ k}\Omega \quad (3.4)$$

Součástka TIP127 obsahuje také kromě dvojice tranzistorů v darlingtonově zapojení ještě rychlou ochrannou diodu a rezistory pro urychlení zavření tranzistoru a pro vytvoření předpětí, kterými také protéká určitá minimální hodnota proudu. Při výpočtu bylo zanedbáno napětí  $U_{CE}$  tranzistoru T9. Aby byl tranzistor T2 zaručeně v plné saturaci, hodnota odporu byla zvolena nižší z řady, konkrétně  $R2 = 10 \text{ k}\Omega$ . Pro další výpočet je nutné zpětně dopočítat proud  $I_{B(T2)}$ .

$$I_{B(T2)} = I_{C(T9)} = \frac{U_V - U_{EB(T2)}}{R2} = \frac{18 - 1,4}{10000} = 1,66 \text{ mA} \quad (3.5)$$

$$I_{B(T9)} = \frac{I_{C(T9)}}{h_{FE(T9)}} = \frac{1,66 \cdot 10^{-3}}{100} = 16,6 \text{ } \mu\text{A} \quad (3.6)$$

$$R3 = \frac{U_{IC} - U_{BE(T9)}}{I_{B(T9)}} = \frac{5 - 0,7}{16,6 \cdot 10^{-6}} = 260 \text{ k}\Omega \quad (3.7)$$

Hodnota proudu do báze tranzistoru T9 vyšla velice nízká. Aby byl tranzistor T9 zaručeně v plné saturaci, byl zvolen nižší odpor z řady, konkrétně  $R3 = 180 \text{ k}\Omega$ .

Dále je zapotřebí ověřit, zda bude pouzdro (TO220) výkonových tranzistorů schopné vyzářit ztrátový výkon ve formě tepla bez chladiče. Z katalogového listu [17] lze vyčíst, že maximální ztrátový výkon tranzistoru nesmí přesáhnout 2 W, aby nemuselo být použito externí chlazení. Ze změřených závislostí je patrné, že při proudu  $I_C = 1 \text{ A}$  je úbytek napětí na tranzistoru  $U_{CE} = 0,8 \text{ V}$ . Jelikož je tranzistor řízen pomocí PWM, jeho ztrátový výkon vzroste asi o 20% stejnosměrného výkonu:

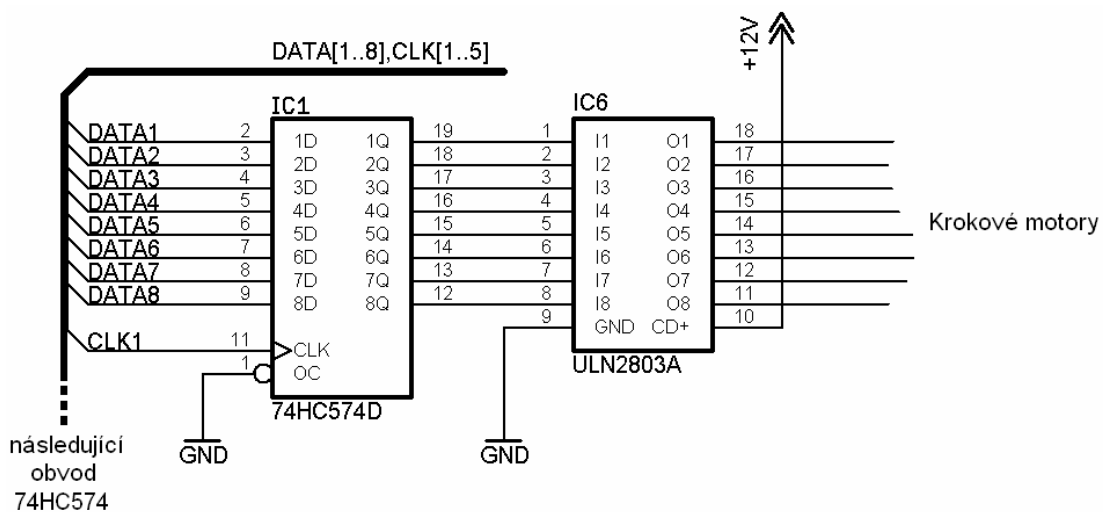
$$P = U_{CE} \cdot I_C \cdot 1,2 = 0,96 \text{ W} \quad (3.8)$$

Ztrátový výkon tranzistoru má v tomto případě dostatečný odstup od maximální hodnoty 2 W. Není proto zapotřebí použít externího chlazení.

### 3.3 Elektronika pro řízení pohybu měřicích hrotů

Pro účely řízení pohybu měřicích hrotů byl navržen elektronický systém, který ovládá 16 krokových motorů. Pro zjednodušení je každý motor řízen unipolárně (viz kapitola „Teoretické poznatky“). To znamená, že pro spínání jednoho krokového motoru by bylo zapotřebí čtyř výstupních signálů z mikrokontroleru. Pro řízení 16-ti krokových motorů by tento počet vzrostl na 64 signálů. Proto byla řídicí elektronika krokových motorů rozdělena na dvě identické DPS. Ani za použití dvou mikrokontrolerů by však nebylo možné řídit všechny motory. Proto bylo navrženo řešení, které snížilo počet řídicích signálů na minimum. Princip je patrný z obrázku (obr. 3.5).

V zapojení je využito integrovaného obvodu 74HC574, který obsahuje 8 klopných obvodů typu D. Všech 8 datových signálů je možné připojit k libovolnému množství takovýchto obvodů, přičemž s každým novým obvodem se zapojení rozšíří pouze o jeden řídicí signál CLK od řídicího mikrokontroleru. Jedním obvodem 74HC574 lze ovládat dva krokové motory, proto je na jednu řídicí DPS pro ovládání 8-mi krokových motorů zapotřebí použít čtyř těchto integrovaných obvodů.



**Obr. 3.5:** Spínací elektronika krokových motorů

Ke spínání krokových motorů je zapotřebí signál z klopných obvodů proudově posílit použitím nějakého výkonového spínacího prvku. Aby bylo možné vybrat správně dimenzovaný spínací prvek, je zapotřebí znát hodnotu proudu, který bude protékat každým vinutím krokového motoru. Tento proud lze spočítat z následujících známých parametrů:

Odpor jednoho vinutí krokového motoru  $R_V = 110 \Omega$

Napájecí napětí krokového motoru  $U_{CC} = 12 V$

$$I_V = \frac{U_{CC}}{R_V} = \frac{12}{110} = \underline{\underline{110 mA}} \quad (3.9)$$

V tomto případě se nabízí použít integrovaného obvodu ULN2803, který obsahuje 8 budičů pro takovéto účely. Jeho parametry zjištěné v katalogovém listu [17] jsou následující:

Vstupní napětí  $V_{IN} = \text{až } 30 V$

Výstupní proud jednoho kanálu obvodu  $I_{OUT} = 500 \text{ mA/kanál}$

Jeden obvod poslouží ke spínání dvou krokových motorů. Součástí jsou i rychlé diody (vývod CD+), které slouží jako ochrana proti napětovým špičkám opačné polarity při odpojení vinutí krokového motoru. Vývod je proto připojen na napájecí napětí krokových motorů (+12 V).

Pro řídicí elektroniku pohybu měřicích hrotů je opět využito mikrokontroleru ATmega16.

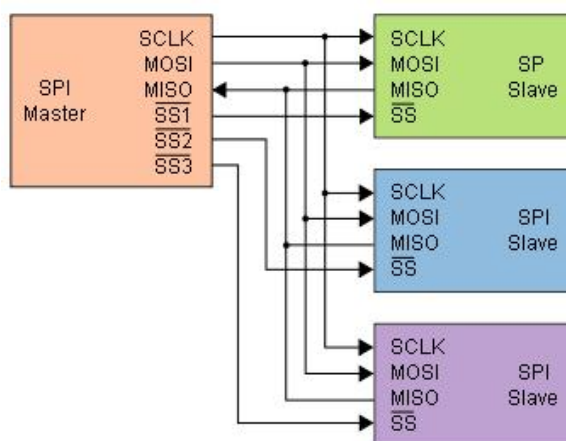
### 3.4 Komunikace mezi elektronickými zařízeními

Jelikož je systém složen z několika samostatných elektronických řídicích celků, je nutné zajistit jejich vzájemnou komunikaci. Pro účely ladění obslužných programů těchto řídicích zařízení musí být zajištěna komunikace řídicích mikrokontrolerů s osobním počítačem prostřednictvím programátoru.

#### 3.4.1 Sběrnice SPI

Pro komunikaci mezi řídicí elektronikou a nadřazeným řídicím systémem, byla zvolena sběrnice SPI [18]. Jedná se o synchronní sériovou linku, která obsahuje jedno řídicí zařízení (master) a více podřízených zařízení (slave). Použitý mikrokontroler ATmega16 je vybaven hardwarovou podporou komunikačního protokolu SPI, což ulehčí práci jeho jádru. Celé zařízení obsahuje jeden nadřazený řídicí systém (master), který bude propojen s osobním počítačem a má za úkol dále komunikovat s podřízenými zařízeními slave (řídicí elektronika pohybu pojezdu a měřicích hrotů).

Jakým způsobem probíhá komunikace prostřednictvím SPI je patrné z obrázku (obr. 3.6). Zařízení master nejdříve prostřednictvím signálu SS (slave select) vybere zařízení slave se kterým bude komunikovat. Synchronní komunikace je dosaženo použitím hodinového signálu CLK, který generuje zařízení master. Výměna dat je obousměrná a probíhá prostřednictvím vstupních a výstupních signálů MISO a MOSI.



Obr. 3.6: Princip komunikace prostřednictvím SPI [18]

### **3.4.2 Rozhraní JTAG**

Každé elektronické zařízení použité v tomto projektu, které je osazeno řídicím mikrokontrolerem, je také osazeno konektorem pro rozhraní JTAG. To slouží pro programování řídicího mikrokontroleru ATmega16 a také pro ladění vytvořeného programu přímo v aplikaci. V dnešní době je to jeden z nejrozšířenějších způsobů komunikace mezi programátorem a mikrokontrolerem.

### **3.5 Posun substrátu v horizontálním směru**

Po dostavení měřeného substrátu a umístění měřicích hrotů do měřené polohy je pro realizaci měření nezbytné přitisknout substrát na tyto hroty.

Jako optimální řešení se ukázalo použití pneumatického posuvného zařízení. Ventil převádějící vzduch do zařízení je ovládán vybraným kontaktem relé na desce řídicí elektroniky pro pohyb pojezdu substrátu.

### **3.6 Rozšíření systému**

Systém je navržen tak, aby jej bylo možné do budoucna dále rozšířit takovým způsobem, aby nemusely být přepracovány dosavadní desky plošných spojů. Do budoucna je v plánu montáž systému chlazení a ohřevu substrátu. Tyto systémy bude zajisté zapotřebí regulovat. Proto tyto účely byly při návrhu elektroniky připraveny celkem čtyři přepínací relé K1 – K4 (typ G5V2).

## 4 Dokumentace

Tato kapitola popisuje dokumentaci projektu, která se nachází v příloze práce. Dokumentace zahrnuje navržená elektronická schémata a všechny návrhy desek plošných spojů vyvíjeného elektronického zařízení, dále pak rozpisku použitých součástek a fotografie zařízení.

### 4.1 Elektronika pro řízení pohybu pojezdu substrátu

Elektronika pro řízení pohybu pojezdu je popsána schématy, které jsou rozděleny na tři výkresy.

Na prvním výkresu (obr. 1 příloha) je umístěn mikrokontroler ATmega16 (IC1), který řídí činnost celého zařízení. Dále se zde nachází konektor pro SPI komunikaci SV6 a programovací konektor JTAG (SV5). Konektory SV1 až SV4 lze využít do budoucna pro připojení optických závor (dorazové polohy). Pro připojení optoelektronických snímacích CCD senzorů slouží konektory X3 a X4. Na konektory SV7 a SV8 jsou připojeny volné vývody mikrokontroleru, což umožňuje rozšíření aplikace.

Druhý výkres (obr. 2 příloha) obsahuje schéma výkonové spínací elektroniky DC motorů. Vlastní motory jsou připojeny na konektor X2.

Na posledním výkresu (obr. 3 příloha) jsou umístěny tranzistory spínající čtyři přepínací relé, jejichž kontakty jsou připojeny na konektory SV9 až SV12. Dále je zde umístěn napájecí konektor X1 se vstupními kondenzátory C1 a C2.

Na základě návrhu byla vytvořena dvouvrstvá deska plošných spojů. Na obrázku (obr. 4 příloha) je zobrazena její spodní strana, a na dalším obrázku (obr. 5 příloha) je pohled na její horní stranu. Obrázek 6 přílohy znázorňuje osazovací plán DPS a na obrázku 7 přílohy je fotografie již osazené DPS.

Všechny použité součástky jsou zapsány v rozpisce součástek (tab. 1 příloha).

### 4.2 Elektronika pro řízení pohybu měřících hrotů

Elektronika pro řízení pohybu měřících hrotů je popsána schématy, které jsou rozděleny na tři výkresy.

Na prvním výkresu (obr. 8 příloha) je umístěn mikrokontroler ATmega16 (IC11), který řídí činnost celého zařízení. Dále je zde umístěn konektor pro SPI komunikaci SV6 a programovací konektor JTAG (SV5). Je zde také zapojení, které spíná pomocné signály (např. signalizační LED) pro jednotlivé moduly krokových motorů. To je tvořeno

integrovanými obvody IC5 a IC10 a pracuje na stejném principu, jako zapojení pro spínání krokových motorů. Na konektory SV8 jsou připojeny volné vývody mikrokontroleru, což umožňuje budoucí rozšíření aplikace.

Druhý výkres (obr. 9 příloha) obsahuje zapojení pro spínání krokových motorů. To je tvořeno integrovanými obvody s klopnými obvody typu D (IC1 – IC4) a integrovanými budiči (IC6 – IC9). Konektory SV1 – SV4 slouží pro připojení modulů s měřicími hroty. Jeden modul obsahuje dva krokové motory. Nevyužité vývody od těchto modulů jsou připojeny na konektor SV7, což umožňuje jejich rozšíření například o snímací senzory polohy hrotů.

Na posledním výkresu (obr. 10 příloha) je umístěn napájecí konektor X1 se vstupními kondenzátory C1 a C2. Dále jsou zde vstupní kondenzátory použitých integrovaných obvodů.

Z výkresu byla vytvořena dvouvrstvá deska plošných spojů. Na obrázku (obr. 11 příloha) je zobrazena její spodní strana, na dalším obrázku (obr. 12 příloha) pohled na horní stranu DPS. Obrázek (obr. 13 příloha) znázorňuje osazovací plán DPS, na obrázku (obr. 14 příloha) je fotografie osazené DPS. Pro řízení všech šestnácti krokových motorů je zapotřebí dvou takovýchto DPS.

Všechny použité součástky jsou zapsány v rozpisce součástek (tab. 2 příloha). Ta obsahuje součástky pouze pro jednu DPS.

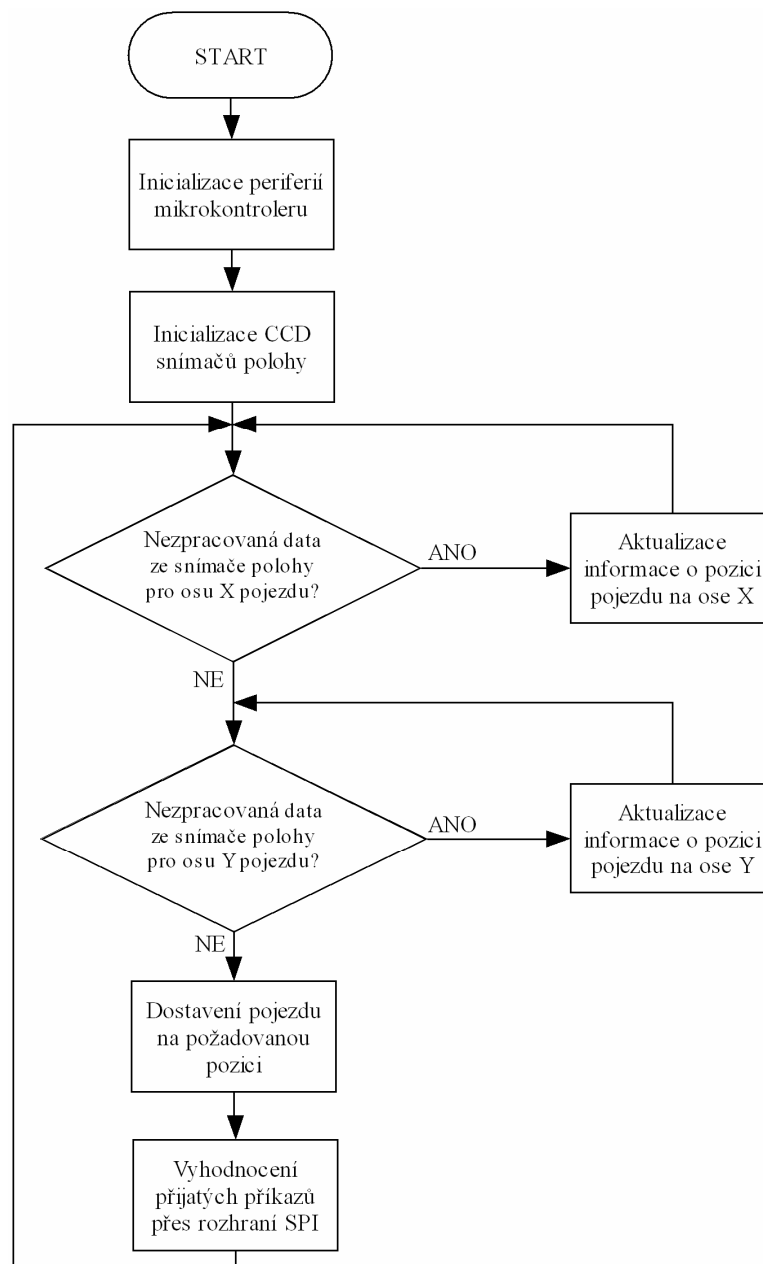
Fotografie celého zařízení, pro které byly elektronické řídicí systémy navrhovány, je na obrázku (obr. 15 příloha).

## 5 Programy pro řídicí elektroniku

V této kapitole bude popsána činnost navržených programů pro řídicí elektroniku pohybu pojezdu i měřících hrotů. Významné algoritmy jsou rozebrány podrobněji.

### 5.1 Program pro řídicí elektroniku pohybu pojezdu substrátu

Hlavním úkolem programu je zajistit komunikaci se snímači polohy a ze získaných dat řídit pohyb pojezdu ve dvou osách. Každá z nich je řízena stejnosměrným motorem.



Obr. 5.1: Blokový diagram programu pro řídicí elektroniku pohybu pojezdu substrátu

Pro komunikaci s nadřazenou řídicí elektronikou, která bude dávat zařízení povely, je použito rozhraní SPI. Zjednodušený blokový diagram činnosti zařízení je vidět na obrázku (obr. 5.1). Dále bude následovat popis činnosti a algoritmů jednotlivých bloků diagramu.

### **5.1.1 Inicializace periférií mikrokontroleru**

Po spuštění zařízení je zapotřebí nastavit vlastnosti všech používaných periférií. Dle elektrického schématu jsou nastaveny jednotlivé piny vstupně výstupních portů buď na vstupy, nebo na výstupy. Dále je zapotřebí inicializovat všechny tři využívané časovače, zapnout oba zdroje vnějšího přerušení a zapnout podporu hardwarové komunikace SPI. Úloha jednotlivých periférií je rozebrána dále, a to vždy při popisu určité problematiky, kterou daná periferie řeší.

### **5.1.2 Inicializace snímačů polohy**

Po inicializaci periférií dojde k navázání komunikace zařízení se snímači polohy. Tento proces je signalizován rozsvícením signalizační LED diody na řídicí DPS po dobu cca 2 sekund. Po této době musí dojít k zhasnutí této signalizace. Pokud se tak nestane, nedošlo k navázání komunikace a zařízení musí být restartováno. Po navázání komunikace se snímači je správnost přenosu dat sledována programem. Pokud dojde k selhání komunikace v tomto případě, opět dojde k rozsvícení signalizační LED diody. Navíc je zastaven i pohyb pojezdu a komunikace zařízení s okolím. Zařízení musí být restartováno. Ke znovunavázání komunikace se snímači polohy dochází i po spuštění a ukončení „pulse testu“ nebo pokud pošle nadřazený řídicí systém příkaz 0x30 přes rozhraní SPI (viz dále). I v těchto případech je proces signalizován LED diodou. Při ladění zařízení nebyl shledán žádný problém při komunikaci mezi snímači a řídicí elektronikou. Tato signalizace je pouze bezpečnostního charakteru.

### **5.1.3 Zpracování dat ze snímačů polohy**

Komunikace mezi zařízením a optoelektronickými CCD snímači polohy probíhá prostřednictvím protokolu PS/2. Hodinový signál o frekvenci 10 kHz -16 kHz je generován zařízením slave (snímačem). Proto bylo výhodné použít pro detekci sestupné hrany signálu vnějšího přerušení. V případě detekce hodinového signálu snímače polohy osy X pojezdu se jedná o signál označený ve schématu jako CLK1. Pro detekci sestupné hrany signálu bylo použito vnější přerušení INT0. Při každé sestupné hraně signálu CLK1 dochází ke čtení logické úrovně signálu označeného DATA1 (datová linka snímače polohy). Jednotlivé načtené bajty dle protokolu PS/2 jsou ukládány do kruhového bufferu a v nekonečné smyčce programu vyhodnocovány. Vyhodnocení spočívá v převodu získaných

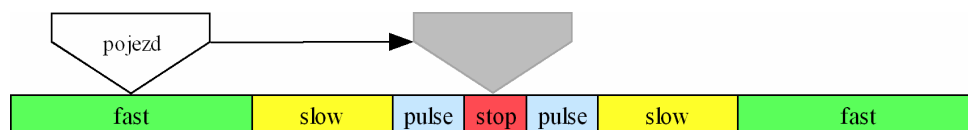
informací na číslo, které určuje vzdálenost, o kterou došlo k pohybu pojezdu. Toto číslo je přičteno do proměnné, která již určuje aktuální pozici pojezdu na ose X. Proměnná je celočíselná znaménková a může nabývat hodnot -32768 až 32767.

Pro detekci pohybu pojezdu na ose Y je použito stejného algoritmu. Ve schématu se jedná o hodinový signál označený CLK2, jehož sestupná hrana je detekována vnějším přerušením INT1. Při přerušení dojde ke čtení úrovně signálu DATA2.

#### 5.1.4 Řízení pohybu pojezdu, režimy činnosti motorů

Pro změnu pozice pojezdu je nutné, aby zařízení přijalo příkaz od nadřazeného řídicího systému přes rozhraní SPI. Takto získaná hodnota určuje počet změn, které musí detekovat snímač polohy, aby byl pojezd dostaven do cílové pozice ve směru jedné osy (například X). Tato hodnota je tedy porovnávána s výše zmíněnou hodnotou získanou ze snímače polohy, která určuje aktuální pozici pojezdu ve směru osy X. Stejná pravidla platí i pro osu Y.

Pojezd je ovládán dvěma stejnosměrnými motory, které mohou pracovat ve čtyřech pracovních režimech: „fast“ režim, „slow“ režim, „pulse“ a „stop“ režim. Následuje popis činnosti motorů v jednotlivých režimech.



**Obr. 5.2:** Ilustrativní zobrazení trajektorie pojezdu, který bude měnit svou pozici

Na obrázku (obr. 5.2) je znázorněno, co se stane, pokud dostane zařízení příkaz ke změně pozice pojezdu. Obrázek je ilustrativní, proto zohledňuje pouze jednu osu pohybu. Je patrné, že pojezd má nový cíl, který je označen jako „stop“. Do této pozice musí motor pojezd dostavit přejetím přes „fast“ režim, „slow“ režim a „pulse“ režim. „Fast“ režim slouží k hrubému přiblížení pojezdu cíli. V tomto režimu je motor trvale připojen k napájecímu napětí, čímž je dosaženo maximální rychlosti pojezdu. Pokud buzení protne hranici „slow“ režimu, je aktivován časovač 2, který generuje PWM signál pro spínání motoru. Tím dojde ke snížení úrovně napětí na motoru, čímž je snížena jeho rychlost otáčení. Pojezd tak zpomalí, aby nedošlo k přejetí cílové pozice. Pokud se po přejetí „slow“ režimu nenachází pojezd v cílové pozici, je aktivován „pulse“ režim, ve kterém zařízení generuje sekvenci krátkých pulzů, kterými je motor buzen (zajišťuje časovač 1). Pojezd je tak velice přesně dostaven do požadované pozice, která je označena jako „stop“ režim. V tomto režimu již nedochází k žádnému pohybu pojezdu. Pokud dojde k přejetí cílové pozice pojezdem, je aktivován patřičný režim opačného směru, což se opakuje do té doby, dokud nedojde

k ustálení pojezdu v cílové pozici. Po správné kalibraci zařízení lze tímto způsobem dostavit pojezd do cílové pozice s přesností na desítky mikrometru (tato přesnost závisí na citlivosti snímače polohy). Hranice jednotlivých režimů je možné nastavit a kalibrovat pomocí rozhraní SPI (viz dále).

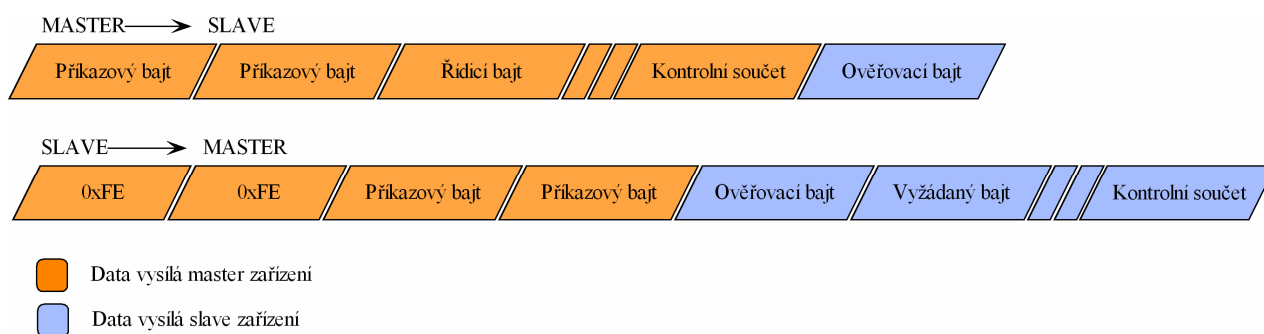
### **5.1.5 Komunikační rozhraní SPI a použitý protokol**

Pro komunikaci mezi podřízeným zařízením a nadřízeným řídicím systémem je použita sběrnice SPI. Pravidla komunikace po SPI popisují pouze výměnu bajtu mezi zařízením master a slave. Proto bylo nutné vytvořit vlastní protokol, který zajistí bezpečný přenos dat.

Sběrnice pracuje na frekvenci 125 kHz a je nastavena do režimu „Mode 0“. Jedná se o komunikaci master – slave. Pokud se master rozhodne zahájit komunikaci, musí uzemnit příslušný signál Slave Select, čímž vybere zařízení slave, se kterým bude navázána komunikace.

Po celou dobu komunikace se zařízením musí být signál v logické 0. Master začne generovat hodinový signál, přičemž dojde k výměně vysílacího a přijímacího registru obou zařízení (dojde k výměně celého bajtu).

Protokol, který je nadstavbou na výše zmíněný způsob komunikace, je obousměrný a přenos bajtů prostřednictvím protokolu vypadá následovně (obr. 5.3). Master vyšle příkazový bajt, a to dvakrát po sobě z důvodu bezpečnosti přenosu, který určuje, kolik bude následovat dalších řídicích bajtů a jak s nimi naložit. Příkazové bajty začínají u každého zařízení slave hodnotou 0x01 a následující jsou číslovány vzestupně. Po odeslání příkazových bajtů dojde k odeslání příslušného počtu řídicích bajtů. Řídicí bajty obsahují již informace, se kterými zařízení slave naloží dle určení příkazovým bajtem. Následuje odeslání jednoho bajtu aditivního kontrolního součtu, který je vygenerován pouze z řídicích bajtů. Poté musí zařízení master zaslat ověřovací bajt (libovolné číslo), čímž získá zpětně informaci o tom, zda proběhl celý přenos korektně. Pokud došlo ke správnému zaslání celé sekvence bajtů do zařízení slave a provedení daného příkazu, odpoví zařízení slave hodnotou 0x00. Pokud došlo k selhání komunikace (nesouhlasí kontrolní součet), odpoví zařízení slave hodnotou 0xFF. Po celou dobu přenosu všech bajtů musí zařízení slave odpovídat hodnotou 0x00. Pokud dojde ke zjištění chyby v přenosu již dříve, než po ověření kontrolního součtu (pokud se neshodují oba příkazové bajty) dojde ihned v dalším komunikačním cyklu k zaslání hodnoty 0xFF do zařízení master, což signalizuje chybu komunikace a zařízení slave již nepokračuje v přijímání dané sekvence. Master musí zahájit komunikaci znovu příkazovým bajtem.



**Obr. 5.3:** Protokol popisující přenos dat mezi nadřazeným řídicím systémem (masterem) a zařízením slave

Pokud je zapotřebí komunikovat opačným směrem, tj. odesílat data ze zařízení slave do zařízení master, musí si o tato data zařízení master požádat tím, že zašle do zařízení slave příkazový bajt 0xFE opět dvakrát po sobě. Následují další dva příkazové bajty, které udávají, jaké informace budou do zařízení master zaslány. Následuje ověřovací bajt a poté již zařízení master zašle do zařízení slave patřičný počet bajtů s libovolnou hodnotou, čímž obdrží od zařízení slave požadovaná data. Poslední z bajtů odeslaný zařízením slave je aditivní kontrolní součet, který masteru podá informaci o korektnosti přenesené sekvence bajtů. Kontrolní součet je opět generován pouze z dat označených na obrázku jako vyžádané bajty. Pokud se jeho hodnota neshoduje s hodnotou kontrolního součtu vypočtenou masterem, musí zařízení master znovu požádat o zaslání celé sekvence bajtů.

### 5.1.6 Přehled příkazů rozhraní SPI

V předchozí podkapitole byl popsán způsob komunikace prostřednictvím rozhraní SPI a použitý komunikační protokol. Dále bude popsán seznam komunikačních příkazů pro řídicí elektroniku pojezdu, který bude doplněn o informace k řídicím bajtům, které náleží těmto příkazovým bajtům.

**Tab. 5.1:** Přehled příkazů rozhraní SPI pro řídicí elektroniku pojezdu substrátu - zápis

| příkazový byte | význam   | počet řídicích bytů |
|----------------|--|---------------------|
| 0x01           | pohyb pojezdu ve směru osy X   | 2                   |
| 0x02           | pohyb pojezdu ve směru osy Y   | 2                   |
| 0x03           | reset snímačů polohy a nastavení souřadného systému do počátku               | 0                   |
| 0x04           | ovládá relé  | 2                   |
| 0x05           | nastaví hranice "slow" režimu  | 2                   |
| 0x06           | nastaví hranice "pulse" režimu   | 2                   |
| 0x07           | nastaví hranice "stop" režimu  | 1                   |
| 0x08           | nastaví rychlost pohybu motorů při "slow" režimu                             | 1                   |
| 0x09           | nastaví délku pulzu a časovou prodlevu signálu pro motory při "pulse" režimu | 2                   |
| 0x0A           | aktivuje "pulse test"  | 1                   |

V tabulce (tab. 5.1) je uveden přehled možných akcí a příkazů, které je možno použít při komunikaci s řídicí elektronikou pojezdu substrátu. Příkazový bajte je zobrazen v hexadecimálním tvaru.

Následuje podrobný popis jednotlivých příkazů s vysvětlením významu řídicích bajtů. Všechny hodnoty charakterizující vzdálenost odpovídají počtu změn zaregistrovaných CCD snímačem, což je hodnota závislá na nastavení citlivosti snímače.

**0x01:** Příkaz provede pohyb pojezdu ve směru osy X o vzdálenost určenou následujícími dvěma řídicími bajty. Tyto dva řídicí bajty tvoří celočíselnou znaménkovou hodnotu, přičemž nejdříve se zasílá bajt tvořící méně významnou část čísla. Je možno odeslat hodnotu -32768 až 32767.

**0x02:** Provede pohyb pojezdu ve směru osy Y. Význam řídicích bajtů je totožný jako u předchozího příkazu.

**0x03:** Restartuje a znovu inicializuje snímače polohy. To je indikováno rozsvícením signalizační LED diody na DPS. Po provedení inicializace musí dojít k zhasnutí této signalizace (cca 2 sekundy).

**0x04:** Umožňuje sepnutí či rozepnutí některého ze čtyř relé, které jsou součástí řídicí elektroniky. Nejdříve musí dojít k zaslání řídicího bajtu, který vybere relé, přičemž relé K1 má hodnotu 0x01 a hodnoty řídicích bajtů ostatních relé jsou číslovány vzestupně. Jako druhý řídicí bajt je zaslána informace o sepnutí (0x01), popřípadě o rozepnutí relé (0x00).

**0x05:** Příkaz slouží k nastavení vzdálenosti od cílové pozice pojezdu, ve které dojde ke zpomalení pojezdu (dojde k aktivaci „slow“ režimu). Rychlost pojezdu pro „slow“ režim lze nastavit příkazem 0x08 (viz dále). Vzdálenost je určena dvěma řídicími bajty. Tyto dva bajty tvoří celočíselnou znaménkovou hodnotu, přičemž nejdříve se zasílá bajt tvořící méně významnou část čísla. V tomto případě je však možno odeslat hodnotu pouze 0 až 32767. Program totiž bere hodnotu jako absolutní a používá ji pro kladný i záporný směr pohybu. Pokud dojde k zaslání záporného čísla, jeho hodnota je automaticky převedena na absolutní. Výchozí velikost parametru je nastavena na 1000. To znamená, že hystereze „slow“ režimu je 1000 jednotek na jednu a 1000 jednotek na druhou stranu osy od cílové pozice pojezdu (obr. 5.2).

**0x06:** Slouží k nastavení vzdálenosti od cílové pozice pojezdu, ve které dojde k aktivaci „pulse“ režimu. Další parametry tohoto režimu lze nastavit příkazem 0x09 (viz dále). Vzdálenost je určena dvěma řídicími bajty. Jejich význam je totožný jako u předchozího příkazu. Výchozí hodnota parametru je nastavena na 100. Hystereze „pulse“ režimu

je tedy 100 jednotek na jednu a 100 jednotek na druhou stranu osy od cílové pozice pojezdu (obr. 5.2).

**0x07:** Příkaz slouží k nastavení vzdálenosti od cílové pozice pojezdu, ve které dojde k úplnému zastavení pojezdu (aktivace „stop“ režimu). Tato hodnota je popsána jedním řídicím bajtem a je celočíselná neznaménková. Může nabývat hodnoty od 0 do 255. Výchozí hodnota parametru je nastavena na 10, což znamená, že hystereze „stop“ režimu je 10 jednotek na jednu a 10 jednotek na druhou stranu osy od cílové pozice pojezdu (obr. 5.2). Pokud je vyžadováno, aby došlo k zastavení pojezdu přesně na požadované pozici, nastavíme tuto hodnotu na 0.

**0x08:** Slouží k nastavení rychlosti pojezdu ve „slow“ režimu. Rychlost je definována PWM signálem. Střída signálu je určena jediným řídicím bajtem. Jeho hodnota je celočíselná neznaménková, přičemž je možno použít číslo 5 až 250. PWM signál je generován časovačem č.2. Jedná se o osmibitový časovač pracující v režimu bez předřazené předděličky. Při přetečení časovače je sepnut patřičný motor a po dosažení výše zmíněné hodnoty dojde k vypnutí motoru, což trvá až do opětovného přetečení časovače. Střidu 1:1 lze generovat použitím hodnoty 128, což je i výchozí hodnota parametru.

**0x09:** Tímto příkazem lze nastavit délku pulzu pro „pulse“ režim a délku prodlevy mezi jednotlivými pulzy. Ke generování této prodlevy byl použit časovač č.1 s předděličkou o hodnotě 64. Délku prodlevy lze vypočítat následujícím vztahem:

$$t_{delay} = \frac{(65\,536 - \text{Byte}.255 - 255).64}{f_{osc}} = \frac{(65\,536 - \text{Byte}.255 - 255).64}{16\,000\,000} [\text{s}] \quad (5.1)$$

kde *Byte* je hodnota prvního řídicího bajtu. Výchozí hodnota je 0xE0 (224 dekadicky), přičemž je možné použít hodnotu 5 až 250. Druhý řídicí bajt určuje prodlevu před příchodem dalšího pulzu. Tato doba je dána součinem hodnoty druhého řídicího bajtu a času  $t_{delay}$ . Výchozí hodnota činitele je 10.

**0x0A:** Příkaz aktivuje „pulse test“, který lze použít ke kalibraci „pulse“ režimu. Jediný řídicí bajt určuje osu a směr pohybu pojezdu, ve kterém dojde k provedení testu. Hodnotou 0x00 je spuštěn test v kladném směru osy X pojezdu, hodnota 0x01 určuje záporný směr osy X pojezdu. Hodnotou 0x03 je spuštěn test v kladném směru osy Y a číslo 0x04 určuje spuštění testu v záporném směru osy Y. Test spočívá v tom, že je patřičný motor buzen signálem tvořeným sérií dvaceti pulzů. Jejich délka a prodleva mezi jednotlivými pulzy je určena příkazem 0x09 (viz výše). Vždy po provedení jednoho pulzu a jemu náležící prodlevy je zaznamenána informace o počtu změn, které zaznamenal snímač vzdálenosti.

Po provedení celého testu je možné tyto hodnoty přečíst příkazem 0x02 (viz dále) a vyhodnotit. Na základě těchto hodnot lze zjistit ideální délku pulzu a prodlevy, čímž lze kalibrovat zařízení tak, aby byl pojezd přesunut do cílové pozice co nejpřesněji.

**Tab. 5.2:** Přehled příkazů rozhraní SPI pro řídicí elektroniku pojezdu substrátu - čtení

| příkazový byte | význam  | počet vyžádaných bytů |
|----------------|---|-----------------------|
| 0x01           | podá informaci o cílové pozici pojezdu            | 1                     |
| 0x02           | předá naměřené hodnoty po provedení "pulse testu" | 20                    |

Pro přenos informací ze zařízení slave do zařízení master je nutné aktivovat tento směr komunikace zasláním hodnoty 0xFE do zařízení slave, a to dvakrát po sobě (viz. popis protokolu SPI). Poté lze použít některý z příkazů, které jsou uvedeny v tabulce (tab. 5.2).

**0x01:** Příkaz zajistí zaslání informace o činnosti zařízení. Pokud se nachází pojezd v cílové pozici (je aktivován „stop“ režim), je vyžádaný bajt roven číslu 1. V opačném případě dojde k zaslání hodnoty 0.

**0x02:** Tento příkaz lze použít po provedení a dokončení „pulse testu“. Funkce „pulse testu“ je popsána u příkazu, který jej aktivuje (0x0A – viz výše). V tomto případě je zaslána sekvence 20-ti vyžádaných bajtů. Každý podává informaci o změně vzdálenosti, ke které došlo při vykonání jednoho pulzu ve zvoleném směru a ose pojezdu.

V některých případech je zapotřebí potlačit určitý režim činnosti motorů. Způsob, jakým toho lze docílit je popsán v (tab. 5.3).

**Tab. 5.3:** Způsoby potlačení režimů činnosti motorů

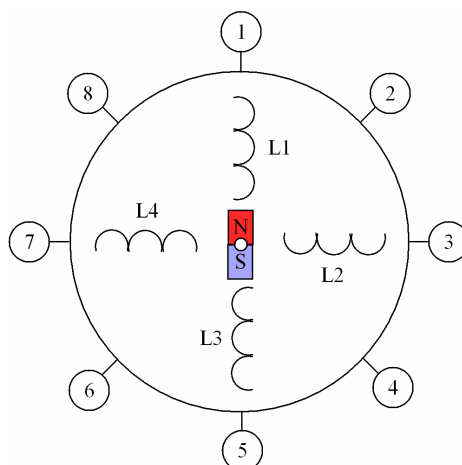
| vypnout režim                  | způsob  |
|--------------------------------|---|
| vypnutí "fast" režimu          | nastavit vzdálenost "slow" režimu na hodnotu 32767  |
| vypnutí "slow" režimu          | nastavit vzdálenost "pulse" režimu a "slow" režimu na stejnou hodnotu   |
| vypnutí "pulse" režimu         | nastavit vzdálenost "stop" režimu a "pulse" režimu na stejnou hodnotu   |
| vypnutí "fast" i "slow" režimu | nastavit vzdálenost "pulse" režimu a "slow" režimu na hodnotu 32767   |
| vypnutí "fast" i "slow" režimu | nastavit vzdálenost "stop" režimu, "pulse" režimu a "slow" režimu na stejnou hodnotu                                      |
| vypnutí "fast" i "slow" režimu | nastavit vzdálenost "slow" režimu na hodnotu 32767, nastavit vzdálenost "stop" režimu a "pulse" režimu na stejnou hodnotu |

## 5.2 Program pro řídicí elektroniku pohybu měřicích hrotů

Hlavním úkolem programu je zajistit komunikaci s nadřazeným řídicím systémem a podle jeho příkazů ovládat pohyb krokových motorů na všech měřicích modulech. Program umí až zdesetinásobit fyzický počet kroků krokového motoru, což zvýší přesnost zařízení. Pro komunikaci s nadřazeným řídicím systémem je použito rozhraní SPI.

### 5.2.1 Princip činnosti programu

Pro řízení krokových motorů byl vytvořen program, který po obdržení příkazu přes rozhraní SPI od nadřazeného řídicího systému provede dostavení motoru do požadované polohy. Použité krokové motory disponují 48-mi kroky na jednu otáčku motoru. Tento rozsah je pro dostavení měřicího hrotu nedostatečný. Proto bylo nutné rozšířit počet kroků pomocí programu, a to podle následujícího principu.



Obr. 5.4: Krokový motor pracující v režimu přesnosti č.1.

Zařízení podporuje pět režimů přesnosti, mezi kterými je možné přepínat. Počet kroků na jednu otáčku motoru pro každý z režimů lze vyčíst z tabulky (tab. 5.4).

Tab. 5.4: Počet kroků motoru na jednu otáčku pro každý z režimů

| režim přesnosti č. | počet kroků na otáčku motoru |
|--------------------|------------------------------|
| 1                  | 96                           |
| 2                  | 192                          |
| 3                  | 288                          |
| 4                  | 384                          |
| 5                  | 480                          |

Volba režimu je důležitá pro kalibraci měřicích hrotů po instalaci měřicích modulů do zařízení. Na obrázku (obr. 5.4) je ilustrativní zobrazení krokového motoru, který pracuje v režimu přesnosti č.1 (8-mi taktní režim). Čísly v kroužcích jsou označeny „základní kroky“. Po přijetí příkazu k pohybu motoru jsou postupně spínány cívky L1, L1 i L2, L2, L2 i L3, L3 atd., a to s časovým intervalem, který je dán přetečením osmibitového časovače 0 (předdělička nastavena na hodnotu 1024). Z toho vyplývá, že rychlost jedné otáčky rotoru je dána:

$$T_{ot} = \frac{256.1024}{f_{osc}} \cdot \text{pocet kroku na otacku} = \frac{256.1024}{16\,000\,000} \cdot 96 = 1,6 \text{ s} \quad (5.2)$$

Pro zvýšení počtu kroků na otáčku bylo nutné vymyslet algoritmus, který bude měnit magnetické pole plynuleji, než po celých krocích. K tomuto účelu bylo vhodné použít pulzně-šířkově modulovaného signálu (PWM). Vyjdeme opět z obrázku (obr. 5.4). Rozdíl proti režimu č.1 je takový, že mezi jednotlivé celé kroky označené čísly jsou vloženy další mezikroky, které jsou vytvořeny proměnným magnetickým polem. To je vytvořeno sepnutím jednoho vinutí a buzením vedlejšího vinutí PWM signálem. Princip činnosti programu se dá nejlépe popsat na příkladu funkce v režimu přesnosti č.2 (mezi všemi celými kroky označenými na obrázku čísly se nachází navíc jeden mezikrok). Po zapnutí systému je sepnuta cívka L1, což způsobí nastavení motoru do polohy č.1. Pokud zašleme příkaz pro pootočení motoru doprava o jeden krok, zůstane sepnuta cívka L1, ale současně dojde buzení cívky L2 PWM signálem. Tak dojde k pootočení rotoru mezi polohu označenou č.1. a 2. Pokud je vyslán příkaz na pootočení o další krok, rotor se otočí do polohy č.2 stejným způsobem, jako v režimu přesnosti č.1. Při otočení o další krok dojde k trvalému sepnutí cívky L2, přičemž cívka L1 je buzena PWM signálem, čímž dojde k pootočení rotoru mezi polohu označenou č.2 a 3. V poloze č.3 je sepnuta pouze cívka L2. Tento princip se opakuje i pro další pohyb rotoru.

Pro ostatní režimy je princip obdobný s tím rozdílem, že je použito několik PWM signálů o různé stříde, přičemž každý z nich určuje jednu mezipolohu rotoru. Pokud chceme otočit rotor o větší počet kroků, nedochází k přepínání cívek výše zmíněným způsobem, ale dochází k pohybu rotoru po celých krocích. Pokud je rotor již blízko cílové polohy, potom dojde k jeho dostavení na požadovaný mezikrok. Doba jedné otáčky tedy zůstává stejná, jako v režimu přesnosti č.1.

### **5.2.2 Popis použitého algoritmu**

Program výše zmíněného řízení je velmi náročný na použitý mikrokontroler, protože je nutné řídit takto osm krokových motorů najednou. Ty jsou navíc řízeny pouze osmi datovými signály prostřednictvím obvodů 74HC574. Proto bylo nutné vymyslet důmyslný program, který zaručí, že bude střída každého signálu pravidelná a motory tak zůstanou v požadované pozici. Pro generování PWM signálů byl použit osmibitový časovač 2. Předděličku bylo nutné zvolit obezřetně, protože podle dále zmíněného algoritmu dochází k přerušení tohoto osmibitového časovače až 5x za dobu jednoho jeho přetečení. Mikrokontroler musí do příchodu následujícího přerušení dokončit předchozí, jinak by došlo ke zhroucení činnosti zařízení. Ke správné funkci dopomůže volba vyšší

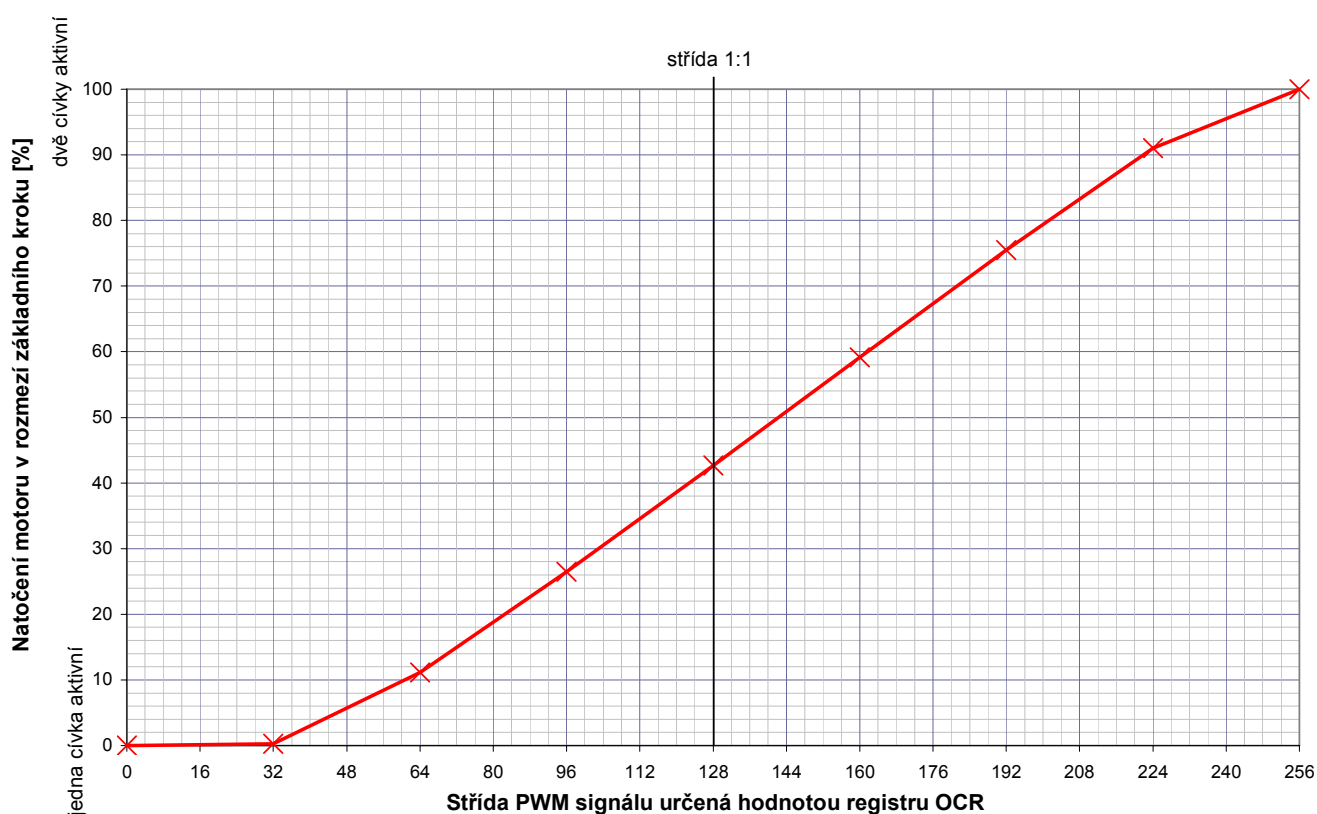
předděličky. Příliš vysoká hodnota však způsobí i velké snížení frekvence PWM signálu, což není dobré pro homogennost generovaného magnetického pole a došlo by ke kmitání rotoru krokového motoru. Proto byl použit krystal o nejvyšší možné frekvenci, kterou mikrokontroler podporuje (16 MHz). Optimální hodnota předděličky se ukázala jako 32, při které je dostatečná jak frekvence PWM signálu (1953,125 Hz), tak i odstup jednotlivých přerušení. K rychlému vykonání přerušení přispívá i dále popsany algoritmus.

Ke generování PWM signálů je použito Output Compare (OCR). To znamená, že při shodě načítané hodnoty časovače 2 s hodnotou OCR je vyvoláno přerušení. Při zapnutí zařízení je registr OCR roven nule. PWM signál je generován tak, že při vyvolání přerušení průchodem čítače nulou jsou nastaveny potřebné datové signály na hodnotu log. 1 a vzestupnou hranou patřičného CLK signálu zapsány do obvodu 74HC574 (jsou sepnuty požadované cívky motoru). Tímto způsobem jsou obslouženy všechny čtyři tyto obvody, tj. všech osm krokových motorů. V tomto přerušení je také změněna hodnota OCR na následující hodnotu danou režimem přesnosti. Po vyvolání dalšího OCR přerušení jsou opět obslouženy všechny krokové motory, přičemž může dojít k ponechání cívek v sepnutém stavu, nebo k jejich vypnutí. Tímto způsobem lze v tomto programu nastavit až čtyři hodnoty registru OCR a tak generovat různé střidy PWM signálů (hodnota čtyři byla stanovena při testovacím měření jako maximální, při které lze kalibrovat mezikroky s dostatečnou odchylkou od požadované pozice).

Výše popsany algoritmus by byl však velmi pomalý, neboť by v každém přerušení OCR muselo být přepočítáváno, jestli daná cívka každého motoru má zůstat sepnuta, nebo již nikoli, což závisí na aktuálním mezikroku každého motoru. Proto v přerušení zmíněného časovače dochází pouze ke kopírování hodnot z předem připravené tabulky do jednotlivých obvodů 74HC574. Tabulka určující, která cívka je v každém přerušení OCR sepnuta, či rozepnuta, je počítána v nekonečné smyčce programu vždy při příchodu příkazu pro rotaci daného motoru. K přepočítání tabulky musí dát zároveň povel časovač 0 určující časovou prodlevu mezi jednotlivými kroky. V takovém případě dojde k vygenerování nových hodnot tabulky pro cívky požadovaného motoru, se kterým má být pohybováno. Tabulka obsahuje pro každou hodnotu registru OCR časovače 2 úrovně jednotlivých signálů pro všechny cívky každého motoru. Ty říkají, které cívky jsou sepnuté a které rozepnuté, a to v každém časovém okamžiku periody PWM signálu.

Je nutné vysvětlit, jakým způsobem byly voleny hodnoty registru OCR určující střidu signálů a tím polohu rotorů všech motorů. Cílem bylo, aby se úhel natočení rotoru měnil se vzrůstajícím počtem kroků lineárně. Proto byla změřena charakteristika (obr. 5.5), která je vytvořena z průměrných hodnot náhodně vybraných motorů v rozmezí

základního kroku. Pomocí ní byly stanoveny výchozí hodnoty pro registr OCR, a to pro všechny režimy, ve kterých je použito PWM signálu (režimy č.2 až 5). Charakteristika však byla měřena v nezatíženém stavu rotoru. Znamená to, že po vyrobení měřicích modulů a po jejich propojení s krokovými motory bude pravděpodobně zapotřebí kalibrovat pohyb měřicích hrotů jiným způsobem. Hodnoty registru OCR, které určují střidu PWM signálu pro jednotlivé mezikroky všech režimů lze měnit prostřednictvím rozhraní SPI (viz dále).



**Obr. 5.5:** Charakteristika natočení rotoru krokového motoru v závislosti na střídě generovaného signálu

### 5.2.3 Přehled příkazů rozhraní SPI

Způsob komunikace prostřednictvím rozhraní SPI a použitý komunikační protokol je shodný s tím, který byl již popsán v minulé kapitole. Zbývá zmínit seznam komunikačních příkazů pro řídicí elektroniku pohybu měřicích hrotů, který je doplněn o informace k řídicím bajtům, které náleží těmto příkazovým bajtům.

**Tab. 5.5:** Přehled příkazů rozhraní SPI pro řídicí elektroniku pohybu měřicích hrotů - zápis

| příkazový byte | význam   | počet řídicích bajtů |
|----------------|--|----------------------|
| 0x01           | nastaví režim přesnosti zařízení                   | 1                    |
| 0x02           | pohybuje vybraným motorem                          | 3                    |
| 0x03           | ovládá pomocné řídicí signály                      | 2                    |
| 0x04           | nastaví střídu PWM signálu pro režim přesnosti č.2 | 1                    |
| 0x05           | nastaví střídu PWM signálů pro režim přesnosti č.3 | 2                    |
| 0x06           | nastaví střídu PWM signálů pro režim přesnosti č.4 | 3                    |
| 0x07           | nastaví střídu PWM signálů pro režim přesnosti č.5 | 4                    |

V tabulce (tab. 5.5) je uveden přehled možných akcí a příkazů, které je možno použít při komunikaci s řídicí elektronikou pohybu měřicích hrotů. Příkazový bajtům je zobrazen v hexadecimálním tvaru.

Následuje podrobný popis jednotlivých příkazů s vysvětlením významu řídicích bajtů.

**0x01:** Příkaz nastaví režim přesnosti zařízení. Jediný řídicí bajt lze nastavit na hodnotu 1 až 5, přičemž každá hodnota nastaví patřičný režim přesnosti dle tabulky (tab. 5.5)

**0x02:** Provede rotaci vybraného krokového motoru o zadaný počet kroků na vybranou stranu. První řídicí bajt slouží k výběru motoru, se kterým má být rotováno, přičemž lze použít hodnotu 0 až 7. Další dva řídicí bajty slouží k předání informace o počtu provedených kroků a o směru rotace motoru. Tyto dva bajty tvoří celočíselnou znaménkovou hodnotu, přičemž nejdříve se zasílá bajt tvořící méně významnou část čísla. Je možno odeslat hodnotu -32768 až 32767.

**0x03:** Ovládá zatím nevyužitý obvod IC5 (74HC574), který je primárně určen k řízení signalizačních LED diod umístěných na modulech měřicích hrotů. Do každého modulu jsou přivedeny dva tyto signály. Ty však nemusí být využity výhradně k signalizaci, ale v budoucnu jich lze použít i na spínání jiných pomocných systémů na modulech měřicích hrotů. První řídicí bajt vybírá signál (0 až 7) a druhý určuje nastavení vybraného signálu (hodnota 1) či jeho nulování (hodnota 0).

**0x04:** Příkaz slouží ke kalibraci zařízení. Nastavuje střídu PWM signálu určující polohu mezikroku v režimu činnosti č.2 zařízení. Řídicí bajt lze nastavit na hodnotu 0x0A až 0xF5 (nelze využít celý rozsah kvůli odstupu přerušení). Význam hodnoty je patrný z obrázku (obr. 5.5).

**0x05:** Slouží ke kalibraci zařízení stejně, jako příkaz 0x04 s tím rozdílem, že nastavuje střídu dvou PWM signálů (režim přesnosti č.3). Pro dva řídicí bajty lze použít hodnoty 0x0A až 0xF5, přičemž odstup mezi hodnotou jednoho a druhého bajtu musí být alespoň 0x0A (kvůli odstupu jednotlivých přerušení).

**0x06:** Příkaz slouží ke kalibraci zařízení v režimu přesnosti č.4. Pro tři řídicí bajty platí stejná pravidla jako u předchozího příkazu.

**0x07:** Příkaz slouží ke kalibraci zařízení v režimu přesnosti č.5. Pro čtyři řídicí bajty platí stejná pravidla jako u příkazu 0x05.

Pro přenos informací ze zařízení slave do zařízení master je nutné aktivovat tento směr komunikace zasláním hodnoty 0xFE do zařízení slave, a to dvakrát po sobě (viz popis protokolu SPI). V tomto případě je možné použít jediný příkaz.

**0x01:** Příkaz zajistí zaslání informace o činnosti zařízení. Pokud se nachází všechny krokové motory v cílové pozici, je vyžádaný bajt roven číslu 1. V opačném případě dojde k zaslání hodnoty 0.

## **6 Závěr**

### **6.1 Dosažené parametry systému pojezdu substrátu po kalibraci zařízení**

V rámci testování funkčnosti zařízení bylo stanoveno základní nastavení, které poskytuje systému pojezdu dostatečnou přesnost. Sérií testů bylo zjištěno, že lze nastavit „stop“ režim na hodnotu 0 a dostavit tak pojezd přesně na požadovanou pozici. Přesnost zařízení tak odpovídá při nastavení citlivosti snímače polohy na 2500 dpi hodnoty 10,16  $\mu\text{m}$ , což je příznivá hodnota pro laboratorní měřicí systém.

### **6.2 Dosažené parametry systému měřicích hrotů**

V tomto případě nelze přesně stanovit, jaká je přesnost pohybu měřicích hrotů. Moduly s měřicími hroty nejsou v tuto chvíli kompletně mechanicky vyřešeny, proto dosud nebylo možné propojit je s krokovými motory a s navrženým řídicím elektronickým systémem. Přesnost dostavení motorů (až 480 kroků na jednu otáčku) však do budoucna slibuje pozitivní výsledky.

### **6.3 Shrnutí dosažených výsledků**

Po výběru vhodných snímacích senzorů a motorů byly navrženy a realizovány dva elektronické systémy, které řídí mechanické pohyby zařízení. První elektronický systém slouží pro řízení pohybu pojezdu substrátu a druhý pro dostavování měřicích hrotů na měřená místa substrátu. Pro správnou funkci těchto elektronických zařízení byl vytvořen řídicí program. Byly tak beze zbytku splněny požadavky stanovené zadáním bakalářské práce.

### **6.4 Možnosti rozšíření měřicího zařízení**

Řízení pohyblivých částí měřicího zařízení je dokončeno. Do budoucna je však nutné vytvořit nadřazený elektronický systém (master). Ten bude komunikovat s podřazenými elektronickými systémy, které slouží jak pro řízení motorů, tak pro měření parametrů substrátů. Nejdůležitější částí bude vytvořit počítačový program, který bude schopen například ze snímků z fotoaparátu umístěného nad měřicím zařízením vyhodnocovat polohu substrátu a dostavovat jednotlivé měřicí hroty do požadovaných pozic.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] ĎADO, S. *Návody k laboratorním úlohám z předmětu Senzory 2 (SZ2)*. ČVUT Praha, Katedra měření, Dostupné z WWW: <http://measure.feld.cvut.cz/groups/edu/sz2/pdf/IRC.pdf>
- [2] STRAŠIL, I. Prodej elektroniky - inkrementální snímače, Dostupné z WWW: <http://www.strasil.net/index.php?text=ircdek2>
- [3] VOJÁČEK, A. *Inkrementální rotační senzory*. Dostupné z WWW: <http://automatizace.hw.cz/el-pohony/ART308-inkrementalni-rotacni-senzory-firmy-kubler.html>
- [4] FRANC, M, *Automatizace - odborný časopis pro automatizaci, měření a inženýrskou informatiku*, *Lineární induktivní snímač polohy*. Dostupné z WWW: <http://www.automatizace.cz/article.php?a=992>
- [5] JIRKA a spol., s.r.o., *Lineární snímače polohy*. Dostupné z WWW: <http://www.jirkapol.cz/digit.-odmerovani-polohy-102.html>
- [6] VLČEK, J. *Automatizace - Odborný časopis pro automatizaci, měření a inženýrskou informatiku*. *Magnetické a optické snímače polohy*. Dostupné z WWW: <http://www.automatizace.cz/article.php?a=1825>
- [7] VÍTEK, J. *Svět hardware – informace ze světa počítačů. Vývoj počítačových myší a jejich technologie*. Dostupné z WWW: [http://www.svethardware.cz/art\\_doc-F10F1CC2A101ED66C12571D300635B26.html](http://www.svethardware.cz/art_doc-F10F1CC2A101ED66C12571D300635B26.html)
- [8] Wikipedie – otevřená encyklopedie. *Elektromotor*. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromotor>
- [9] Uzimex – prodejce technologií do automatizace a robotizace. *Technologický týdeník*. teorie stejnosměrného EC motoru, Dostupné z WWW: [http://www.uzimex.cz/soubory/20070924\\_tt\\_2007-18.pdf](http://www.uzimex.cz/soubory/20070924_tt_2007-18.pdf)
- [10] MARVAN, A. *Návrh mechanického těla a sensorového systému robota*, , Bakalářská práce. VUT v Brně, Fakulta informačních technologií, Dostupné z WWW: <http://www.fit.vutbr.cz/study/DP/rpfile.php?id=3790>
- [11] JALOVECKÝ, R. *HW – články z elektroniky na internetu*, Dostupné z WWW: <http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART406-Ovladac-stejnosmerneho-motoru-vyuzivajici-PWM.html>

- [12] LAHR, B. *Krokové motory*. dimenzování a optimalizace pohonů, Dostupné z WWW: [http://www.regulacni-pohony.cz/frm\\_krok.html](http://www.regulacni-pohony.cz/frm_krok.html)
- [13] All about circuits, *Stepper motors*. webové stránky věnované elektrotechnice, teorie a principy řízení krokových motorů, Dostupné z WWW: [http://www.allaboutcircuits.com/vol\\_2/chpt\\_13/5.html](http://www.allaboutcircuits.com/vol_2/chpt_13/5.html)
- [14] ŘEZÁČ, K. *Krokové motory*. robotika.cz., Dostupné z WWW: <http://robotika.cz/articles/steppers/cs>
- [15] Atmel, výrobce elektronických polovodičových součástek, katalogový list k mikrokontroleru ATmega 16, Dostupné z WWW: [http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc2466.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2466.pdf)
- [16] MALŠÁŇ, S. *Řízení PS/2 myši*. Internetové stránky věnované pokusům v elektrotechnice, Dostupné z WWW: [http://elektronika.kvalitne.cz/ATMEL/necoteorie/tutorial/PS2/PS2\\_mouse.html](http://elektronika.kvalitne.cz/ATMEL/necoteorie/tutorial/PS2/PS2_mouse.html)
- [17] Alldatasheet, Internetový archiv datasheetů součástek, katalogové listy k součástkám: ULN2803, 74HC547, TIP120-127, SUF4007, Dostupné z WWW: [www.alldatasheet.com](http://www.alldatasheet.com)
- [18] Wikipedie - otevřená elektronická encyklopedie, *rozhraní SPI*, Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/SPI>

## Seznam příloh

**Obr. 1:** Elektronika pro řízení pohybu pojezdu substrátu - list 1/3

**Obr. 2:** Elektronika pro řízení pohybu pojezdu substrátu - list 2/3

**Obr. 3:** Elektronika pro řízení pohybu pojezdu substrátu - list 3/3

**Obr. 4:** Maska pro spodní stranu DPS elektroniky pro řízení pohybu pojezdu substrátu

**Obr. 5:** Maska pro horní stranu DPS elektroniky pro řízení pohybu pojezdu substrátu

**Obr. 6:** Osazovací plán DPS elektroniky pro řízení pohybu pojezdu substrátu

**Obr. 7:** Fotografie DPS elektroniky pro řízení pohybu pojezdu substrátu

**Tab. 1:** Soupiska elektronických součástek DPS elektroniky pro řízení pohybu pojezdu substrátu

**Obr. 8:** Elektronika pro řízení pohybu měřicích hrotů - list 1/3

**Obr. 9:** Elektronika pro řízení pohybu měřicích hrotů - list 2/3

**Obr. 10:** Elektronika pro řízení pohybu měřicích hrotů - list 3/3

**Obr. 11:** Maska pro spodní stranu DPS elektroniky pro řízení pohybu měřicích hrotů

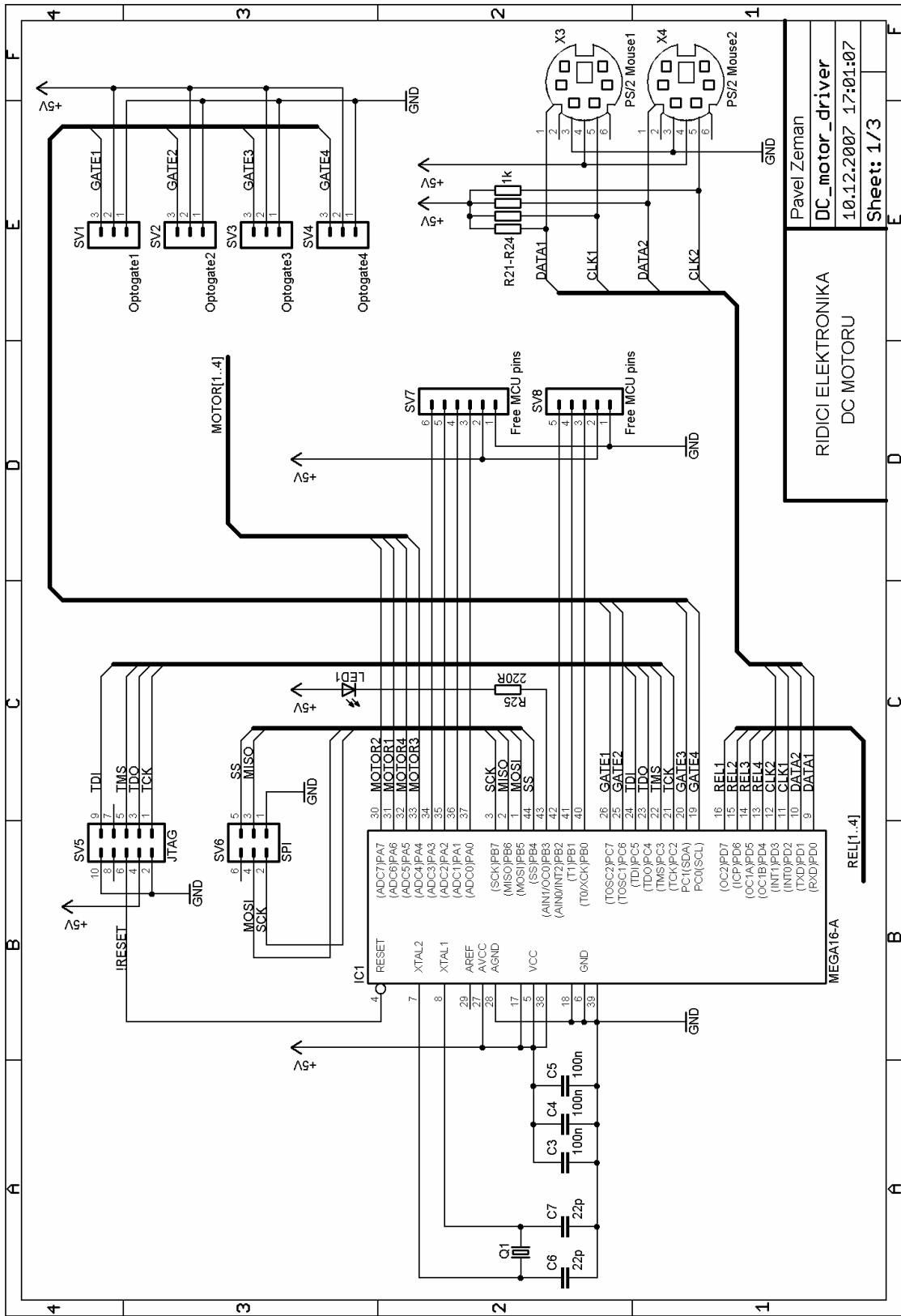
**Obr. 12:** Maska pro horní stranu DPS elektroniky pro řízení pohybu měřicích hrotů

**Obr. 13:** Osazovací plán DPS elektroniky pro řízení pohybu měřicích hrotů

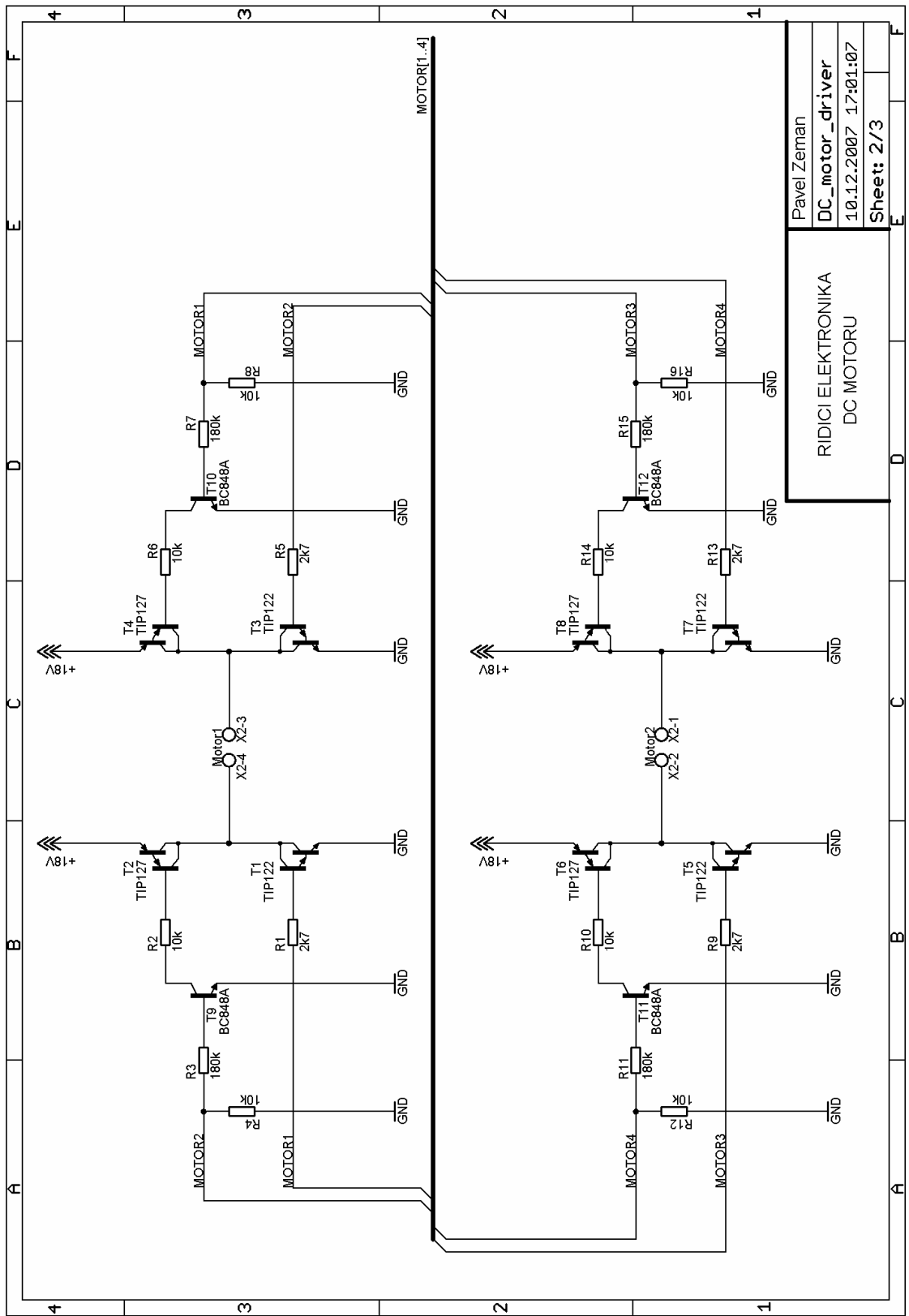
**Obr. 14:** Fotografie DPS elektroniky pro řízení pohybu měřicích hrotů

**Tab. 2:** Soupiska elektronických součástek pro jednu DPS elektroniky pro řízení pohybu měřicích hrotů

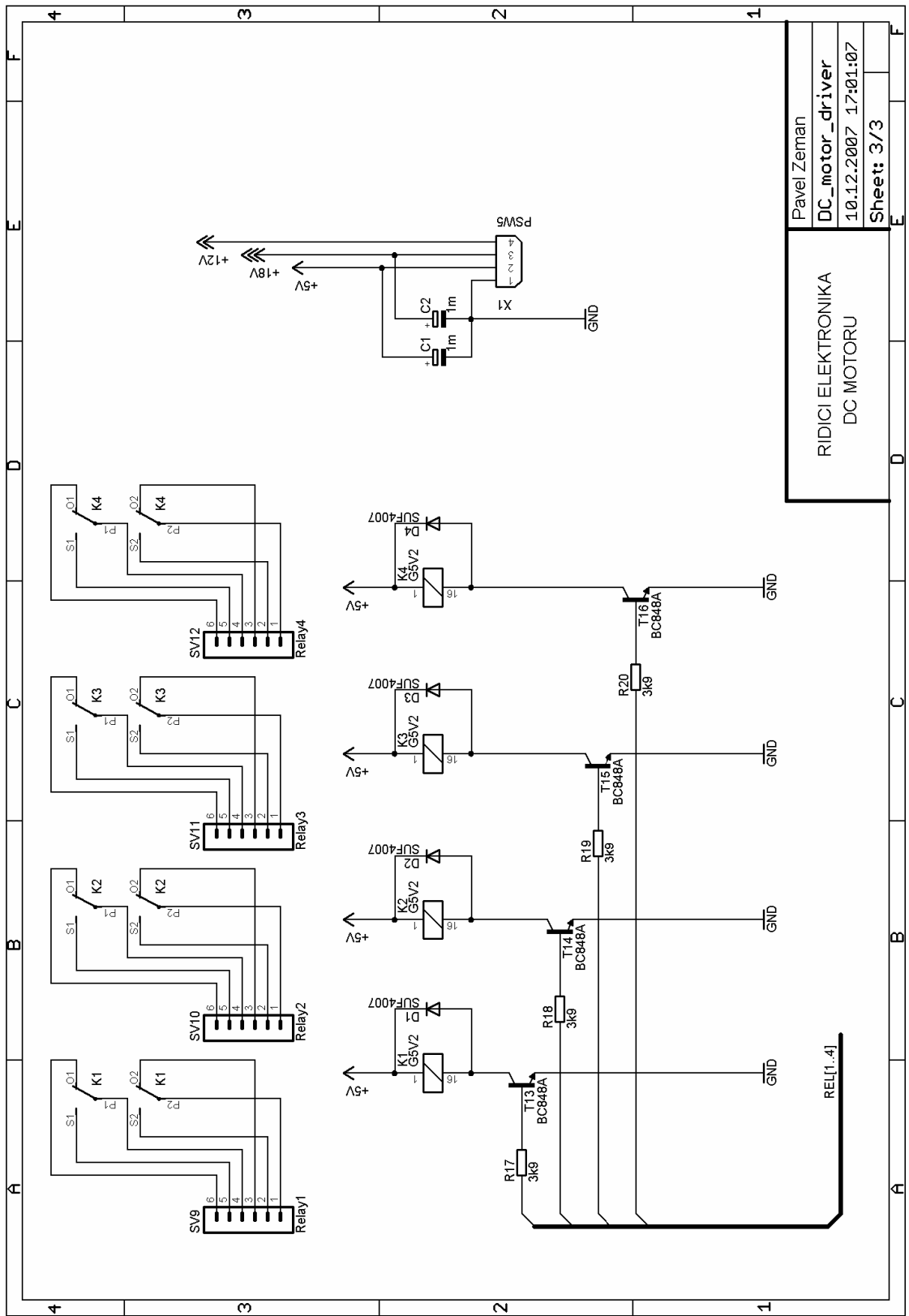
**Obr. 15:** Fotografie - aktuální podoba měřicího zařízení



Obr. 1: Elektronika pro řízení pohybu pojezdu substrátu - list 1/3



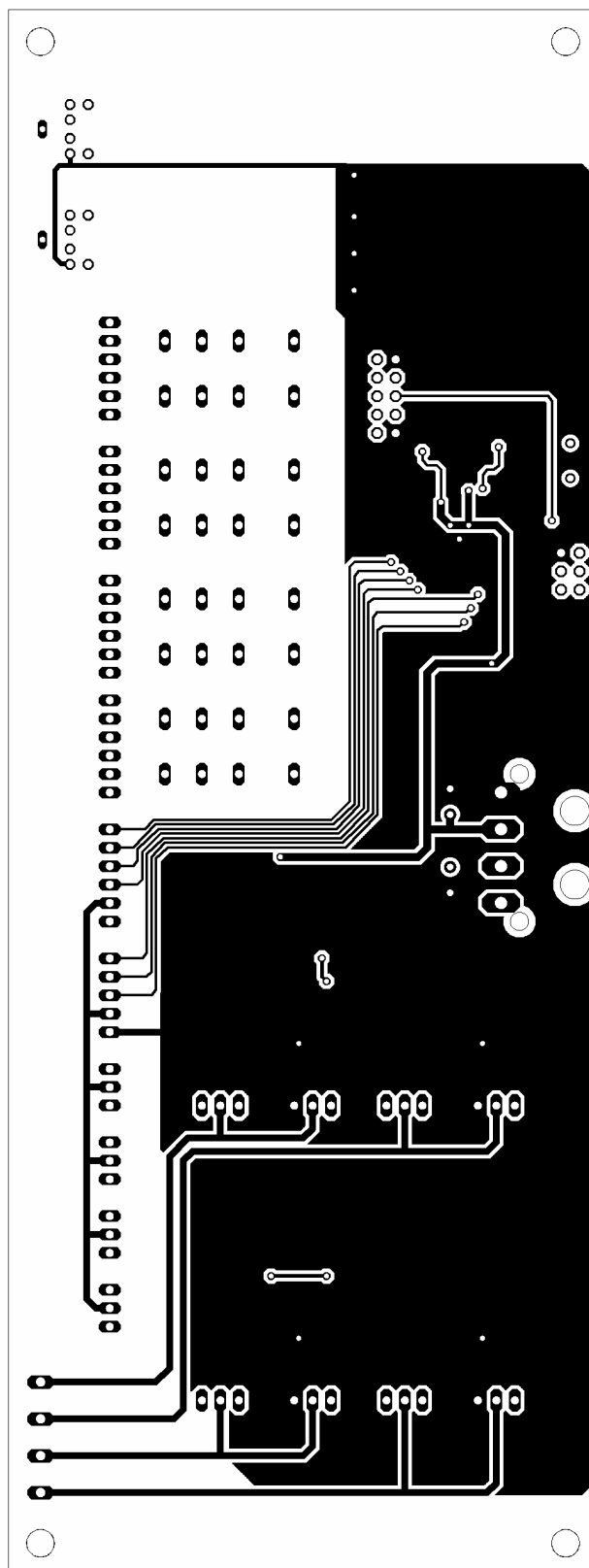
Obr. 2: Elektronika pro řízení pohybu pojezdu substrátu - list 2/3



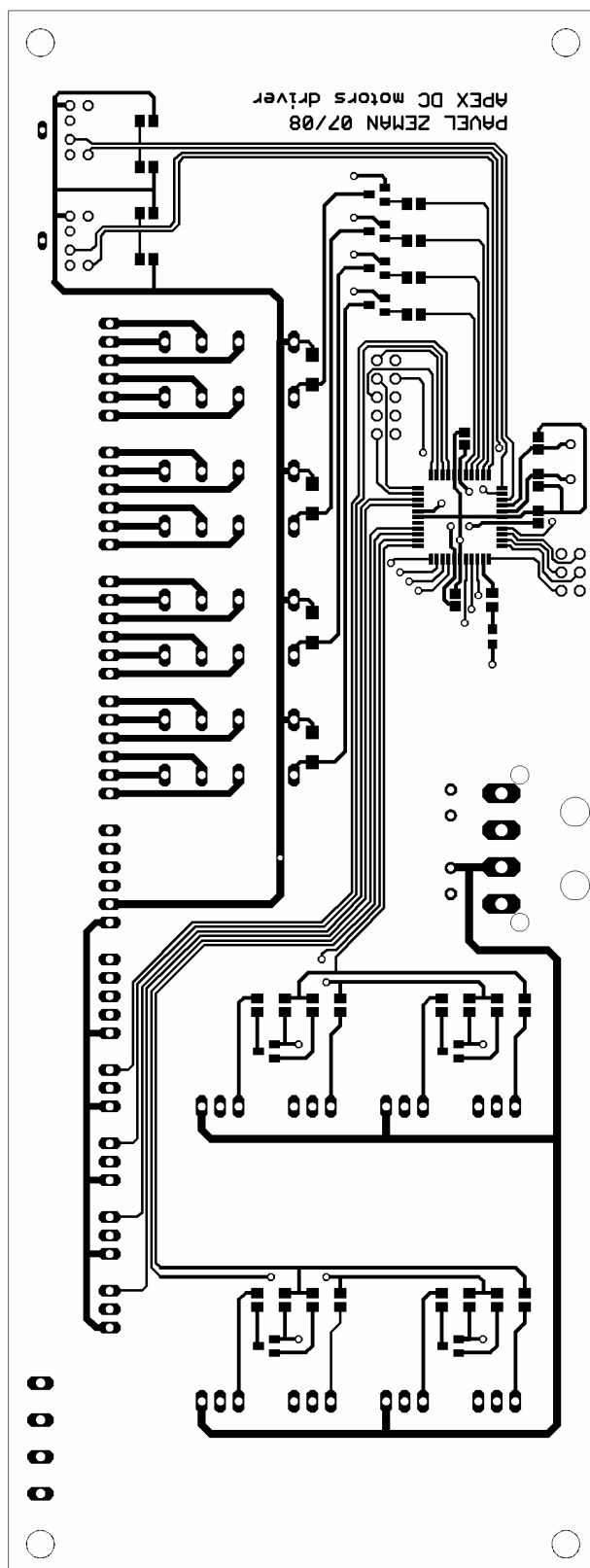
|                     |
|---------------------|
| Pavel Zeman         |
| DC_motor_driver     |
| 10.12.2007 17:01:07 |
| Sheet: 3/3          |

RIDIČI ELEKTRONIKA  
DC MOTORU

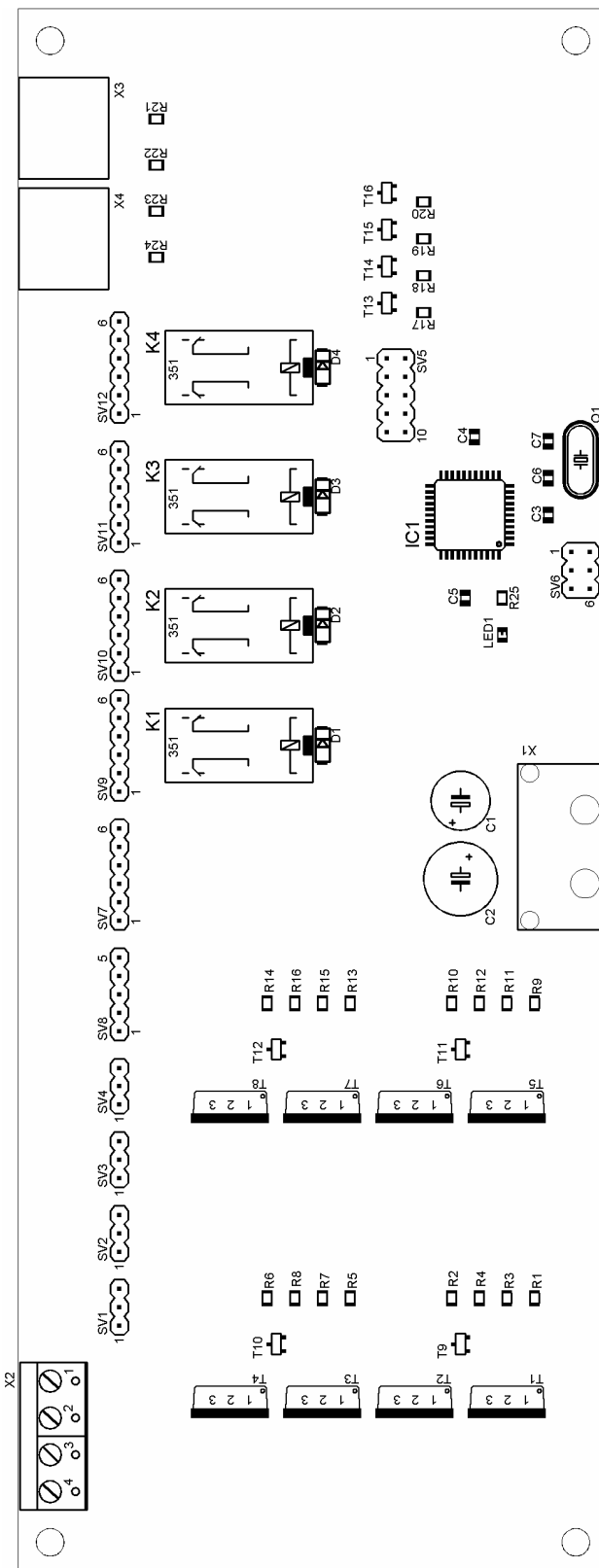
Obr. 3: Elektronika pro řízení pohybu pojezdu substrátu - list 3/3



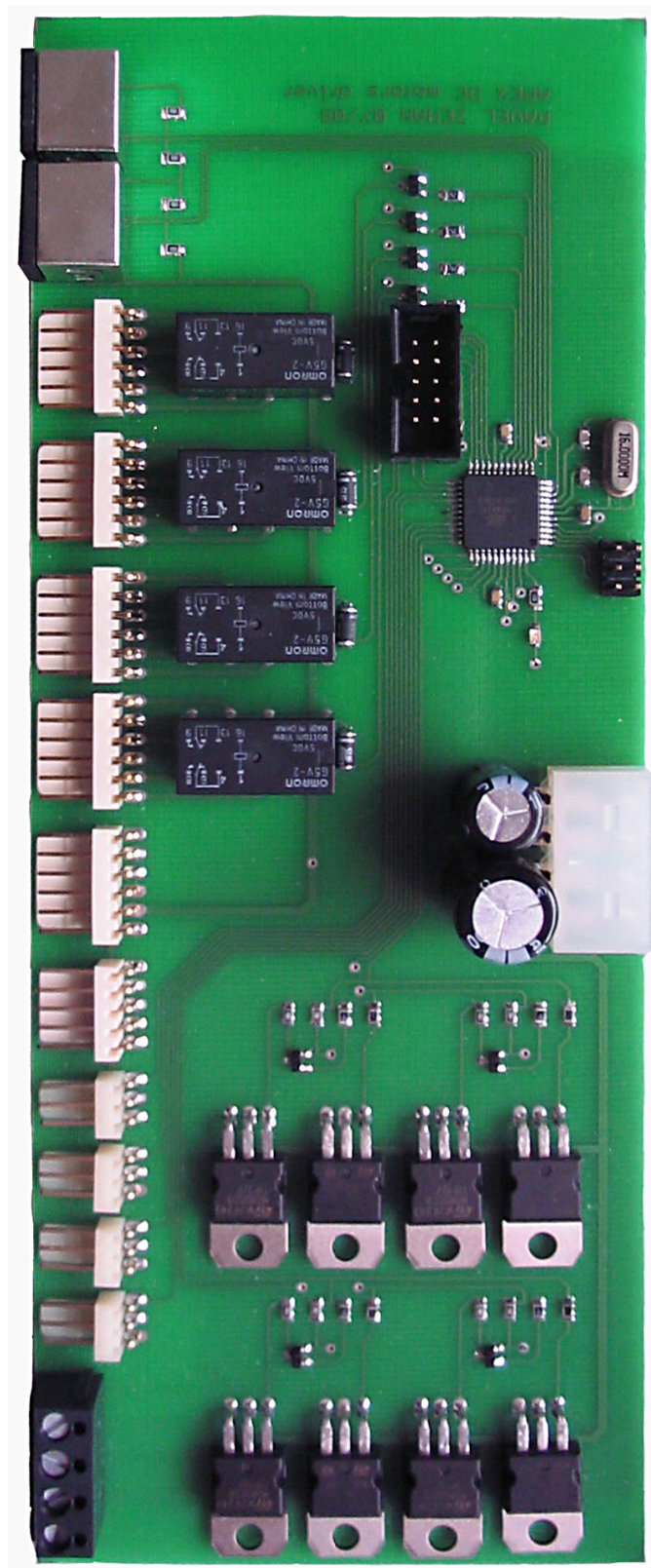
Obr. 4: Maska pro spodní stranu DPS elektroniky pro řízení pohybu pojezdu substrátu



**Obr. 5:** Maska pro horní stranu DPS elektroniky pro řízení pohybu pojezdu substrátu



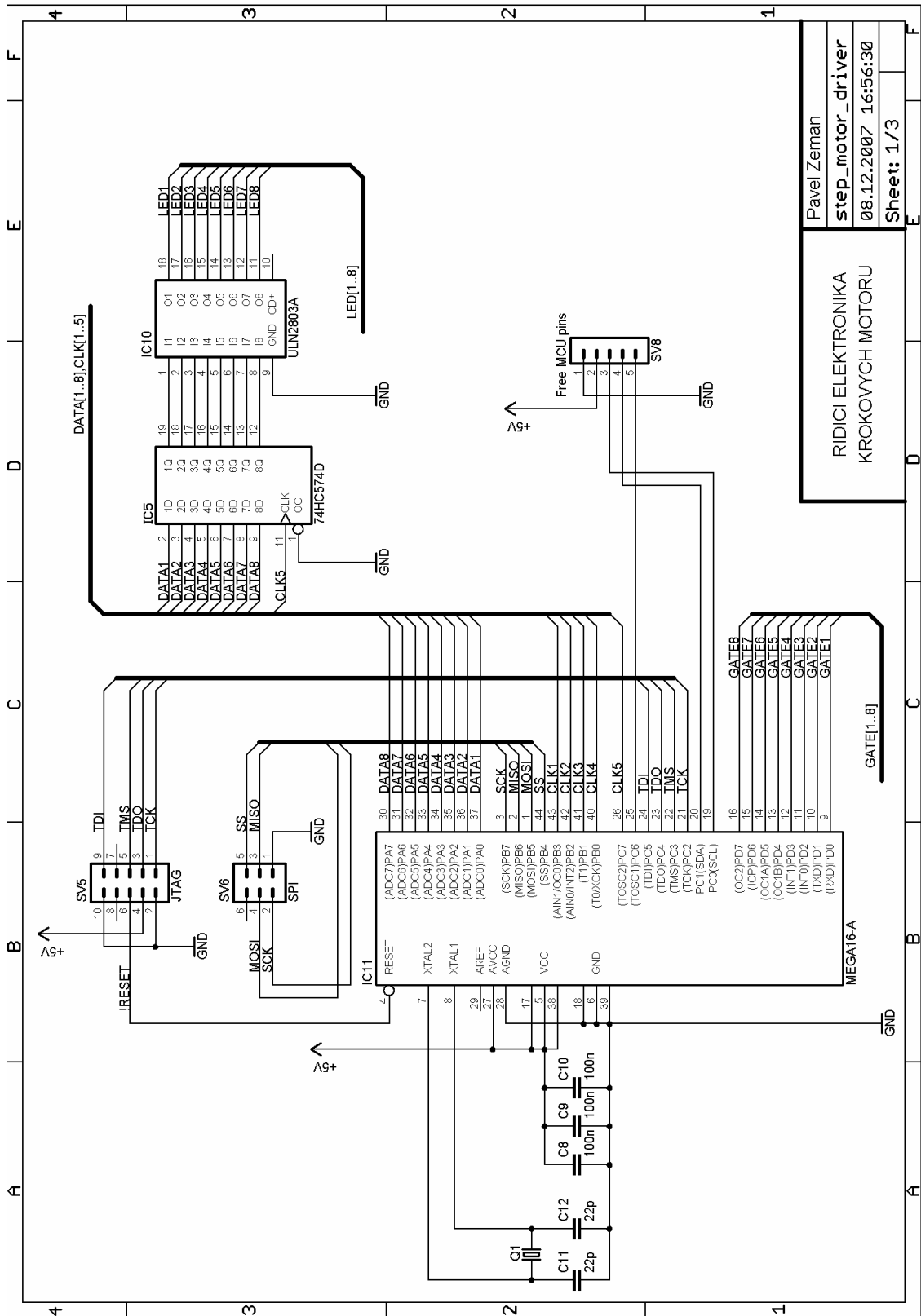
**Obr. 6:** Osazovací plán DPS elektroniky pro řízení pohybu pojezdu substrátu



Obr. 7: Fotografie DPS elektroniky pro řízení pohybu pojezdu substrátu

**Tab. 1:** Soupiska elektronických součástek DPS elektroniky pro řízení pohybu pojezdu substrátu

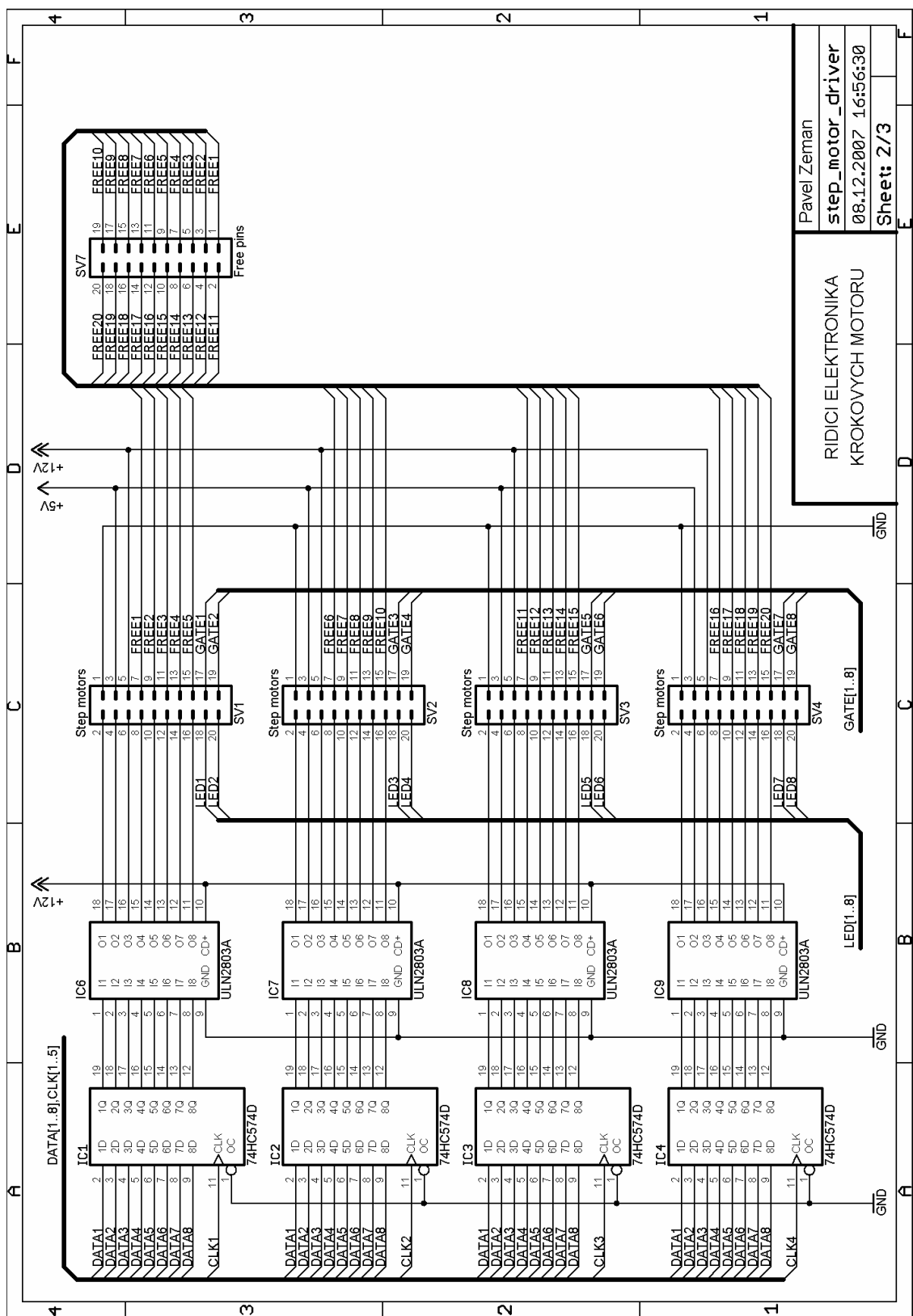
| Označení ve schématu                        | Kusů | Hodnota / typ | Upřesňující údaj                     | Použité pouzdro                  |
|---|------|---------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| R1, R5, R9, R13                             | 4    | 2k7           |                                      | SMD 0805                         |
| R2, R4, R6, R8,<br>R10, R12, R14,<br>R16    | 8    | 10k           |                                      | SMD 0805                         |
| R3, R7, R11,<br>R15                         | 4    | 180k          |                                      | SMD 0805                         |
| R17, R18, R19,<br>R20                       | 4    | 3k9           |                                      | SMD 0805                         |
| R21, R22, R23,<br>R24                       | 4    | 1k            |                                      | SMD 0805                         |
| R25   | 1    | 220R          |                                      | SMD 0805                         |
| C1  | 1    | 1mF           | elektrolytický radiální              | Ø 10 mm, výška 11mm<br>RM 5 mm   |
| C2  | 1    | 1mF           | elektrolytický radiální              | Ø 13 mm, výška 21 mm,<br>RM 5 mm |
| C3, C4, C5                                  | 3    | 100nF         | keramický                            | SMD 0805                         |
| C6, C7                                      | 2    | 22pF          | keramický                            | SMD 0805                         |
| T1, T3, T5, T7                              | 4    | TIP122        | NPN výkonový darlington              | TO220                            |
| T2, T4, T6, T8                              | 4    | TIP127        | PNP výkonový darlington              | TO220                            |
| T9, T10, T11,<br>T12, T13, T14,<br>T15, T16 | 8    | BC848         | NPN universální                      | SOT23                            |
| D1, D2, D3, D4                              | 4    | SUF4007       | ultrarychlá křemíková<br>usměrňovací | MELF                             |
| LED1  | 1    | zelená        |                                      | SMD 0805                         |
| IC1   | 1    | ATmega16      | mikrokontroler Atmel AVR             | TQFP44                           |
| Q1  | 1    | 16MHz         |                                      | HC49/U3H                         |
| K1, K2, K3, K4                              | 4    | G5V2          | relé 2x přepínací                    |                                  |
| SV1, SV2, SV3,<br>SV4                       | 4    | PSH02-03WG    | konektor se zámkem 90°               |                                  |
| SV5   | 1    | MLW10A        | počítačový konektor                  |                                  |
| SV6   | 1    | MLW06A        | počítačový konektor                  |                                  |
| SV7, SV9, SV10,<br>SV11, SV12               | 5    | PSH02-06WG    | konektor se zámkem 90°               |                                  |
| SV8   | 1    | PSH02-05WG    | konektor se zámkem 90°               |                                  |
| X1  | 1    | PSW5          | napájecí PC konektor                 |                                  |
| X2  | 2    | ARK120/2      | svorkovnice 2x šroubovací            | vývody 5,08mm                    |
| X3, X4                                      | 2    | MDD6BB        | mini DIN 6pinů (PS/2)                |                                  |



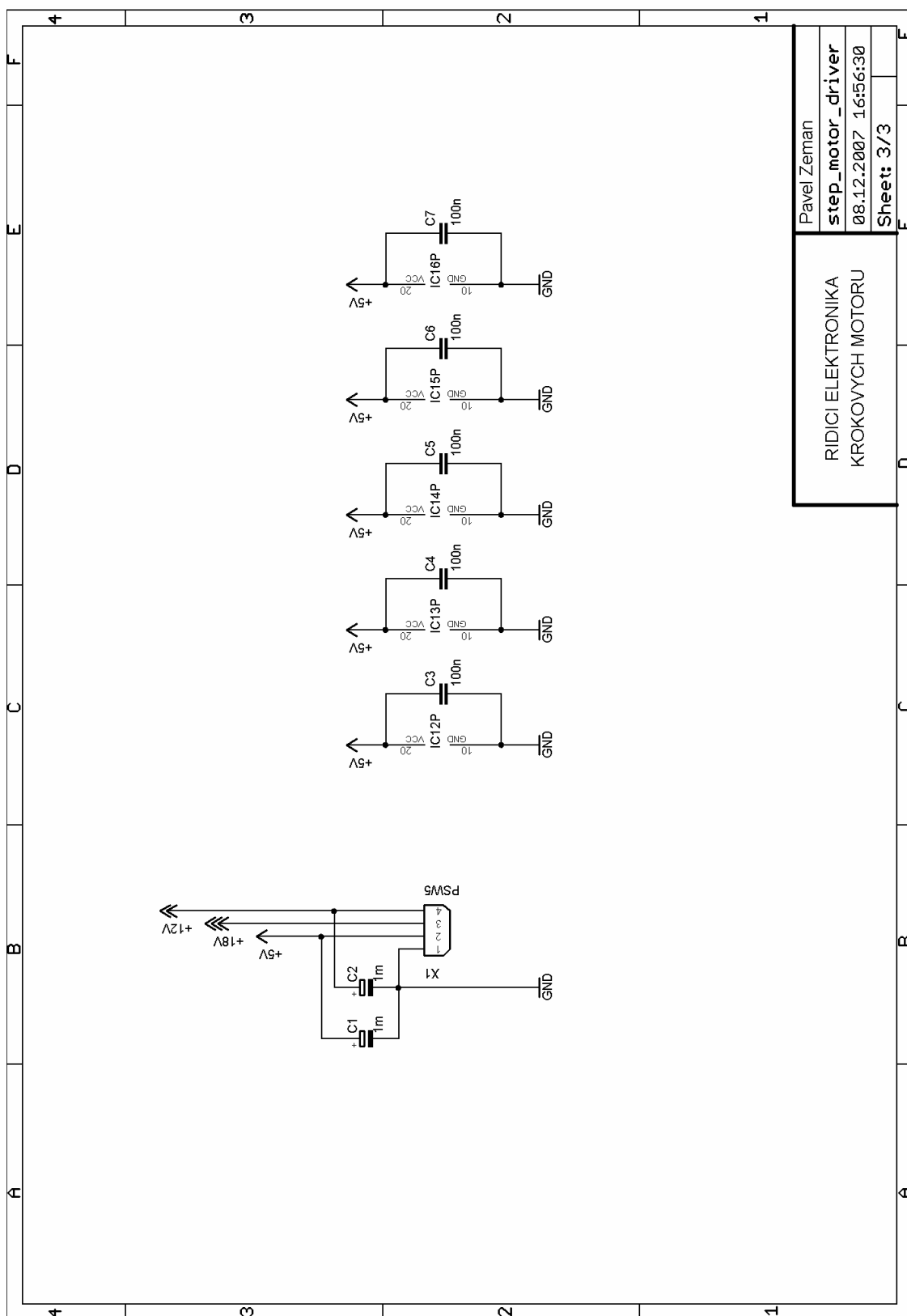
Pavel Zeman  
**step\_motor\_driver**  
 08.12.2007 16:56:30  
 Sheet: 1/3

RIDICI ELEKTRONIKA  
 KROKOVYCH MOTORU

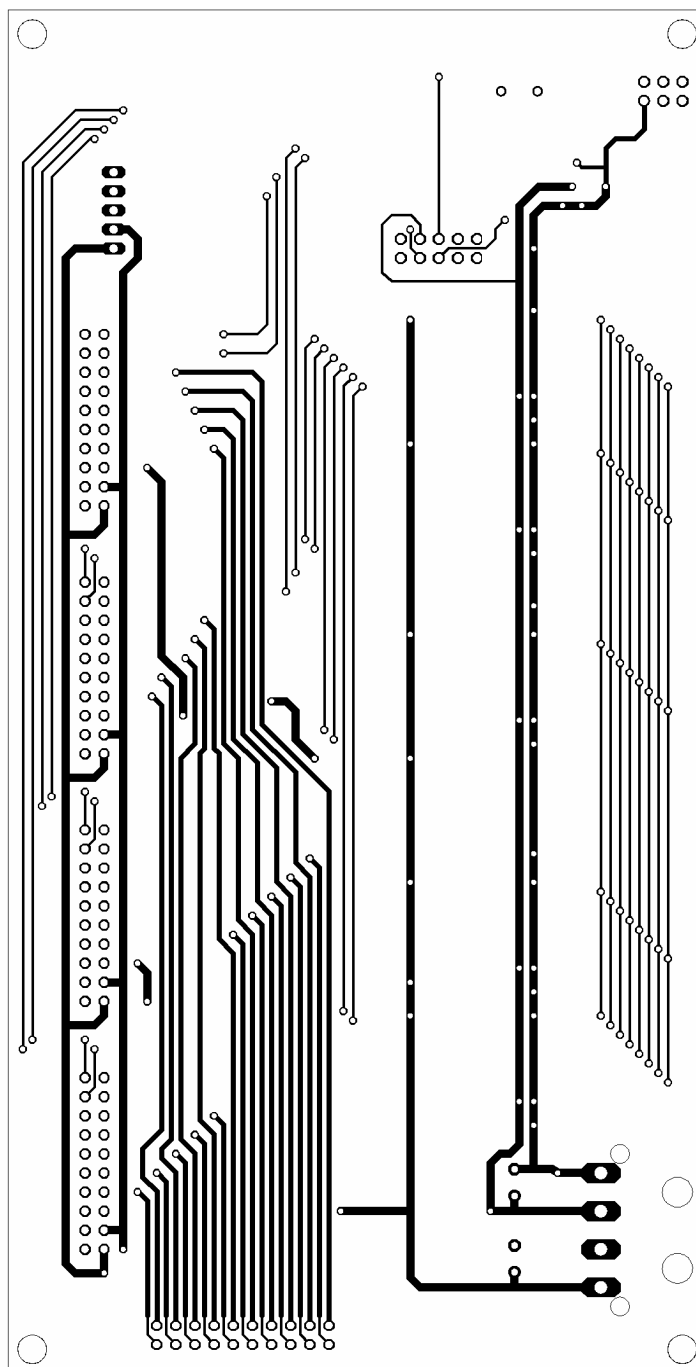
Obr. 8: Elektronika pro řízení pohybu měřicích hrotů - list 1/3



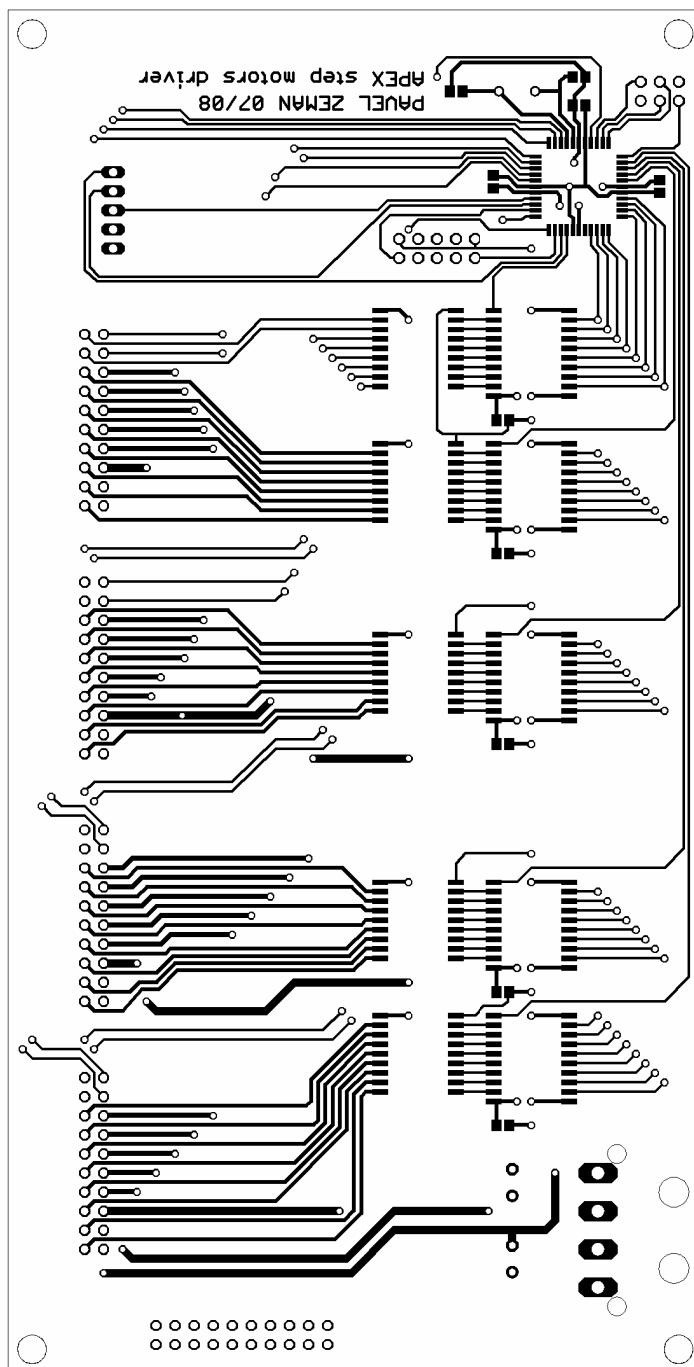
Obr. 9: Elektronika pro řízení pohybu měřicích hrotů - list 2/3



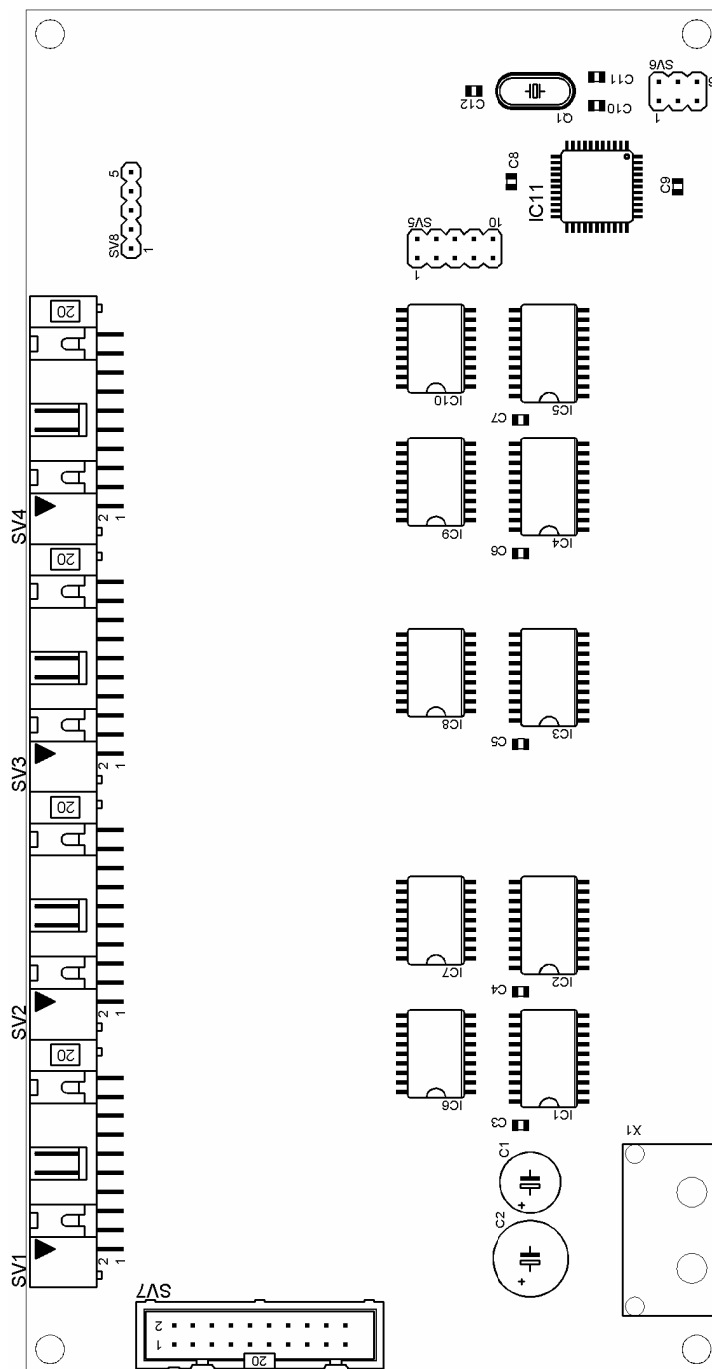
Obr. 10: Elektronika pro řízení pohybu měřicích hrotů - list 3/3



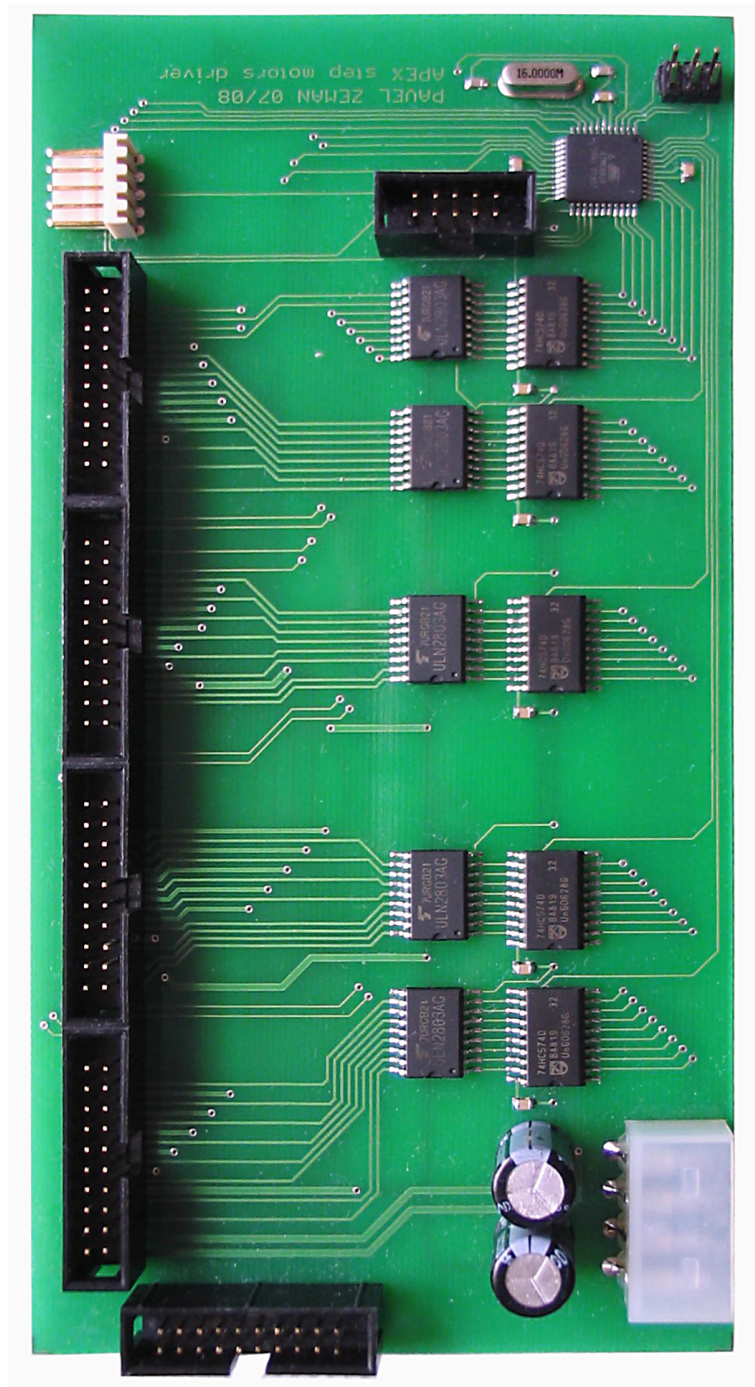
**Obr. 11:** Maska pro spodní stranu DPS elektroniky pro řízení pohybu měřicích hrotů



**Obr. 12:** Maska pro horní stranu DPS elektroniky pro řízení pohybu měřicích hrotů



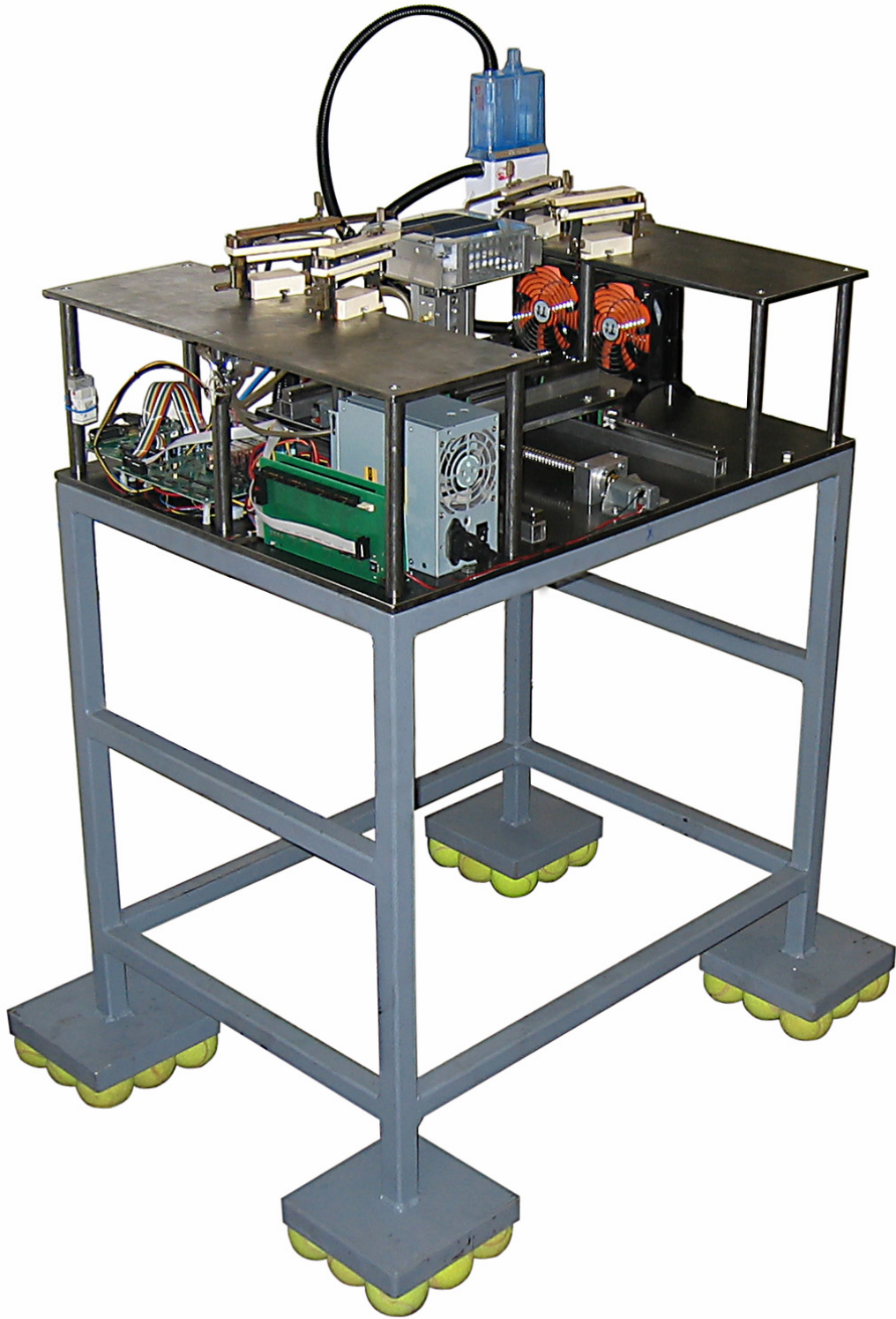
**Obr. 13:** Osazovací plán DPS elektroniky pro řízení pohybu měřících hrotů



Obr. 14: Fotografie DPS elektroniky pro řízení pohybu měřicích hrotů

**Tab. 2:** Soupiska elektronických součástek pro jednu DPS elektroniky pro řízení pohybu měřicích hrotů

| Označení ve schématu            | Kusů | Hodnota / typ | Upřesňující údaj         | Použité pouzdro               |
|---------------------------------|------|---------------|--------------------------|-------------------------------|
| C1                              | 1    | 1mF           | elektrolytický radiální  | Ø 10 mm, výška 11mm, RM 5 mm  |
| C2                              | 1    | 1mF           | elektrolytický radiální  | Ø 13 mm, výška 21 mm, RM 5 mm |
| C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C10 | 8    | 100nF         | keramický                | SMD 0805                      |
| C11, C12                        |      | 22pF          | keramický                | SMD 0805                      |
| IC1, IC2, IC3, IC4, IC5         | 5    | 74HC574       | 8x klopný obvod D        | SO20                          |
| IC6, IC7, IC8, IC9, IC10        | 5    | ULN2803       | 8x budič                 | SO18                          |
| IC11                            | 1    | ATmega16      | mikrokontroler Atmel AVR | TQFP44                        |
| Q1                              | 1    | 16MHz         |                          | HC49/U3H                      |
| SV1, SV2 SV3 SV4                | 4    | MLW20A        | počítačový konektor 90°  |                               |
| SV5                             | 1    | MLW10A        | počítačový konektor      |                               |
| SV6                             | 1    | MLW06A        | počítačový konektor      |                               |
| SV7                             | 1    | MLW20G        | počítačový konektor      |                               |
| SV8                             | 1    | PSH02-05WG    | konektor se zámkem 90°   |                               |
| X1                              | 1    | PSW5          | napájecí PC konektor     |                               |



**Obr. 15:** Fotografie - aktuální podoba měřicího zařízení