VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘÍCÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ŘÍZENÍ PIEZOMOTORU

PIEZOMOTOR CONTROL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR´S THESIS

AUTOR PRÁCE JAN ROBOTKA
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. TOMÁŠ MACHO, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2009

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Jan Robotka ***ID:*** 72909
Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Řízení piezomotoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s problematikou řízení piezomotorů.
2. Seznamte se s mikrokontolérem C8051F015.
3. Navrhněte a realizujte řídící systém s mikrokontrolérem C8051F015 pro řízení piezomotorů. Řešte problematiku komunikace řídícího systému s nadřazeným počítačem PC.
4. Vytvořte a odlaďte potřebné softwarové vybavení pro řídící systém.
5. Proměřte charakteristiky piezomotoru.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle vlastního výběru.

Termín zadání: 9.2.2009 ***Termín odevzdání:*** 1.6.2009

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Macho, Ph.D.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práve 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.

ABSTRAKT

Práce má za cíl navrhnout a realizovat řídicí systém pro nový typ piezomotoru s akčními prvky MPA za účelem naměření charakteristik tohoto piezomotoru, potřebných pro jeho využití v praxi. V textu jsou nejprve zpracovány teoretické podklady potřebné pro návrh řídicího systému. V nich autor popisuje princip piezoelektrického jevu a zabývá se problematikou piezomotorů, které jsou na tomto principu založeny. Jsou zpracovány především teoretické poznatky týkající se daného piezomotoru. Dále popisuje vlastnosti mikrokontroléru C8051F015 založeném na procesorovém jádru 8051, který tvoří základní kámen celého řídicího systému. Ve větší míře jsou popsány jeho periférie, které jsou v řídicím systému využity. Jednou z hlavních částí textu je návrh obvodu analogové desky vytvářející pilový průběh napětí na piezokrystalech piezomotoru. Postupně jsou pomocí obrázků popsány jeho jednotlivé části. Celý obvod je řízen digitálními a analogovými výstupy z mikrokontroléru. Další část práce je zaměřena na propojení mikrokontroléru s nadřazeným PC, který mu po sériové lince předává pokyny od uživatele. Jsou ukázány možnosti navržené aplikace a popsány důležité programové komponenty, které jsou v této aplikaci použity. Neméně důležitý je samotný program do mikrokontroléru, který zpracovává příchozí zprávy z PC a podle nich ovládá své digitální a analogové výstupy. V následující kapitole je ukázána konstrukce řízeného piezomotoru a realizace prototypu řídicího systému. Závěr práce je věnován měření charakteristik piezomotoru, které zobrazují závislosti délky jednoho kroku piezomotoru na frekvenci, amplitudě napětí a svislém přítlaku. Výsledkem projektu, který je v této práci zpracován, je funkční řídicí systém pro daný piezomotor s možností řízení uživatelem přes aplikaci v PC. Získané charakteristiky piezomotoru budou použity pro jeho uvedení do praxe.

KLÍČOVÁ SLOVA: C8051F015, piezoelektrický jev, piezomotor, řízení.

ABSTRACT

This thesis aims to propose and implement a control system for a new type of piezomotor with the action elements of MPA for the purpose of measuring characteristics of this piezomotor needed for its use in practice. At the beginning the text processes theoretical data needed for design the control system. The author describes the principle of piezoelectric effect and deals with issues of piezomotors, which are based on this principle. Primarily theoretical knowledge relating to the piezomotor is processed. He also describes the characteristic of microcontroller C8051F015 based on processor core 8051, which is main element of whole control system. His peripherals, which are used in control system, are described more. One of the main parts of the text is design of analog board, which create sawmill course of voltage on piezocrystals of piezomotor. Images are used for description its individual parts. The circuit is controlled by digital and analog outputs of the microcontroller. Another part of the work is focused on communication between microcontroller and PC, which transmits instructions from user using the serial line. Further options of proposed application are shown and important used software components are described. Equally important is program for the microcontroller, which processes incoming messages from PC and manages its digital and analog outputs. In the next chapter is shown design of piezomotor and implementation of prototype the control system. Conclusion of work is devoted to measurement of piezomotor characteristics that shows resolution dependence on frequency, voltage amplitude and vertical pressure. The outgrowth of project, which is elaborated in this work, is the functional control system for the piezomotor with possibility of control through user application on PC. Obtained characteristics of piezomotor will be used for implementation into practice.

KEYWORDS: C8051F015, piezoelectric effect, piezomotor, control.

Bibliografická citace

ROBOTKA, J.: *Řízení piezomotoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009, 44 s., 1 příloha. Vedoucí práce: Ing. Tomáš Macho, Ph.D.

P r o h l á š e n í

„Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma *Řízení piezomotoru* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce 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 bakalářské 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 : Podpis:

P o d ě k o v á n í

Děkuji tímto především Ing. Martinovi Tmeji za ochotu a čas, který mi věnoval při řešení projektu, zvláště pak při řešení jeho technických problémů, dále děkuji panu RNDr. Petrovi Vašinovi za pomoc při návrhu obvodu analogové desky, RNDr. Michalovi Drštičkovi za odborné rady a v neposlední řadě vedoucímu projektu Ing. Tomáši Machovi, Ph.D. za cenné připomínky při vypracování této bakalářské práce.

V Brně dne : Podpis:

OBSAH

1. ÚVOD 11
2. PIEZOELEKTRICKÝ JEV 12
2.1 Princip piezoelektrického jevu 12
2.2 Piezomotory 12
2.2.1 Princip stick – slip 12
2.2.2 Princip push – pull a akční členy MPA 14
3. MIKROKONTROLÉR C8051F015 16
3.1 Procesorové jádro 8051 16
3.1.1 Organizace paměti 17
3.1.2 Registry speciálních funkcí 18
3.1.3 Přerušení 19
3.2 Periférie 20
3.2.1 Čítače/časovače 20
3.2.2 Sériový kanál (UART) 21
3.2.3 D-A převodník 22
3.2.4 Digitální porty 22
4. NÁVRH KONCEPCE ŘÍDICÍHO OBVODU 23
4.1 Vývojová deska pro mikrokontrolér C8051F015 23
4.2 Optimální tvar pilového průběhu napětí na piezokrystalu 24
5. NÁVRH OBVODU ŘÍDICÍHO SYSTÉMU 27
6. KOMUNIKACE S NADŘAZENÝM PC 30
6.1 Rozhraní RS232 a převodník MAX232 30
7. SOFTWAROVÉ VYBAVENÍ ŘÍDICÍHO SYSTÉMU 31
7.1 Program pro PC 31
7.2 Program pro mikrokontrolér 33
8. REALIZACE PIEZOMOTORU A ŘÍDICÍHO SYSTÉMU 34
8.1 Konstrukce piezomotoru 34
8.2 Realizace řídicího systému 35
9. NAMĚŘENÉ CHARAKTERISTIKY PIEZOMOTORU 37
9.1 Měření bez zatížení závažím 37

9.2 Měření se zatížením pomocí položeného závaží.....38
9.3 Měření se zatížením s využitím ložiska 40
10. ZÁVĚR 43
11. LITERATURA.....44

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1: Princip stick – slip. 13
Obrázek 2.2: Pilový průběh napětí na krystalu pro princip stick – slip 13
Obrázek 2.3: Uspořádání elektrod u akčních prvků MPA s vyznačením polarizace krystalů, na kterých jsou naneseny..... 14
Obrázek 2.4: Různá deformace piezokrystalů po přivedení stejného napětí 15
Obrázek 2.5: Princip push - pull [2]..... 15
Obrázek 2.6: Akční člen MPA a konstrukce piezomotoru s těmito prvky [2]..... 15
Obrázek 3.1: Blokové schéma procesorového jádra 8051 [4] 16
Obrázek 3.2: Organizace datové paměti procesorového jádra 8051..... 17
Obrázek 3.3: Registr PSW – stavové slovo 18
Obrázek 3.4: Registr TMOD pro nastavení čítačů 0 a 1 20
Obrázek 3.5: Registr TCON..... 21
Obrázek 4.1: Blokové schéma řídicího obvodu piezomotoru..... 23
Obrázek 4.2: Uspořádání I/O pinů vývojové desky mikrokontroléru [4]..... 24
Obrázek 4.3: Nelineární průběh napětí při nabíjení a vybíjení piezokrystalu. 25
Obrázek 4.4: Průběh napětí s prodlevou po nabití a po vybití piezokrystalu. 25
Obrázek 4.5: Řízení napětí metodou posicast pro oba směry pohybu. 26
Obrázek 4.6: Ideální pilový průběh napětí na piezokrystalu pro oba směry pohybu. 26
Obrázek 5.1: Řízený zdroj proudu. 27
Obrázek 5.2: Zdroj proudu řízený napětím z D-A převodníku..... 28
Obrázek 5.3: Zdroj proudu řízený napětím včetně vybíjecí části obvodu. 28
Obrázek 5.4: Spínání vybíjecích částí obvodu..... 29
Obrázek 6.1: Převodník napěťových úrovní MAX232 od firmy Maxim [7]..... 30
Obrázek 7.1: Okno aplikace ovládající piezomotor..... 31
Obrázek 8.1: Piezomotor se třemi prvky MPA, pohyblivá deska a závaží..... 34
Obrázek 8.2: Prototyp desky vytvářející pilový průběh napětí..... 35
Obrázek 8.3: Řídicí systém piezomotoru..... 36
Obrázek 9.1: Závislost délky jednoho kroku piezomotoru na amplitudě napětí a frekvenci..... 38

Obrázek 9.2: Závislost délky kroku na amplitudě napětí a frekvenci při zatížení položeným závažím o hmotnosti 370 g (přítlačná hmotnost 570 g). 39
Obrázek 9.3: Závislost délky kroku na amplitudě napětí a frekvenci při zatížení položeným závažím o hmotnosti 570 g (přítlačná hmotnost 770 g). 40
Obrázek 9.4: Závislost délky kroku na amplitudě napětí a frekvenci při zatížení závažím o hmotnosti 260 g (celková přítlačná hmotnost 520 g). 41
Obrázek 9.5: Závislost délky kroku na amplitudě napětí a frekvenci při zatížení závažím o hmotnosti 1040 g (celková přítlačná hmotnost 1300 g). 41

SEZNAM TABULEK

Tabulka 3.1: Módy čítačů/časovačů 0 a 1 21
Tabulka 3.2: Módy sériového kanálu 22
Tabulka 7.1: Základní parametry a metody komponenty serialPort. 32
Tabulka 7.2: Zprávy pro nastavení parametrů řízení piezomotoru. 33

1. ÚVOD

Od objevení piezoelektrického jevu uplynulo již přes 120 let, a přesto se nachází a objevují nové možnosti jeho uplatnění. Díky piezoelektrickému jevu se převádí elektrická energie v mechanickou (a naopak), a proto jsou aplikace piezoelektřiny tak mnohostranné. Její hlavní předností je, že zařízení, které piezoelektřiny využívají, mohou být opravdu miniaturní, a přitom velmi účinné. Proto je jejich využití v dnešní době miniaturizace a automatizace tak obrovské.

Důvodem volby tématu Řízení piezomotoru byl projekt firmy Delong Instruments a.s., jehož cílem je zjistit vlastnosti rozvíjejícího se typu piezoelektrických motorů založených na akčních členech MPA vyvinutých na EPFL – Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Díky těmto členům bude pravděpodobně možné dosáhnout ještě menších konstrukcí piezomotorů, než jsou nejmenší z těch, které se používají dnes. Bude tedy možné použít je v ještě miniaturnějších aplikacích než doposud. Firma Delong Instruments se zabývá především elektronovou mikroskopií, takže se přepokládá i možné využití v tomto oboru pro dostatečně přesný pojezd vzorku v mikroskopu.

Tato práce si klade za cíl zpracovat teoretické poznatky k návrhu řídicího systémů tohoto piezomotoru a poté takový systém navrhnout a realizovat.

Text je rozčleněn do několika částí. Po úvodní kapitole jsou nastíněny teoretické poznatky z oblasti piezoelektrického jevu a piezoelektrických motorů, které jsou na tomto jevu založeny. Dále je popsán 8bitový mikrokontrolér C8051F015. Jedná se o „srdce“ celého řídicího systému, a proto je mu věnována náležitá část textu. Jsou zmíněny jeho základní vlastnosti a popis jeho hlavních součástí. Následující kapitola se věnuje obecné koncepci řídicího systému a v kapitole páté je popsán návrh obvodu desky vytvářející pilový průběh napětí na piezokrystalu. Po stručné charakteristice komunikace mezi nadřazeným PC a mikrokontrolérem je popsáno softwarové vybavení řídicího systému. Kapitola osmá se zabývá konstrukcí piezomotoru a realizací prototypu řídicího systému. V poslední kapitole je proveden stručný záznam z měření charakteristik piezomotoru, které budou využity při uvádění piezomotoru do praxe.

2. PIEZOELEKTRICKÝ JEV

2.1 PRINCIP PIEZOELEKTRICKÉHO JEVU

Roku 1880 bratři Jacques a Pierre Curie objevili, že při mechanickém namáhání krystalů některých látek vzniká mezi jejich protilehlými stěnami elektrické napětí. Zjistili, že tento jev lze pozorovat pouze u látek, jejichž krystaly nemají střed souměrnosti. Mezi nejznámější patří křemen. Tento jev byl nazván piezoelektrický z řeckého slova *piedzó* = tlačit.

Pro technickou praxi je však důležitější, že tento jev platí i „naopak“, tedy že po přivedení napětí na protilehlé stěny krystalu některých látek se tento krystal zdeformuje. Právě tohoto jevu využívají piezomotory.

2.2 PIEZOMOTORY

Piezomotory jsou zařízení využívající piezoelektrický jev za účelem mechanického posunutí. Nejdůležitější součástí jsou krystaly piezoelektrické látky (tzn. látky vykazující piezoelektrické vlastnosti), které musí být polarizované, aby se po přivedení napětí na protilehlé stěny tento krystal zdeformoval v požadovaném směru. Tato deformace je v souvislosti s rozměry krystalu velice malá, a proto se piezomory využívají k poměrně malým, avšak velmi přesným mechanickým posunům. Existuje více principů, pomocí kterých lze piezomotory pohánět.

2.2.1 Princip stick – slip

Princip stick - slip je znázorněn na obrázku 2.1. Piezomotory založené na tomto principu využívají asymetrického pilového průběhu napětí, který je zobrazen na obrázku 2.2. Na pevné podložce je umístěn piezokrystal a na něm leží jezdec (břemeno, se kterým se posouvá). Nejprve se napětí pomalu zvětšuje, čímž dochází k postupné deformaci piezokrystalu a jezdec se pomalu pohybuje. Potom napětí prudce poklesne a dojde ke zpětné deformaci krystalu do původního stavu. Jezdec se ovšem v důsledku setrvačnosti nestihne přemístit zpět do počáteční polohy,

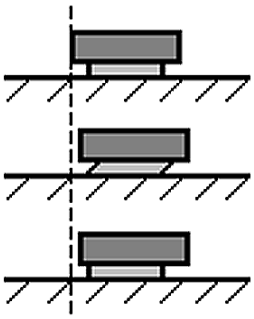
a proto zůstane v nové poloze. Tento cyklus se postupně opakuje a jezdec se posunuje. Můžeme zde mluvit o krokovém motoru, kde jeden krok odpovídá jednomu „zubu“ pilového průběhu napětí.

Tento princip umožňuje i tzv. skenovací mód, při kterém se pouze mění velikost přiloženého napětí na krystal, který se tak deformuje. Tímto způsobem můžeme dosáhnout podstatně většího rozlišení pro umístění jezdce do žádané pozice.

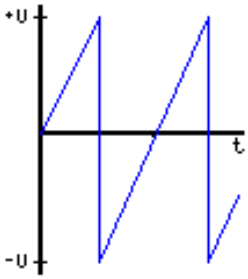
Mezi krystal a jezdec se zpravidla vkládá ještě další vrstva, po které jezdec klouže. Musí být tedy z materiálu, jehož povrch lze do hladka vybrousit.

Při návrhu řízení takového piezomotoru jde tedy především o návrh obvodu, který bude generovat optimální asymetrický pilový průběh napětí na piezokrystalu.

Při řízení piezomotoru obvykle nastávají dvě úskalí. Zaprvé, při zpětném prokluzu piezokrystalu pod jezdcem dojde k mírnému strhnutí jezdce spolu s horní stěnou krystalu. Zadruhé, po fázi proklouznutí dochází v krystalu k zákmitům, jejichž odeznění nějakou dobu trvá.



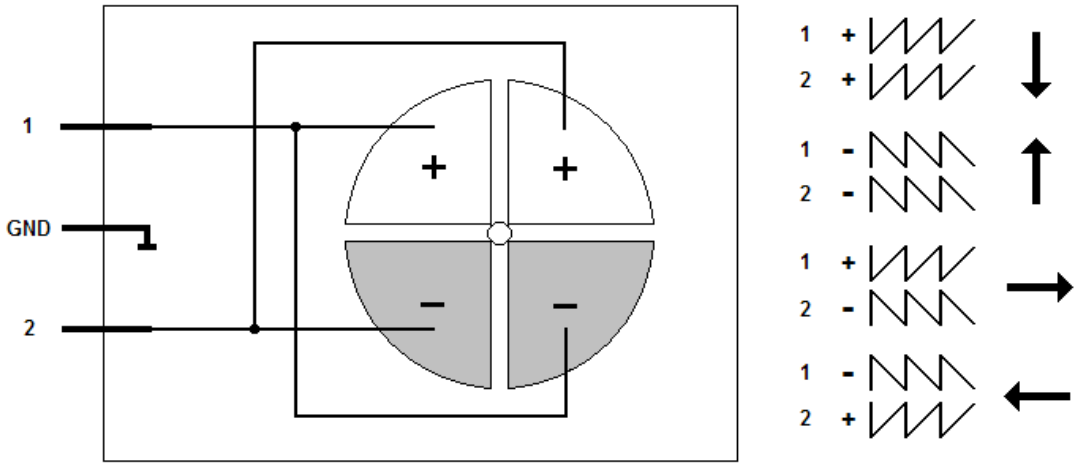
Obrázek 2.1: Princip stick – slip.



Obrázek 2.2: Pilový průběh napětí na krystalu pro princip stick – slip

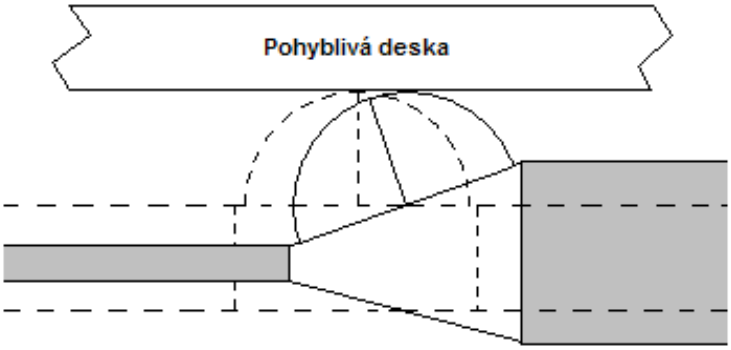
2.2.2 Princip push – pull a akční členy MPA

Jednou z variant piezomotorů jsou motory s akčními členy MPA vyvinuté na EPFL. Umí pracovat jak na principu stick – slip, tak na principu push – pull. Akční členy MPA jsou tvořeny z piezokeramického materiálu, který je po částech polarizovaný ve svislém směru. Na této keramice jsou naneseny elektrody, které mohou být uspořádány do dvou půlkruhů, nebo do čtyř čtvrtkruhů jak je vidět na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: Uspořádání elektrod u akčních prvků MPA s vyznačením polarizace krystalů, na kterých jsou naneseny.

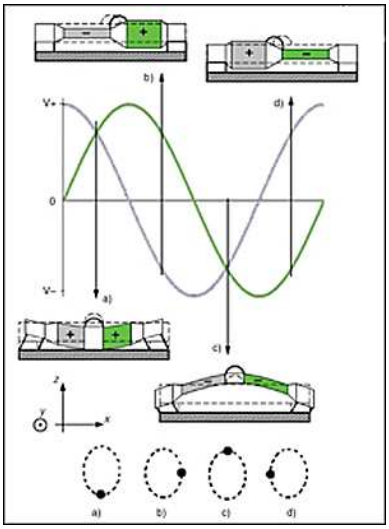
Uprostřed elektrod je nalepena malá safírová polokoule, která slouží jako styčná plocha mezi piezoeletrickým materiálem a pohyblivou deskou motoru. Pokud tyto členy pracují na principu stick – slip, jsou na vstupy 1 a 2 v obrázku 2.3 přiváděny pilové průběhy napětí, které mohou být stejně, nebo opačně orientované. Tím je dán i výsledný směr pohybu desky. Na obrázku 2.4 je vidět, že je-li přivedeno na elektrody nanesené na opačně polarizovaných krystalech stejné napětí, tyto krystaly se deformují opačným směrem a tím je dosaženo translačního i rotačního pohybu safírové polokoule. Ta svůj pohyb přenáší na desku, která na ní leží.



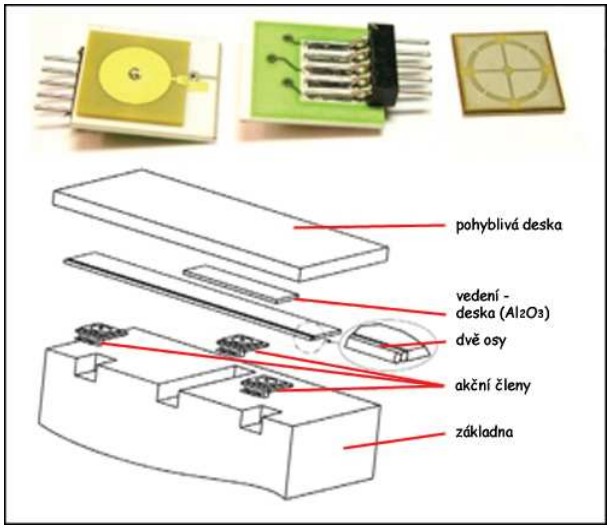
Obrázek 2.4: Různá deformace piezokrystalů po přivedení stejného napětí

Princip push – pull je znázorněn na obrázku 2.5. Na elektrody MPA jsou přiváděny sinusové signály posunuté vzájemně o $\pi/2$. Safírová polokoule potom vykonává pohyb po elipse a posouvá s pohyblivou deskou motoru.

Jedno z možných uspořádání piezomotoru, který využívá akční členy MPA, je zobrazeno na obrázku 2.6. Akční členy MPA jsou umístěny na pevné základně. Dva z nich jsou za sebou ve směru pohybu pohyblivé desky a jejich safírové polokoule se pohybují v drážce vytvořené dvěma osami (dlouhými válečky). Třetí akční člen je umístěn bokem a spolu s ostatními členy tak vytváří rovinu, na které leží pohyblivá deska.



Obrázek 2.5: Princip push - pull [2].



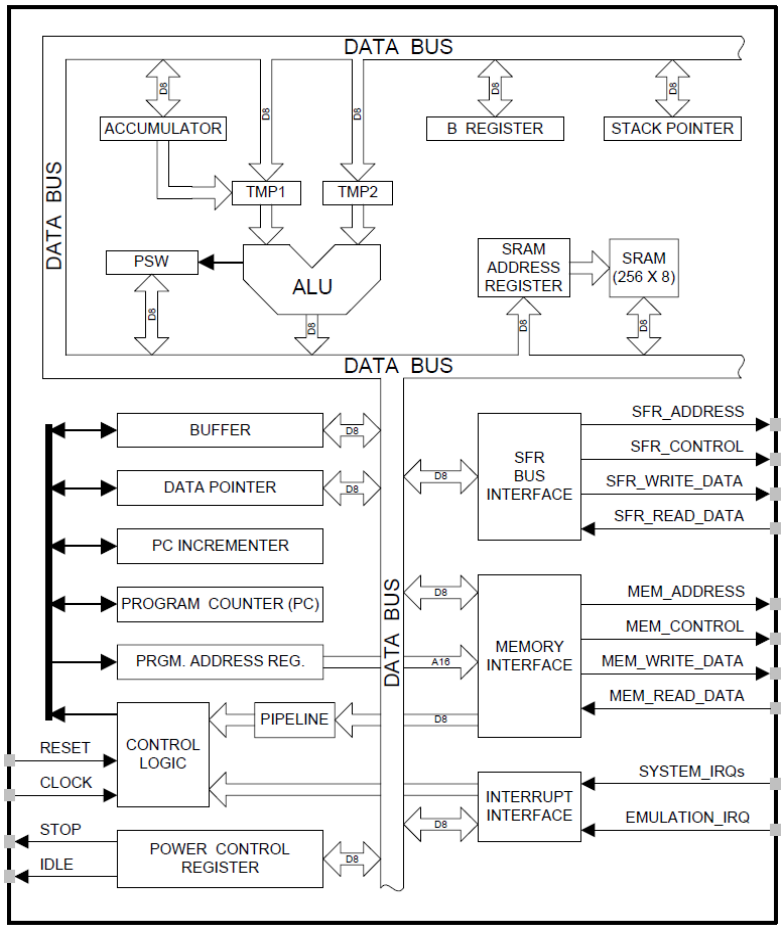
Obrázek 2.6: Akční člen MPA a konstrukce piezomotoru s těmito prvky [2].

3. MIKROKONTROLÉR C8051F015

Základním prvkem celého řídicího systému je mikrokontrolér. Jedná se o typ C8051F015 od firmy Silicon Laboratories s procesorovým jádrem 8051 a mnoha dalšími periferiemi.

3.1 PROCESOROVÉ JÁDRO 8051

Procesorové jádro 8051 pochází z roku 1980 a během necelých třech desetiletí prošlo řadou změn. Mikrokontrolér C8051F015 má procesorový systém označený jako CIP-51, jehož instrukční soubor je plně kompatibilní se systémem MCS-51. Blokové schéma procesorového jádra 8051 je zobrazeno na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Blokové schéma procesorového jádra 8051 [4]

3.1.1 Organizace paměti

Procesor má oddělenou programovou a datovou paměť, které jsou přístupné různými instrukcemi. Paměťový prostor můžeme dále dělit na vnitřní, umístěný na čipu, a vnější, který lze v případě potřeby vytvořit s pomocí dalších součástek. Programová paměť je typu FLASH, takže je vícekrát programovatelná a má velikost 32kB. 512 bytů z této velikosti je ovšem vyhrazeno pro tovární účely a nejsou tak uživateli poskytnuty. Organizace datové paměti je zobrazena na obrázku 3.2. Pro vnitřní datovou paměť RAM je vyhrazeno 256 bytů. Prvních 128 bytů je tvořeno 4 bankami (0,1,2,3) po osmi registrech (R0, R1, …, R7), dále 16 byty pro bitovou oblast a zbývající volně přístupnou datovou pamětí. Dalších 128 bytů se využívá k adresování některých významných bitů příslušejících speciálním registrům. Je-li k jádru připojena vnější paměť dat, je překrývání vnitřního a vnějšího adresového prostoru odstraněno tím, že přístup do každého prostoru je realizován pomocí rozdílných instrukcí. Mikrokontrolér C8051F015 má k jádru připojenu externí datovou paměť RAM o velikosti 2048 bytů.

Obrázek 3.2: Organizace datové paměti procesorového jádra 8051.

3.1.2 Registry speciálních funkcí

Do registrů speciálních funkcí (SFR – Special Function Registers) se ukládají všechny důležité informace pro činnost mikrokontroléru. Nyní budou popsány některé z nich a ostatní až spolu s periferiemi, kterých se tyto registry týkají.

A – Střadač (akumulátor) je základní registr aritmetickologické jednotky (ALU). Při aritmetických a logických operacích je v něm uložen jeden z operandů a následně je do něj uložen výsledek. Střadač leží ve vnitřním paměťovém prostoru a je přístupný nejen běžnými instrukcemi, ale i pomocí přímé adresy označované symbolickým názvem ACC.

B – Registr obsahuje druhý operand (první je umístěn ve střadači) pro instrukce násobení a dělení. Spolu se střadačem obsahuje výsledek operací násobení a dělení. Dá se použít také jako univerzální registr.

PSW – Stavové slovo má 7 významových bitů, je zobrazeno na obrázku 3.3.

CY	AC	F0	RS1	RS0	OV	F1	PARITY
7	6	5	4	3	2	1	0

Obrázek 3.3: Registr PSW – stavové slovo

- **CY –** přenos (Carry) je nastaven při přenosu z osmého do devátého bitu
- **AC** – pomocný přenos (Auxiliary Carry) je nastaven při operaci sčítání při přenosu mezi čtvrtým a pátým bitem
- **F0** – uživatelský příznak pro indikaci nějaké události
- **RS1, RS2** – určují paměťovou banku
- **OV** – indikuje přetečení (overflow) při sčítání nebo odčítání, jestliže operandy považujeme za čísla se znaménkem
- **F1** – uživatelský příznak pro indikaci nějaké události
- **PARITY** – příznak parity indikuje lichou paritu střadače a je aktualizován po každé instrukci

SP – Ukazatel zásobníku (Stack Pointer) je 8bitový registr ukazující na první položku v zásobníku a je na rozdíl od většiny jiných procesorů inkrementován. Vlastní zásobník je umístěn v datové paměti RAM.

DPL, DPH – tvoří nižší a vyšší slabiku 16bitového ukazatele **DPTR**, který slouží k adresování vnější datové paměti RAM nebo paměti programu.

PC – Čítač instrukcí (Program Counter) je 16bitový čítač instrukcí a není přímo programově dostupný.

3.1.3 Přerušení

Aby mohlo procesorové jádro 8051 lépe komunikovat s periferiemi, je vybaveno přerušovacím systémem. Mikrokontrolér C8051F015 má celkem 21 zdrojů přerušení se dvěma nastavitelnými úrovněmi priorit.

K dispozici je 6 externích přerušení. Dvě z nich mohou být vyvolána buď logickou úrovní 0 nebo sestupnou hranou na příslušných bitech /INT0 a /INT1. Ostatní 4 externí přerušení mohou být vyvolána pouze sestupnou hranou. Dále jsou k dispozici přerušení od čtyř časovačů, od sériového portu UART, od sériového periferního rozhraní SPI, od komunikačního rozhraní SMBus, od dvou komparátorů, od programovatelného pole, od analogově-digitálního převodníku (informace o konci konverze) a od externího krystalového oscilátoru (informace o tom, že je připraven).

Přerušení od jednotlivých zdrojů lze povolit nebo zakázat pomocí 8bitového registru IE (Interrupt Enable) a dále pomocí dvou 8 bitových registrů EIE1 a EIE2 (Extended Interrupt Enable). Pomocí bitu EA v registru IE lze globálně zakázat všechna přerušení.

Každý zdroj přerušení má svoji prioritu v rámci ostatních zdrojů, která je určena podle tabulky zdrojů přerušení v dokumentaci mikrokontroléru od jeho výrobce (viz [5]). Přijdou-li tedy zároveň dvě přerušení od různých zdrojů, je nejprve obslouženo to, které má větší prioritu. Potřebuje-li uživatel z nějakého důvodu přiřadit některému ze zdrojů přerušení nejvyšší prioritu, může mu nastavit vyšší prioritu pomocí registrů IP (Interrupt Priority), EIP1 a EIP2 (Extended Interrupt Priority).

3.2 PERIFÉRIE

Mikrokontrolér C8051F015 má řadu periférií, které komunikují po vnitřních sběrnicích s procesorovým jádrem 8051. Uvádím pouze některé z nich, se kterými budu později pracovat.

3.2.1 Čítače/časovače

Rozdíl mezi čítačem a časovačem je takový, že čítač počítá sestupné hrany vnějšího signálu, zatímco časovač přičítá jedničku za každý strojový cyklus, který je tvořen 12 periodami oscilátoru. Časovač se používá k vytvoření určitého časového intervalu, nejčastěji ve funkci zpoždění. Mikrokontrolér C8051F015 obsahuje celkem čtyři 16bitové čítače/časovače. První tři mohou být nastaveny jako čítač nebo časovač, čtvrtý pracuje pouze ve funkci časovače.

Obsah čítačů 0 a 1 je přístupný pomocí paměťově mapovaných registrů TH0, TL0 (čítač 0) a TH1, TL1 (čítač 1). THn určuje 8 vyšších bitů příslušného čítače, TLn určuje 8 nižších bitů příslušného čítače. Jejich nastavení se provádí nastavením registru TMOD, který je zobrazen na obrázku 3.4. Čítače mohou pracovat až ve čtyřech různých módech, jak je popsáno v tabulce 3.1. Spouštění čítačů je realizováno pomocí bitů TR1 a TR2 v registru TCON zobrazeném na obrázku 3.5.

GATE1	C/T1	T1M1	T1M0	GATE2	C/T2	T0M1	T0M0
7	6	5	4	3	2	1	0

Obrázek 3.4: Registr TMOD pro nastavení čítačů 0 a 1

- **GATE** – slouží k řízení hradlování; je-li GATE=1, je čítač aktivován při vstupu INTn a TRn a čítač je tak řízen nejen programově pomocí bitu TRn, ale zároveň i pomocí vnějšího signálu přivedeného na INTn; je-li GATE=0, je čítač aktivován pouze programově pomocí bitu TRn
- **C/T** – čítač/časovač; C/T=0 je režim časovače, C/T=1 je režim čítače
- **TM1, TM0 –** volba módů čítače/časovače podle tabulky 3.1

TM1	TM2	Mód
0	0	Mód 0: 13bitový čítač/časovač
0	1	Mód 1: 16bitový čítač/časovač
1	0	Mód 2: 8bitový čítač/časovač s automatickým načtením počáteční hodnoty
1	1	Mód 3: Dva 8bitové čítače/časovače z 16bitového čítače 0; čítač 1 je zastaven

Tabulka 3.1: Módy čítačů/časovačů 0 a 1

TF1	TR1	TF0	TR0	IE1	IT1	IE0	IT0
7	6	5	4	3	2	1	0

Obrázek 3.5: Registr TCON

- **TF1, TF0** – indikují přetečení příslušného čítače/časovače
- **TR1, TR0** – slouží ke spuštění příslušného čítače/časovače
- **IE1, IE0 –** indikují příchod vnějšího přerušení
- **IT1, IT1 –** slouží ke konfiguraci příslušného portu vnějšího přerušení

Dále je v mikrokontroléru C8051F015 k dispozici čítač 2, který může být použit také jako 16bitový čítač/časovač. Jeho předností ale je, že může být přímo použit k synchronizaci přijímaných a odesílaných dat po sériové lince.

Posledním čítačem je 16bitový časovač 3, který je tvořen dvěma byty TMR3L a TMR3H. Jeho použití je pouze jako časovač s nastavitelnou počáteční hodnotou po přetečení.

3.2.2 Sériový kanál (UART)

Součástí mikrokontroléru C8051F015 je plně duplexní sériový kanál, který umožňuje komunikaci v 8 a 9bitovém asynchronním režimu nebo v 8bitovém synchronním režimu. Komunikační kanál je vybaven registrem s označením SBUF, do kterého se automaticky uloží data po příjmu celého bytu, nebo naopak se do něj zapisují data určená k odeslání.

SM1	SM2	Typ přenosu	Bitová rychlost
0	0	Mód 0: 8bitový synchronní	$f_{osc}/12$
0	1	Mód 1: 8bitový UART	časovač 2
1	0	Mód 2: 9bitový UART	$f_{osc}/32$, $f_{osc}/64$
1	1	Mód 3: 9bitový UART	časovač 2

Tabulka 3.2: Módy sériového kanálu

Sériový kanál může pracovat ve 4 módech, které zobrazuje tabulka 3.2. Nastavení jednotlivých módů je možné pomocí bitů SM0 a SM1 v registru SCON. Ten dále obsahuje bit REN pro povolení příjmu dat, bity TB8 a RB8 obsahující devátý odeslaný a přijatý bit a bity TI a RI pro nastavení příznaku odeslaných a přijatých dat.

3.2.3 D-A převodník

V mikrokontroléru jsou k dispozici celkem dva 12bitové digitálně-analogové převodníky. Velikosti hodnot analogových výstupů jsou závislé na číselných hodnotách v registrech DAC0H a DAC0L pro první převodník a v registrech DAC1H a DAC1L pro druhý převodník. Protože jsou tyto registry 8bitové, což je dohromady 16 bitů pro jeden převodník, nebudou některé bity použity. V registrech DAC0CN a DAC1CN se nastavuje, jaké bity nebudou použity, a současně se v nich dá pomocí bitů DAC0EN a DAC1EN příslušný D-A převodník povolit, nebo zakázat.

3.2.4 Digitální porty

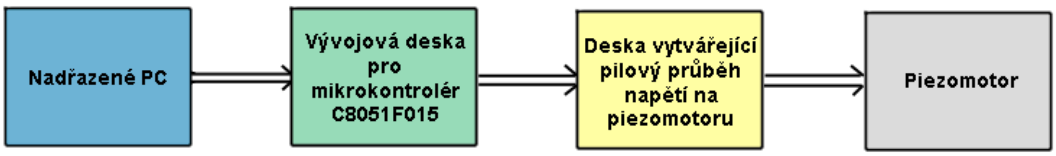
Celkem jsou k dispozici 4 digitální porty s osmi vstupně-výstupními piny. Každý port je přístupný přes příslušný registr P0, P1, P2 nebo P3. Pomocí registrů XBR0, XBR1 a XBR2 se výstupním pinům přiřazují vnitřní digitální funkce, jako jsou výstupy komparátorů, komunikační porty sériového kanálu, externí přerušení a podobně. Charakteristika vstupně-výstupních pinů se definuje v registrech PRTnCF, kde n značí příslušný port. Každý z pinů může být definován buď jako „open-drain“, nebo jako „push-pull“. Konfigurace „open-drain“ se zpravidla používá pro vstupní signál, naopak konfigurace „push-pull“ pro výstupní signál.

4. NÁVRH KONCEPCE ŘÍDICÍHO OBVODU

Jak již byl řečeno v úvodu, řízený piezomotor se skládá z akčních členů MPA, které jsou popsány v kapitole 2. Celkem jsou použity tři a jejich uspořádání je stejné jako na obrázku 2.6. Řízení bude probíhat na základě principu stick – slip, který mohou tyto akční členy MPA ke svému provozu využít.

Řídicí systém je navrhován zpočátku pouze pro řízení v otevřené smyčce. V tomto případě je tedy vhodné mluvit pouze o ovládání piezomotoru. Při pozdějším pokračování projektu, jestliže bude k dispozici snímač polohy, bude do tohoto systému zavedena zpětná vazba.

Pro řízení je použita vývojová deska pro mikrokontrolér C8051F015 od firmy Silicon Laboratories, takže již není nutné starat se o obvody zajišťující správnou funkci mikrokontroléru. Je možné přímo využít jeho vstupy a výstupy, které jsou na vývojové desce systematicky vyvedeny. Další součástí řídícího obvodu je analogová deska založená na napětím řízených zdrojích konstantního proudu, která slouží k vytváření asymetrického pilového průběhu napětí na piezokrystalech. Posledním prvkem je nadřazené PC, které komunikuje po sériové lince s vývojovou deskou mirkokontroléru a slouží k ovládání piezomotoru uživatelem. Na obrázku 4.1 je zobrazeno blokové schéma řídicího obvodu.

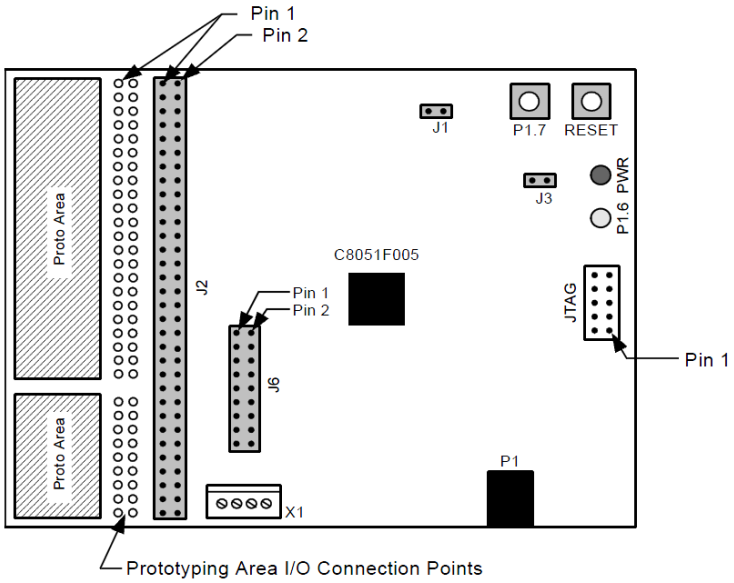


Obrázek 4.1: Blokové schéma řídicího obvodu piezomotoru.

4.1 VÝVOJOVÁ DESKA PRO MIKROKONTROLÉR C8051F015

Uspořádání vstupních/výstupních zařízení a pinů vývojové desky mikrokontrolérů řady C8051F00X/01X je zobrazeno na obrázku 4.2. V levé části jsou systematicky vyvedeny piny všech čtyř digitálních portů P0 až P3, dále potom

vstupní/výstupní piny analogových veličin, referenční napětí, analogová a digitální zem a některé další speciální piny. V pravé části je potom konektor pro připojení napájení, konektor JTAG pro připojení programátoru desky, červená dioda indikující napájení, zelená univerzální dioda, tlačítko RESET a jedno univerzální tlačítko.



Obrázek 4.2: Uspořádání I/O pinů vývojové desky mikrokontroléru [4].

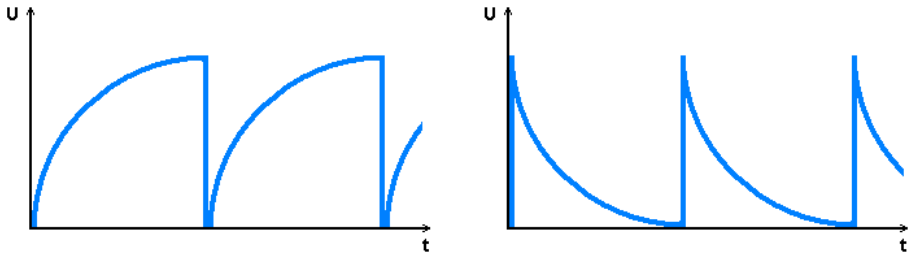
- **P1 –** konektor napájení desky (vstupní stejnosměrné napětí 7 až 15 V)
- **J1 –** propojka, která propojuje univerzální tlačítko s pinem P1.7
- **J2 –** 64pinový konektor se vstupně-výstupními piny
- **J3 -** propojka, která propojuje zelenou diodu s pinem P1.6
- **J4 –** JTAG konektor pro připojení programátoru
- **J6 –** Konfigurační konektor pro analogové vstupy/výstupy.
- **X1 –** Terminál pro analogové vstupy/výstupy

4.2 OPTIMÁLNÍ TVAR PILOVÉHO PRŮBĚHU NAPĚTÍ NA PIEZOKRYSTALU

Z principu stick – slip vyplývá, že jedna hrana pilového průběhu musí být dostatečně pozvolná, aby se jezdec (břemeno) pochyboval spolu se safírovými

polokoulemi, na kterých leží. Naopak druhá hrana pilového průběhu musí být co nejstrmější, aby došlo k co nejlepšímu prokluzu safírových polokoulí pod jezdcem.

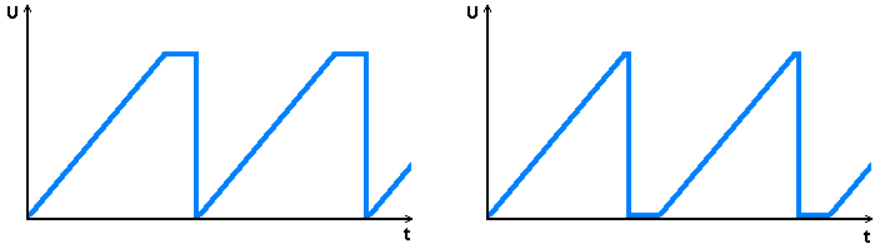
Piezokrystaly mají čistě kapacitní charakter, z čehož vyplývá, že kdybychom je nabíjeli (resp. vybíjeli) pouze přiloženým napětím, došlo by k nelineárnímu průběhu nabíjení (resp. vybíjení), jak ukazuje obrázek 4.3.



Obrázek 4.3: Nelineární průběh napětí při nabíjení a vybíjení piezokrystalu.

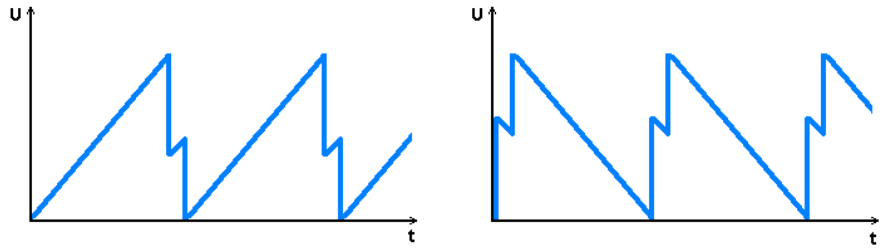
Piezomotor by sice při tomto průběhu napětí také fungoval, ale z optimálního hlediska se jako mnohem výhodnější jeví lineární průběh. U nelineárního průběhu totiž na začátku nabíjení (resp. vybíjení) dojde k mírnému prokluzu jezdce, protože je v tomto okamžiku charakteristika průběhu napětí příliš strmá.

Dalším nežádoucím jevem je prodleva. Ta se může projevit jak po nabití, tak po vybití piezokrystalu. Situaci znázorňuje obrázek 4.4. Problém spočívá jednak v tom, že se za určitou dobu t vykoná menší počet period („zubů pily“), než při průběhu bez prodlev, a dále v tom, že při této prodlevě dojde k zastavení jezdce, který musí být následně opět rozpohybován. Pohyb tedy nebude plynulý. Je proto potřeba při řízení dodržet co nejlepší načasování vybíjení a nabíjení piezokrystalu.



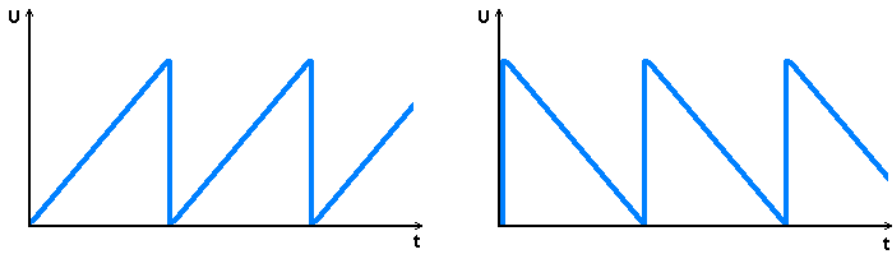
Obrázek 4.4: Průběh napětí s prodlevou po nabití a po vybití piezokrystalu.

Posledním problémem jsou zákmity, které vznikají v piezokrystalu po fázi proklouznutí. Jejich odeznění nějakou dobu trvá, a proto je snaha o jejich eliminaci. Řešením může být řízení typu posicast, při kterém je signál tvarován podobně jako na obrázku 4.5. Protože by ale řízení tohoto typu značně zkomplikovalo celou práci, nebude nadále uvažováno.



Obrázek 4.5: Řízení napětí metodou posicast pro oba směry pohybu.

Cílem je tedy navrhnout elektrický obvod, který vytvoří lineární asymetrický pilový průběh napětí bez prodlev, jak ukazuje obrázek 4.6. Pomocí nadřazeného PC se bude měnit frekvence tohoto průběhu, čímž se bude měnit rychlost pohybu piezomotoru. Dalším parametrem je samozřejmě amplituda napětí, která souvisí s délkou jednoho „kroku“. Dá se očekávat, že závislost mezi frekvencí a rychlostí pohybu, stejně tak jako mezi amplitudou a délkou jednoho kroku, nebude lineární, protože velký význam bude hrát dynamika celého systému.

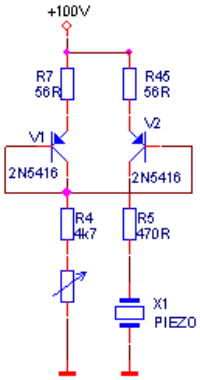


Obrázek 4.6: Ideální pilový průběh napětí na piezokrystalu pro oba směry pohybu.

5. NÁVRH OBVODU ŘÍDICÍHO SYSTÉMU

Obvodové schéma desky vytvářející pilový průběh napětí na piezokrystalu je zobrazeno v příloze 1. Schéma již bylo rovnou navrženo pro řízení piezomotoru s možností pohybu do dvou směrů.

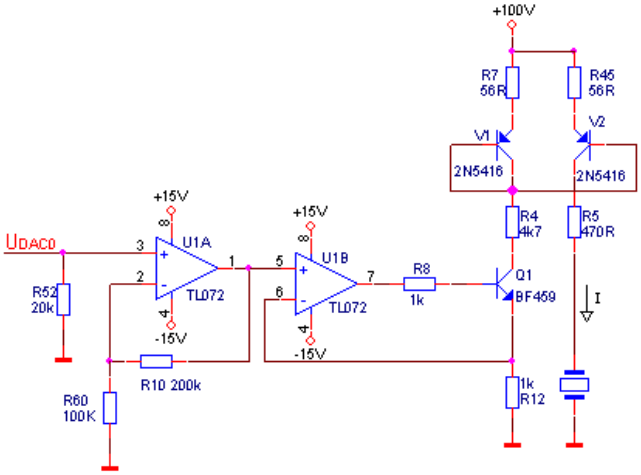
Základním kamenem obvodu jsou 4 řízené zdroje proudu – dva se využívají pro pohyb v ose *x* a dva pro pohyb v ose *y*. Protože má piezomotor zatím možnost pohybu pouze v jednom směru, využijí se pouze dva z těchto čtyř proudových zdrojů, každý pro jinou orientaci pohybu. Na obrázku 5.1 je nakresleno zjednodušené zapojení jednoho tohoto řízeného proudového zdroje, u kterého je velikost proudu řízena potenciometrem. K tomuto zdroji je připojen krystal, který by se v tomto případě nabil na napětí +100 V.



Obrázek 5.1: Řízený zdroj proudu.

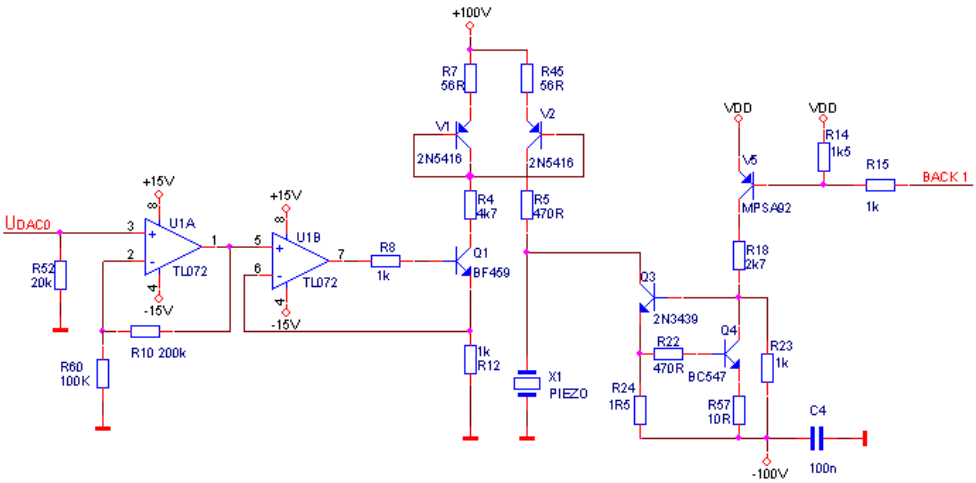
Tyto řízené zdroje proudu jsou tvořeny proudovými zrcadly. Aby mohla být velikost proudu jednoduše regulována pomocí mikrokontroléru, nejsou tyto zdroje řízeny potenciometrem, jak ukazuje obrázek 5.1, ale napětím z D-A převodníků jak ukazuje obrázek 5.2. Signál z převodníku je zesílen na prvním operačním zesilovači a přiveden na kladný vstup druhého zesilovače. Ten se snaží vytvořit napětí téže velikosti i na svém záporném vstupu, a proto otevře tranzistor Q1 tak, aby toto napětí na záporném vstupu získal. Tím pádem bude stejné napětí i na rezistoru R12 a v obou větvích proudového zrcadla poteče proud o velikosti I podle rovnice 5.1.

$$I = \frac{U_{DAC0} \cdot (R_{10} / R_{60} + 1)}{R_{12}} \tag{5.1}$$



Obrázek 5.2: Zdroj proudu řízený napětím z D-A převodníku.

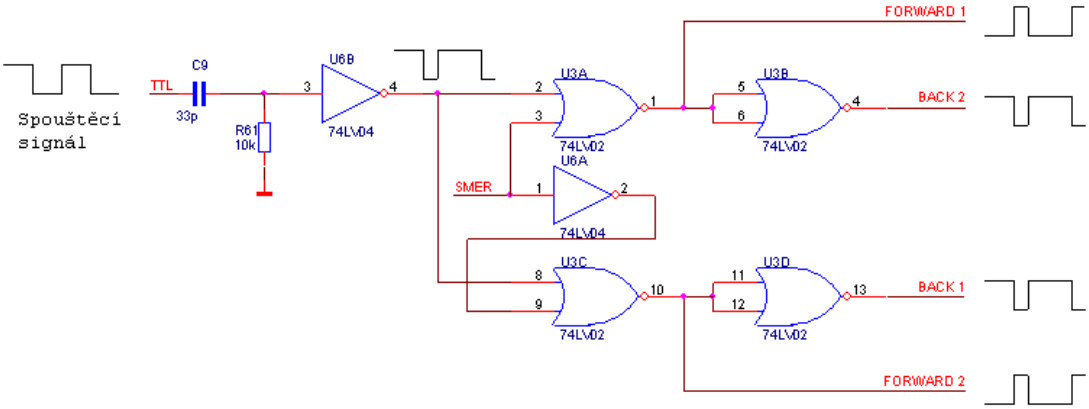
Tímto způsobem je dosaženo nabíjení piezokrystalu konstantním proudem, což představuje pozvolnou hranu potřebného pilového průběhu napětí. Po nabití je potřeba piezokrystal ve správný čas rychle vybít na napětí opačné polarity, čímž se získá požadovaná strmá hrana. Tuto činnost realizuje vybíjecí část obvodu, která je znázorněna na obrázku 5.3.



Obrázek 5.3: Zdroj proudu řízený napětím včetně vybíjecí části obvodu.

Je-li na vstup označený jako BACK1 přivedena logická úroveň 0, je sepnut tranzistor V5 a do báze tranzistoru Q3 začne téct elektrický proud. Tím se tento tranzistor sepne a piezokrystal (nabitý na napětí +100 V) je tak přes malý odpor R24 nabit na napětí -100 V. Je ovšem nutné tento proud omezit tak, aby nebyl rezistor R24 přespříliš zatížen. Omezení je realizováno tranzistorem Q4, do jehož báze teče elektrický proud přes rezistor R22, čímž dojde k jeho otevření a omezení proudu do báze tranzistoru Q3.

Poslední část obvodu je zobrazena na obrázku 5.4. Ta se stará o řízení spínání vybíjecích částí obvodu pospaných výše.



Obrázek 5.4: Spínání vybíjecích částí obvodu.

Na CR článek je přiveden obdélníkový signál z mikrokontroléru, který je dále negován, čímž vznikne obdélníkový signál s velmi velkou střídou. Ta je nutná k velmi krátké době sepnutí příslušné vybíjecí části obvodu, aby se poté mohl piezokrystal znovu začít nabíjet. Tato doba musí být ovšem alespoň tak velká, aby stačila k vybití piezokrystalu. Obdélníkový signál s velmi velkou střídou je dále logicky zpracován spolu s logickým vstupem SMĚR z mikrokontroléru pomocí logických hradel, z jejichž výstupů se řídí jednotlivé vybíjecí části obvodu. Je zaručeno, že nikdy nebudou sepnuty dvě protichůdné větve obvodu, čímž by se krystal připojil současně k napětí -100 V i k napětí +100V a došlo by tak ke zkratu.

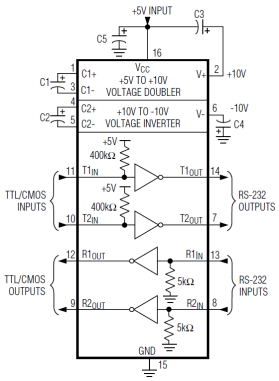
6. KOMUNIKACE S NADŘAZENÝM PC

Aby mohl uživatel piezomotor jednoduše ovládat, bude mu umožněno nastavovat jednotlivé parametry, jakou jsou frekvence, směr, počet kroků a použitá amplituda napětí, přes aplikaci v PC. Komunikace mezi tímto počítačem a mikrokontrolérem bude probíhat po sériové lince přes komunikační rozhraní RS232.

6.1 ROZHRANÍ RS232 A PŘEVODNÍK MAX232

RS232 je sériové komunikační rozhraní, které umožňuje obousměrnou asynchronní sériovou komunikaci mezi dvěma zařízeními s přenosovou rychlostí až 115,2 kb/s. Pro komunikaci mezi mikrokontrolérem a PC je využit přenos po 8 bitech (tedy po jednom bytu) doplněný úvodním a koncovým synchronizačním bitem. Parita pro tuto aplikaci použita nebyla. Zařízení jsou propojena pomocí 3vodičového vedení - dráty pro vysílač, pro přijímač a pro společnou zem. Pro komunikaci musí být použit některý z převodníků napěťových úrovní.

Převodník napěťových úrovní MAX232 od firmy Maxim je jeden z nejrozšířenějších a je vyráběn v mnoha různých variantách. Používá se pro převod napěťových úrovní rozhraní RS232 (+12 V a -12V) na úrovně používané v TTL logických obvodech (0V a +5V). Na obrázku 6.1 je zobrazeno jeho vnitřní zapojení a připojení externích kondenzátorů potřebných k provozu nábojové pumpy.



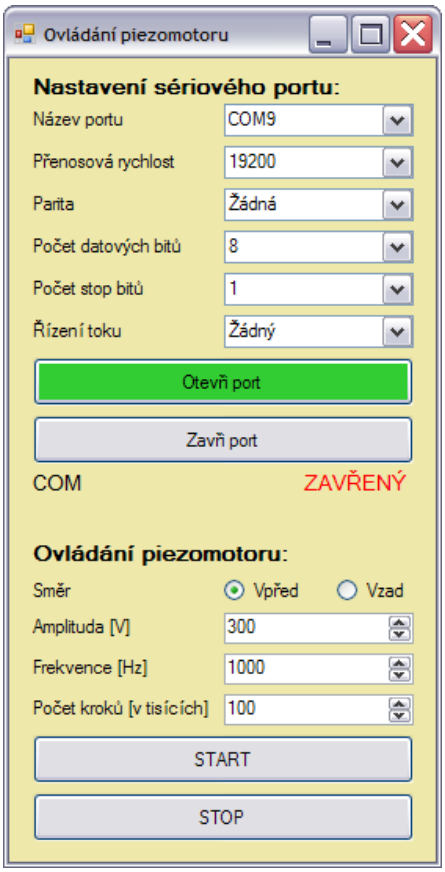
Obrázek 6.1: Převodník napěťových úrovní MAX232 od firmy Maxim [7].

7. SOFTWAROVÉ VYBAVENÍ ŘÍDICÍHO SYSTÉMU

7.1 PROGRAM PRO PC

Požadavky na aplikaci sloužící k ovládání piezomotoru byly stanoveny tak, aby aplikace umožňovala komunikaci s mikrokontrolérem pomocí sériové linky RS232 s využitím sériového portu COM v PC, dále aby bylo možné nastavit použitou amplitudu napětí, frekvenci, směr a počet kroků, o které se piezomotor posune, a také aby mohl být piezomotor kdykoliv spuštěn nebo zastaven.

Aplikace byla naprogramována v jazyku C# v prostředí Microsoft Visual Studio 2008 s využitím platformy .NET Framework 3.5. Je tvořena jedním oknem, které je zobrazeno na obrázku 7.1.



Obrázek 7.1: Okno aplikace ovládající piezomotor.

Již od začátku je tento projekt chápán jak výzkumný, a proto i ovládající aplikace není určena pro běžné uživatele, ve které jsou obvykle ošetřeny veškeré chybové stavy.

Pro zahájení komunikace je potřeba nejprve nastavit parametry přenosu, jako jsou název použitého portu, přenosová rychlost, apod. K tomuto účelu slouží komponenta „serialPort“. Do jejích parametrů se načtou potřebné údaje z formuláře umístěného v aplikaci a následně je tento port přes tlačítko „Otevři port“ otevřen pomocí metody Open(). K zápisu řetězce do výstupního bufferu byla použita metoda WriteLine(), která zároveň zapíše i znak nového řádku. Po skončení komunikace musí být port opět zavřen, k čemuž slouží metoda Close(). V tabulce 7.1 jsou uvedeny základní parametry a metody komponenty serialPort, které byly v projektu použity.

Parametr	*Popis*
PortName	Název portu
BaudRate	Přenosová rychlost
Parity	Parita
DataBits	Počet datových bitů
StopBits	Počet stop bitů
HandShake	Řízení toku
Metoda	*Popis*
Open()	Otevření portu
Close()	Zavření portu
WriteLine()	Zapsání řetězce a nového řádku do výstupního bufferu

Tabulka 7.1: Základní parametry a metody komponenty serialPort.

Ihned po otevření portu jsou přes sériovou linku do mikrokontroléru odeslány zprávy s aktuálním nastavením jednotlivých parametrů pro ovládání piezomotoru.

Pro ovládání piezomotoru lze nastavit směr (Vpřed/Vzad), použitá amplituda napětí, frekvence řídicího signálu a počet kroků, o které se piezomotor po spuštění posune. Pole, pomocí kterých se toto nastavení provádí, jsou obsloužena tak, že při změně jejich hodnoty dojde k okamžitému odeslání nové hodnoty do mikrokontroléru. Není tedy možné tato pole měnit bez otevřeného portu. Tlačítka

START a STOP slouží k odesílání zprávy, která spouští (resp. zastavuje) chod piezomotoru. V tabulce 7.2 jsou uvedeny zprávy, které se odesílají do mikrokontroléru pro nastavení jednotlivých parametrů řízení piezomotoru.

Parametr	*Zpráva odesílaná do mikrokontroléru*
Směr	„s 0“ pro směr vpřed, „s 1“ pro směr vzad
Amplituda [V]	„a XXX“, kde XXX je nastavená hodnota
Frekvence [Hz]	„f XXX“, kde XXX je nastavená hodnota
Počet kroků [v tisících]	„p XXX“, kde XXX je nastavená hodnota
Spuštění piezomotoru	start
Zastavení piezomotoru	stop

Tabulka 7.2: Zprávy pro nastavení parametrů řízení piezomotoru.

7.2 PROGRAM PRO MIKROKONTROLÉR

Program pro mikrokontrolér C8051F015 byl napsán v jazyce C v prostředí Silicon Laboratories IDE. Toto prostředí bylo vyvinuto přímo výrobcem mikrokontroléru a využívá kompilátoru od firmy Keil. Hlavní úlohou programu je ovládání čtyř výstupů, které řídí analogovou desku vytvářející pilový průběh napětí na piezokrystalech: digitální výstup s obdélníkovým signálem pro spínání vybíjecích částí obvodu, digitální výstup pro určení směru pohybu a dva analogové výstupy pro řízení velikosti nabíjecího proudu.

Na začátku programu jsou připojeny potřebné knihovny a jsou deklarovány veškeré potřebné bity, registry, konstanty, funkční prototypy a proměnné. Především je nastavena přenosová rychlost po sériové lince (19200 bps) a frekvence krystalu, který je použit jako externí oscilátor mikrokontroléru. Dále jsou nastaveny počáteční hodnoty pro ovládání piezomotoru – směr, frekvence, použitá amplituda napětí a počet kroků, o které se piezomotor po spuštění posune.

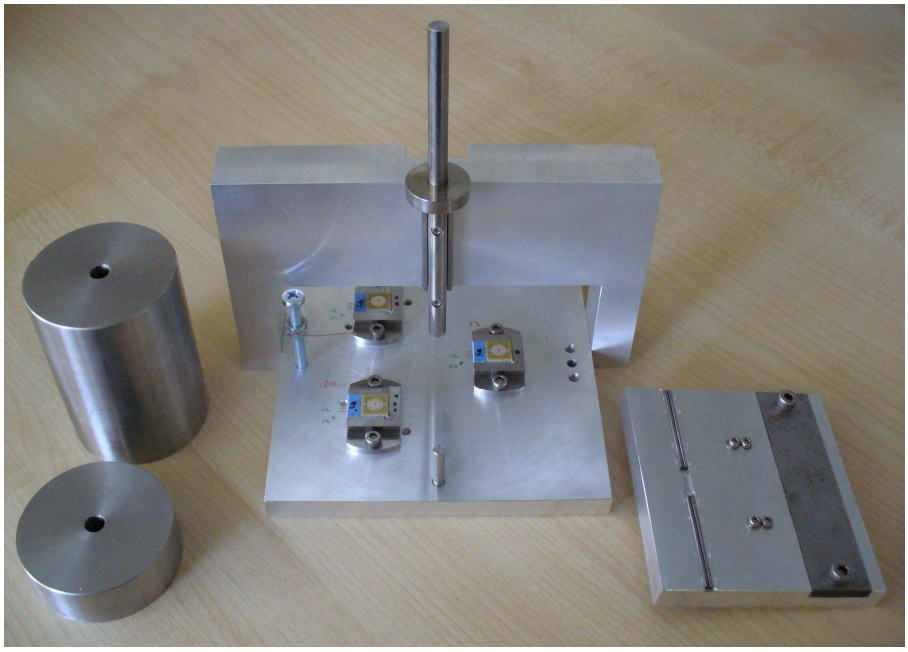
V hlavní funkci jsou nejprve inicializovány jednotlivé periférie – oscilátor, porty, časovače, UART a D-A převodníky. Poté se již program dostane do nekonečné smyčky, ve které jsou sledovány příchozí zprávy přicházející po sériové lince z nadřazeného PC a tyto zprávy jsou ihned vyhodnocovány.

8. REALIZACE PIEZOMOTORU A ŘÍDICÍHO SYSTÉMU

8.1 KONSTRUKCE PIEZOMOTORU

Piezomotor byl zkonstruován podobným způsobem, jako na obrázku 2.6. Bylo využito tří akčních členů MPA uspořádaných do trojúhelníku, které tak tvoří rovinu. Na těchto členech leží deska, která se po nich pohybuje. Protože tento projekt prozatím zkoumá pouze vlastnosti pohybů v jednom směru, je deska zespodu opatřena drážkou tvořenou dvěma válečky. Tato drážka leží na dvou akčních členech MPA a jednoznačně tak určuje směr pohybu.

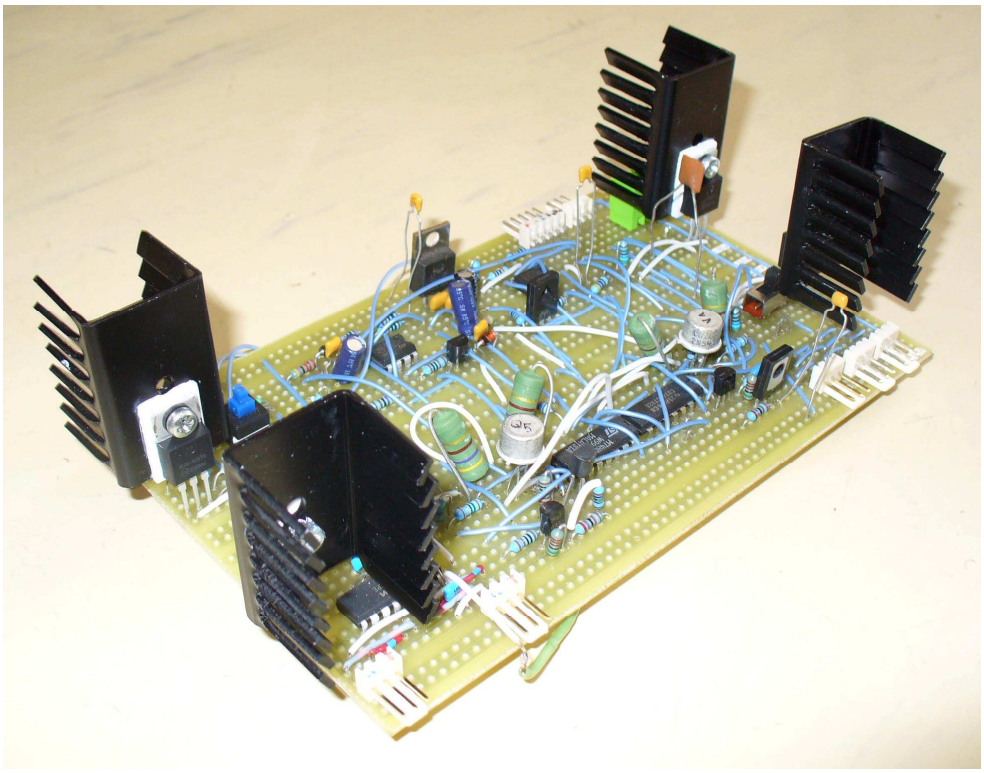
Piezomotor byl dále opatřen přítlačným systémem pro zjištění závislosti přítlaku na rychlosti a na délce jednoho kroku. Tento systém je tvořen lineárním kuličkovým ložiskem umístěným na horní straně desky, do kterého je zaklesnuta tyč zatížená závažím. Je tedy snaha o co nejmenší ovlivnění dynamiky stolku při aplikaci zatížení. Hmotnost závaží byla zvolena jako dvojnásobek a pětinásobek hmotnosti samotné desky. Celý systém je zobrazen na obrázku 8.1.



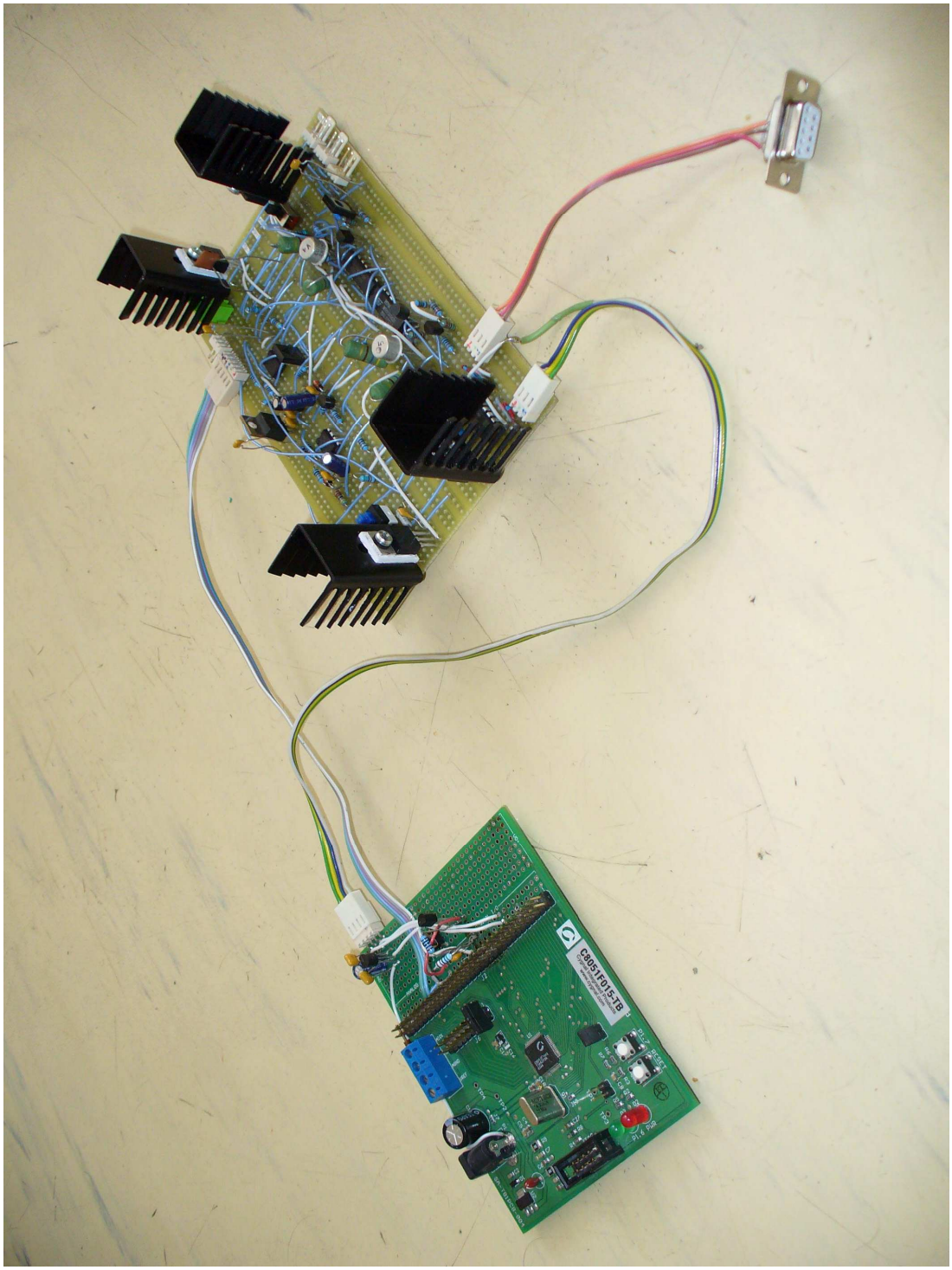
Obrázek 8.1: Piezomotor se třemi prvky MPA, pohyblivá deska a závaží.

8.2 REALIZACE ŘÍDICÍHO SYSTÉMU

Vlastní realizace řídicího systému spočívala především v realizaci analogové desky vytvářející pilový průběh napětí na piezokrystalech, jejíž schéma bylo navrženo v 5. kapitole. Celá deska byla realizována na univerzálním plošném spoji, takže pro propojení součástek bylo nutno použít mnoho propojovacích vodičů. Deska byla také osazena konektory pro napájení, konektorem pro přivedení signálů z mikrokontroléru a konektory pro připojení výstupního signálu k piezomotoru. Na desce byl rovněž realizován převodník napěťových úrovní pro komunikaci mezi PC a mikrokontrolérem po sériové lince. Při realizaci desky vznikl problém s přílišným zahříváním zatížených tranzistorů v proudových zrcadlech. Proto byly původní tranzistory 2N5416 a 2N3439 vyměněny za výkonnější tranzistory MJE5852 a MJE13007, které byly navíc osazeny chladiči. Prototyp desky je zobrazen na obrázku 8.2. Celý řídicí systém včetně vývojové desky mikrokontroléru je potom zobrazen na obrázku 8.3.



Obrázek 8.2: Prototyp desky vytvářející pilový průběh napětí.



Obrázek 8.3: Řídicí systém piezomotoru.

9. NAMĚŘENÉ CHARAKTERISTIKY PIEZOMOTORU

Proměření charakteristik piezomotoru je jedním ze stěžejních úkolů tohoto projektu. Na základě jejich zjištění budou nastaveny provozní podmínky pro následné využití piezomotoru v praxi.

Pro firmu Delong Instruments zabývající se elektronovou mikroskopií bylo především důležité zjištění závislosti délky jednoho kroku piezmotoru na amplitudě napětí na piezokrystalech, na frekvenci a na svislém přítlaku, protože přesnost umístění vzorku na požadovanou pozici je v elektronové mikroskopii velmi důležitá.

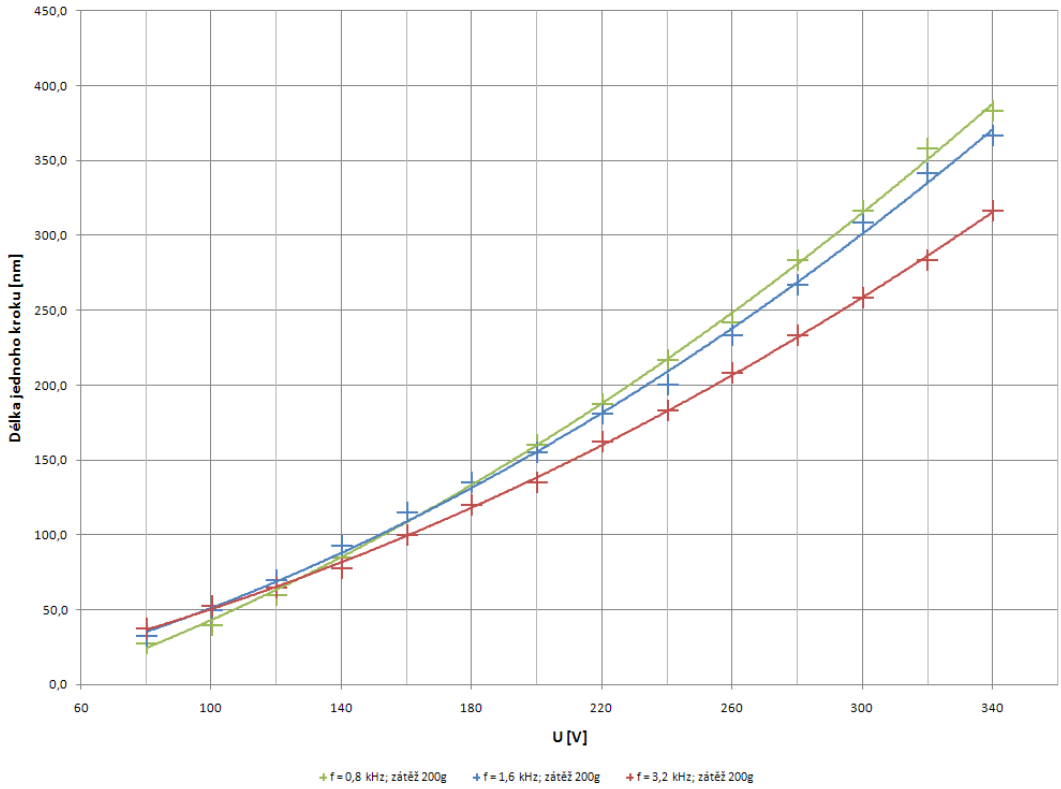
Při měření byl piezomotor řízen navrženým řídicím systémem. Pro zjištění základních závislostí bylo postačující měření pomocí milimetrového papíru, avšak pro dostatečnou přesnost se musel piezomotor posunout o dostatečně velký počet kroků.

9.1 MĚŘENÍ BEZ ZATÍŽENÍ ZÁVAŽÍM

První měření proběhlo bez zatížení závažím. Svislý přítlak byl tak tvořen pouze vlastní hmotností pohybující se desky (200 g). Měření bylo provedeno pro tři různé frekvence pilového signálu: 0,8 kHz, 1,6 kHz a 3,2 kHz. Pro každou z těchto hodnot byla postupně nastavována amplituda napětí od 80 do 340 V po hodnotě 20 V. Výsledná závislost délky jednoho kroku piezomotoru na frekvenci a amplitudě je zobrazena na obrázku 9.1.

Naměřené body byly proloženy křivkou charakterizovanou polynomem druhého řádu. Z charakteristiky je patrné, že s rostoucí amplitudou roste i délka jednoho kroku. Mírně nelineární charakteristika by se dala vysvětlit tak, že při větších rychlostech má pohybující se deska větší setrvačnost a díky malému přítlaku je i menší třecí síla mezi akčními členy MPA a deskou. Díky tomu zpětný podkluz piezokrystalu pod deskou způsobí menší ztrátu rychlosti než při malé rychlosti a větším zatížení.

Dále z charakteristiky vyplývá, že délka jednoho kroku piezomotoru s rostoucí frekvencí klesá. To je pravděpodobně způsobené tím, že při rychlejším kmitání piezokrystalů vznikají mezi pohybující se deskou a akčními členy MPA větší nežádoucí prokluzy a výsledná délka jednoho kroku je tak menší.



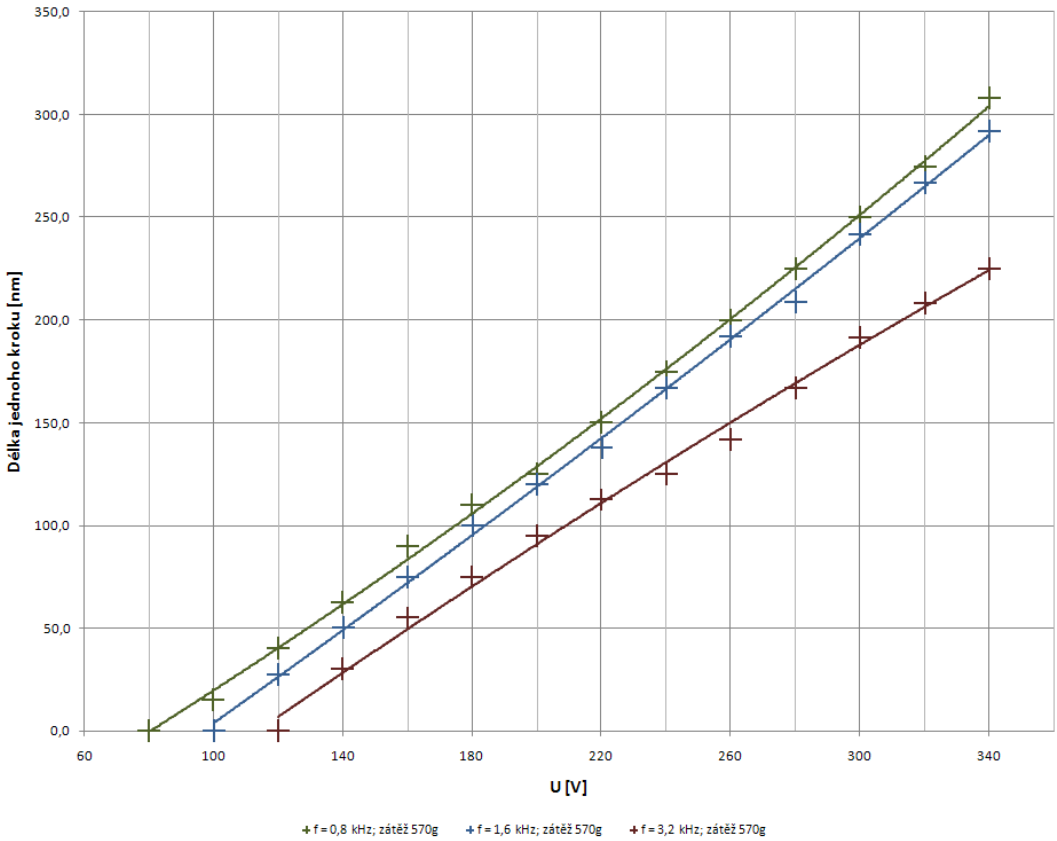
Obrázek 9.1: Závislost délky jednoho kroku piezomotoru na amplitudě napětí a frekvenci.

9.2 MĚŘENÍ SE ZATÍŽENÍM POMOCÍ POLOŽENÉHO ZÁVAŽÍ

Pomocí tohoto měření byl zjištěn vliv svislého přítlaku pomocí závaží položeného na pohybující se desku, což má stejný vliv, jako zvýšení hmotnosti samotné desky. Nevýhodou je, že kromě požadovaného přítlaku se nárůst hmotnosti projeví i na dynamice, neboť závaží se pohybuje spolu s deskou.

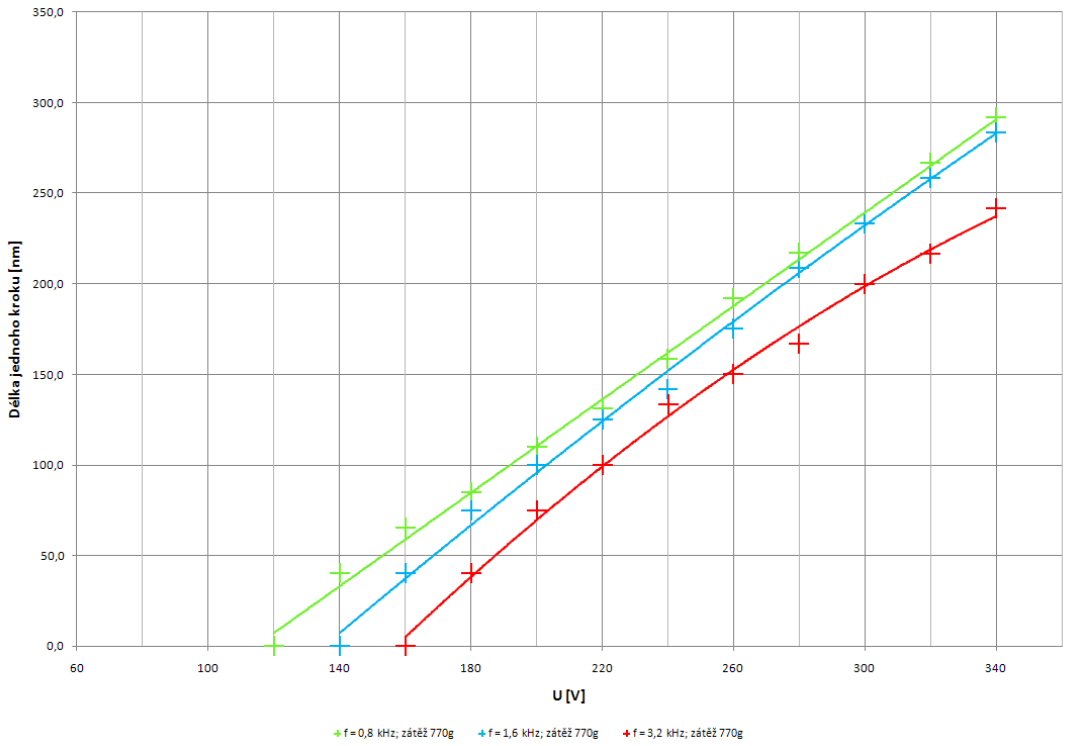
Měření bylo provedeno pro dvě různé hmotnosti závaží: 370 g a 570 g. Když se k těmto hmotnostem přičte hmotnost samotné desky, budou výsledné hmotnosti

570 g a 770 g. Stejně jako pro první měření byla pro každé závaží provedena tři měření pro tři různé frekvence pilového signálu: 0,8 kHz, 1,6 kHz a 3,2 kHz. Pro každou z těchto hodnot byla postupně nastavována amplituda napětí od 80 do 340 V po hodnotě 20 V. Výsledné závislosti délky jednoho kroku piezomotoru na frekvenci a amplitudě napětí při zatížení závažími jsou zobrazeny na obrázcích 9.2 a 9.3.



Obrázek 9.2: Závislost délky kroku na amplitudě napětí a frekvenci při zatížení položeným závažím o hmotnosti 370 g (přítlačná hmotnost 570 g).

Z grafů na obrázcích 9.2 a 9.3 je zřejmá větší linearita závislosti délky jednoho kroku na amplitudě, něž při měření bez zatížení. Pouze pro frekvenci 3,2 kHz již délka kroku neroste příliš lineárně. Důležité je také zjištění, že při malé amplitudě napětí se deska se závažím již vůbec nepohybuje. Opět také platí to, že s rostoucí frekvencí délka kroku klesá, což bylo vysvětleno u předchozího měření.

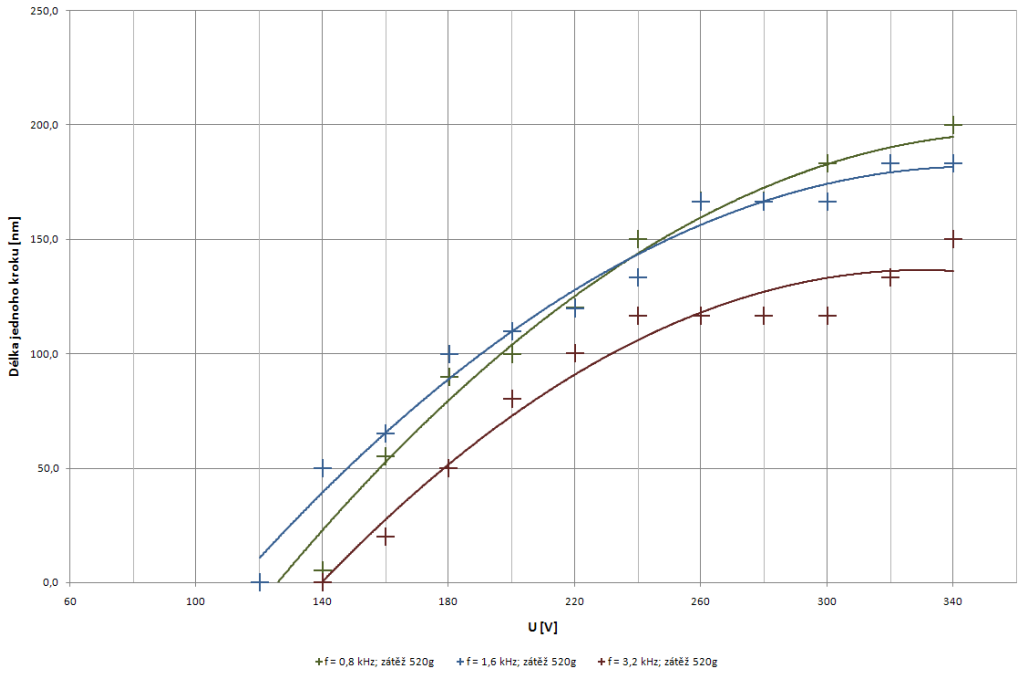


Obrázek 9.3: Závislost délky kroku na amplitudě napětí a frekvenci při zatížení položeným závažím o hmotnosti 570 g (přítlačná hmotnost 770 g).

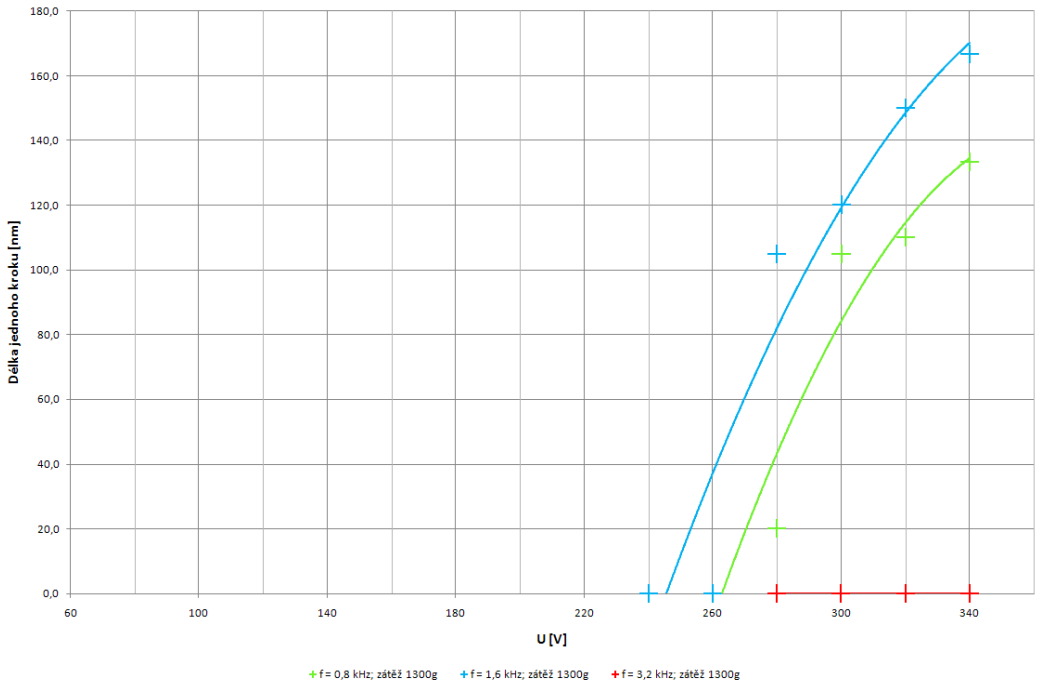
9.3 MĚŘENÍ SE ZATÍŽENÍM S VYUŽITÍM LOŽISKA

Poslední měření, které bylo provedeno, bylo měření s využitím lineárního ložiska umístěného na horní straně pohybující se desky. Do tohoto ložiska byla zaklesnuta tyč, na kterou byly postupně usazeny dvě závaží o různých hmotnostech 260 g a 1040 g. Celkové hmotnosti spolu s deskou, ložiskem a tyčí byly přibližně 520 g a 1300 g. Výhodou tohoto umístění závaží je, že se nepohybují spolu s deskou a nezvětšují tak její setrvačnou hmotu. Zvýšením přítlaku tedy příliš neovlivníme dynamiku pohybující se desky.

Byla opět provedena tři měření pro tři různé frekvence pilového signálu: 0,8 kHz, 1,6 kHz a 3,2 kHz. Pro každou z těchto hodnot byla postupně nastavována amplituda napětí od 80 do 340 V po hodnotě 20 V. Výsledné závislosti délky jednoho kroku piezomotoru na frekvenci a amplitudě napětí při zatížení závažími jsou zobrazeny na obrázcích 9.4 a 9.5.



Obrázek 9.4: Závislost délky kroku na amplitudě napětí a frekvenci při zatížení závažím o hmotnosti 260 g (celková přítlačná hmotnost 520 g).



Obrázek 9.5: Závislost délky kroku na amplitudě napětí a frekvenci při zatížení závažím o hmotnosti 1040 g (celková přítlačná hmotnost 1300 g).

Z grafů na obrázcích 9.4 a 9.5 je již patrná poměrně velká nelinearita závislosti délky kroku na amplitudě napětí. Délka kroku pro velkou zátěž dosahuje podstatně menších hodnot, než pro malou zátěž. S rostoucí zátěží také roste i mez amplitudy napětí, kdy se ještě piezomotor vůbec nepohybuje. Pro přítlačnou hmotnost 1300 g a frekvenci 3,2 kHz se dokonce nepodařilo na zvoleném rozsahu amplitudy napětí uvést piezomotor do chodu.

Získané charakteristiky piezomotoru budou detailněji prozkoumány a zpracovány odborníky firmy Delong Instruments a na základě výsledků budou stanoveny jeho provozní podmínky. Potom již bude možné tento piezomotor využít v konkrétních aplikacích. Kompletní měření je k dispozici na CD přiloženém k této práci.

10. ZÁVĚR

V úvodu práce jsem zpracoval teoretické poznatky k návrhu jednoho z možných způsobů řízení piezomotorů. Zaměřil jsem se především na základní prvky řídicího systému, kterými jsou mikrokontrolér C8051F015 a obvod analogové desky vytvářející pilový průběh napětí na piezokrystalech. Po zpracování teoretických podkladů jsem celý systém navrhnul včetně softwarového vybavení pro PC a mikrokontrolér.

Když byl návrh řídicího systému dokončen, byl firmou Delong Instruments zhotoven prototyp piezomotoru se třemi akčními členy MPA a možností pohybu v jednom směru. Poté jsem realizoval prototyp řídicího systému. Do mikrokontroléru jsem implementoval řídicí program přijímající povely z uživatelské aplikace v PC a následně byl piezomotor uveden do chodu.

Dalším krokem bylo naměření charakteristik. Byla zkoumána závislost délky jednoho kroku piezomotoru na frekvenci, amplitudě napětí a svislém přítlaku. Díky pohodlnému ovládání přes uživatelskou aplikaci proběhlo měření poměrně rychle. Ze získaných charakteristik byly odvozeny základní poznatky: velikost jednoho kroku piezomotoru roste s rostoucí amplitudou napětí, naopak ve většině naměřených závislostí klesá s frekvencí i se svislým přítlakem. Změřené charakteristiky budou dále využity za účelem nastavení pracovních podmínek piezomotoru pro jeho uvedení do praxe.

Uvažuje se o využití piezomotoru v elektronové mikroskopii. Jedním z cílů, které jsem si při řešení projektu dal, bylo dosažení rychlosti pohybu alespoň 1 mm/s. Tato hranice byla zvolena z toho důvodu, aby bylo možné přejet přes celý zkoumaný vzorek o průměru asi 3 mm za dobu přibližně 10 s. Analogová deska vytvářející pilový průběh napětí byla původně osazena jinými, méně výkonovými tranzistory, se kterými se nedařilo této hranice dosáhnout. Proto byly tranzistory vyměněny za více výkonové varianty, se kterými bylo této hranice rychlosti dosaženo. Další zvyšování rychlosti už by nemělo pro elektronovou mikroskopii velký význam. Spíše bude dále řešena otázka délky jednoho kroku piezomotoru, která je pro tento obor dost zásadní.

11. LITERATURA

[1] HOLUB, O., HURÁK, Z., ŠPILLER, M.: Řízení piezoelektrických motorů pro mikropolohování. *Automa*, 2007, č. 04.

[2] BREQUET, J.-M., CLAVEL, R.: *Stick and Slip Actuators: design, control, performances and applications.* DMT-ISR-EPFL, 1998.

[3] SKALICKÝ, P.: *Mikroprocesory řady 8051.* BEN – technická literatura, Praha 1997.

[4] HRBÁČEK, J.: *Komunikace mikrokontroléru s okolím. Díl 1.* BEN – technická literatura, Praha 1999.

[5] *C8051F000/1/2/5/6/7, C8051F010/1/2/5/6/7.* Silicon Laboratories, 2003. Dostupné z: <https://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/C8051F0xx.pdf>.

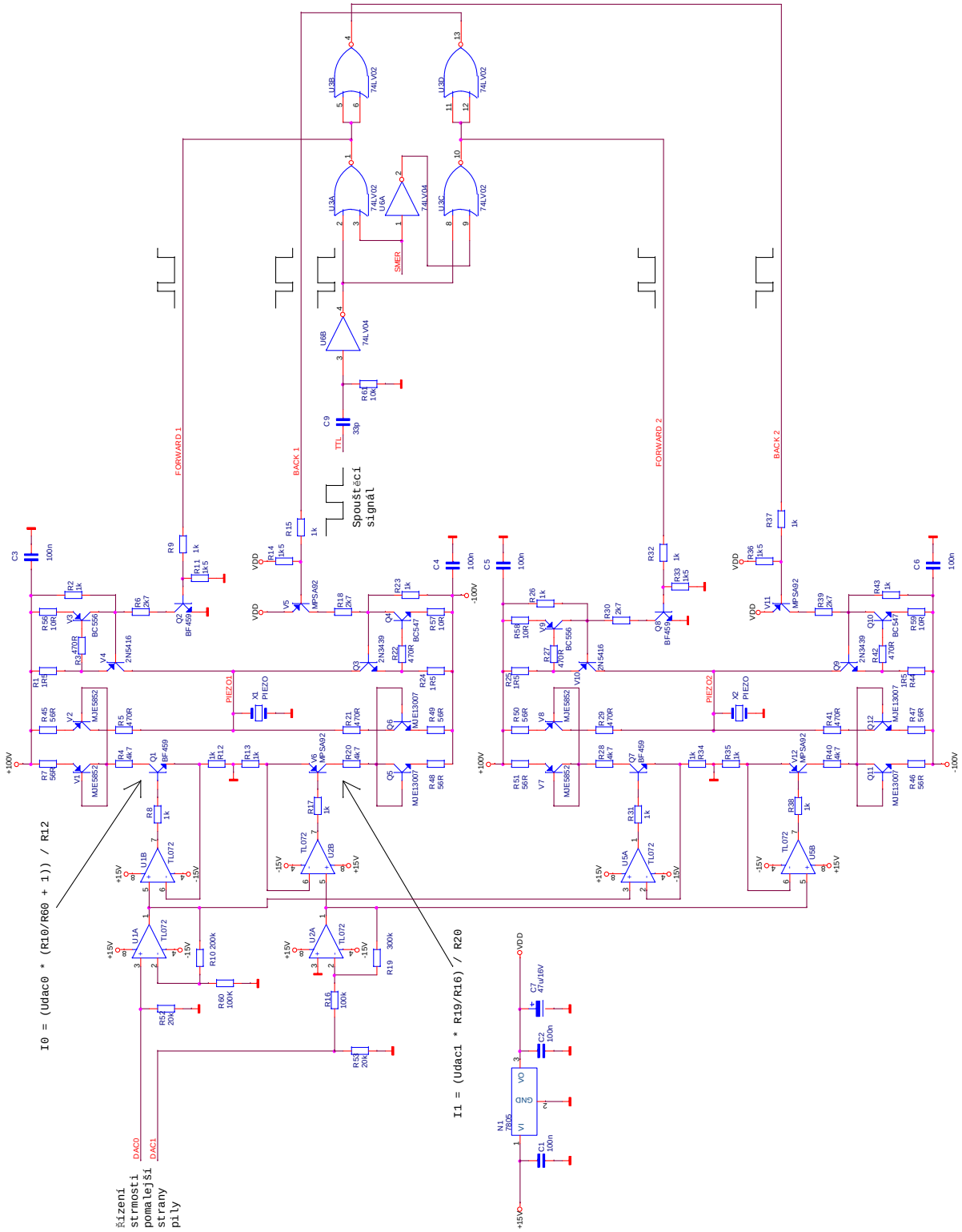
[6] *C8051F00X/01X Development kit user's guide.* Silicon Laboratories, 2006. Dostupné z: <https://www.silabs.com/pages/DownloadDoc.aspx?FILEURL=Support%20Documents/TechnicalDocs/C8051F00x-01x-DK.pdf>.

[7] *+5V-Powered, Multichanel RS-232 Dreivers/Receivers.* Maxim, 2006. Dostupné z: <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX220-MAX249.pdf>.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Obvodové schéma desky vytvářející pilový průběh napětí na krystalech piezomotoru.

Příloha 1


I0 = (Udac0 * (R10/R60 + 1)) / R12
I1 = (Udac1 * R19/R16) / R20
Řízení strmosti pomalejší strany pily
Spouštěcí signál
FORWARD 1
BACK 1
FORWARD 2
BACK 2
PIEZO1
PIEZO2
SMER
TTL
DAC0
DAC1
+100V
-100V
+15V
-15V
VDD