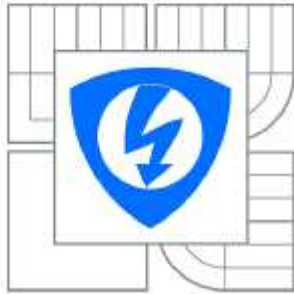




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A
ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

ELEKTRICKÝ MIKROPOHON S PIEZOMOTOREM

ELECTRIC MICRODRIVE WITH ULTRASONIC MOTOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN PEŘINA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JOSEF KOLÁČNÝ, CSc.



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Martin Peřina
Ročník: 3

ID: 77926
Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Elektrický mikropohon s piezomotorem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Analyzujte funkci a vlastnosti piezomotorů typu LEGS a Wave.
2. Vytvořte strukturu zapojení mikropohonu pro lineární a rotační pohyb / DemoKit /.
3. Navrhněte zadání laboratorní úlohy s piezomotory při respektování didaktických a bezpečnostních pravidel.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího

Termín zadání: 23.9.2010

Termín odevzdání: 26.5.2011

Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Koláčný, CSc.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

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 částí druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ANOTACE

Tato bakalářská práce pojednává o sledovaných typech piezomotorů včetně jejich možností řízení a navazuje na samostatný semestrální projekt. Zabývá se především technologiemi zvanými Piezo LEGS a Piezo WAVE. Pozornost je věnována konstrukci, principům funkce, parametrům, provozním charakteristikám a také aplikačním oblastem.

Další částí práce je samotné měření uvedených druhů piezomotorů (demo-kitů) v laboratorních podmínkách.

V závěru je uvedeno zadání tří laboratorních úloh, každému typu motoru je tedy věnována jedna úloha. Obsahově je práce zaměřena na vyžití v rámci inovace výukového procesu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Piezomotor, piezoelektrický motor, piezo, lineární, rotační, napájecí fáze, piezoelement, princip, charakteristika

ABSTRACT

This thesis is focused on selected kinds of piezoengines and their ability to control and follows the separate semester project. It mainly deals with technology called Piezo LEGS and Piezowaves. Attention is paid to their structure, principles, parameters, characteristics, but also to field of their application.

Next section is laboratory measurement of those species of piezoengines (demo-kits).

At the end thesis contains three laboratory task, each type of engine is dedicated to one task.

The contents of the work is focused on innovation activities in the learning process

KEY WORDS

Piezo motor, piezoelectric motor, piezo, linear, rotary, power phase, piezoelement, principle, characteristics

PEŘINA, M. *Elektrický mikropohon s piezomotorem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. **49** s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Josef Koláčný, CSc.

Prohlašuji, že jsem tuto **bakalářskou práci** vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

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.

Zároveň bych na tomto místě chtěl poděkovat vedoucímu semestrálního projektu **doc. Ing. Josefu Koláčnému, CSc.** za cenné rady a připomínky k mé práci, poskytnutou literaturu a svým rodičům za podporu během celé doby mého studia.

.....



OBSAH

1. Úvod.....	5
1.1. Cíle práce	5
2. Piezomotory typu Piezo LEGS	6
2.1. Lineární piezomotor typu Piezo LEGS	6
2.1.1. Popis práce piezokeramických nohou	8
2.1.2. Popis funkce lineárního pohybu piezomotoru.....	8
2.1.3. Konstrukce lineárního piezomotoru	10
2.1.4. Životnost piezomotoru	11
2.1.5. Průběh řídicích signálů	11
2.1.6. Náčrty lineárního piezomotoru a parametry	12
2.2. Rotační piezomotor typu Piezo LEGS	14
2.2.1. Princip činnosti rotačního piezomotoru	14
2.2.2. Výhody použití.....	15
2.2.3. Náčrty rotačního piezomotoru a parametry	15
2.3. Řízení motorů typu Piezo LEGS.....	17
2.3.1. Průběhy signálů a rozlišení	17
2.3.2. Řídicí jednotka PDA 3.1.	19
2.3.2.1. Analogový řídicí signál	20
2.3.2.2. Používání řídicí jednotky	20
2.3.2.3. Senzor zpětné vazby.....	21
3. Piezomotor typu Piezo WAVE	22
3.1. Lineární piezomotor typu Piezo WAVE.....	22
3.1.1. Popis funkce motoru	23
3.2. Řízení motoru typu Piezo WAVE.....	25
3.2.1. Ruční ovládání pomocí ovladače	25
3.2.2. Ovládání pomocí PC	25
3.2.3. Příklady hnacích stupňů	26
3.2.4. Charakteristiky a parametry	28
4. Měření piezomotorů	31
4.1. Měření na lineárním piezomotoru typu Piezo LEGS	31
4.1.1. Závislost rychlosti na síle.....	31
4.1.2. Měření přídržné síly	33
4.1.3. Závislost rychlosti na proudu	33
4.2. Měření na rotačním piezomotoru typu Piezo LEGS	34
4.2.1. Závislost otáček na momentu.....	34
4.2.2. Závislost otáček na proudu.....	36
4.2.3. Měření statického momentu.....	37



4.3. Měření na motoru typu Piezo WAVE.....	38
4.3.1. Měření průběhů řídicích signálů	38
5. Využití piezomotorů v praxi	43
5.1. Polovodiče.....	43
5.2. Polohování	43
5.3. Spotřební elektronika	43
5.4. Dveřní systémy	44
5.5. Automobilový průmysl	44
5.6. Mikrorobotika	45
6. Zadání laboratorních úloh	46
6.1. Měření s lineárním motorem typu Piezo LEGS.....	46
6.2. Měření s rotačním motorem typu Piezo LEGS.....	46
6.3. Měření s motorem typu Piezo WAVE.....	47
7. Závěr	48
Použitá Literatura	49



SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

1. Typy piezomotorů	6
2. Lineární piezomotor Piezo LEGS	6
3. Adaptér hnané tyče.....	7
4. Keramické "nohy" lineárního piezomotoru	7
5. Režimy keramických nohou.....	7
6. Princip lineárního pohybu piezomotoru.....	9
7. Konstrukce a popis lineárního piezomotoru	10
8. Uspořádání konektoru lineárního piezomotoru.....	10
9. Průběh signálů fází č.1 a č.3.	11
10. Průběh signálů fází č.2 a č.3	12
11. Závislost rychlosti na síle udávaná výrobcem	12
12. Technický nákres lineárního piezomotoru	12
13. Rotační motor Piezo LEGS.....	14
14. Závislost otáček na momentu.....	15
15. Nákres rotačního piezomotoru	15
16. Uspořádání konektoru rotačního piezomotoru.....	16
17. Průběh řídicích napětí	17
18. Vlny vytvářející pohyb nohou podél kosočtverce.....	18
19. Vlny vytvářející zmenšenou délku kroku	18
20. Řídicí jednotka PDA 3.1.	19
21. Schéma řídicí jednotky.....	19
22. Závislost délky kroku a rychlosti na řídicím napětí.....	20
23. Části Piezo WAVE motoru	22
24. Princip pohybu Piezo WAVE motoru.....	23
25. Elektrické schéma Piezo WAVE motoru.....	24
26. Ideální průběh řídicích napětí Piezo WAVE motoru	25
27. Struktura Piezo WAVE motoru	25
28. Schéma principu řízení.....	26
29. Schéma jednoduchého ovladače	26
30. Schéma nízkonapěťového řízení	27
31. Závislost rychlosti na frekvenci pro různé zátěže	28
32. Závislost rychlosti na frekvenci pro různá napětí	28
33. Závislost rychlosti na frekvenci pro různé teploty.....	29
34. Závislost rychlosti na síle zjištěná měřením	32
35. Závislost rychlosti na síle udávaná výrobcem	32
36. Závislost rychlosti na proudu zjištěná měřením.....	34



37. Závislost otáček na momentu zjištěná měřením	36
38. Závislost otáček na proudu zjištěná měřením	37
39. Řídící charakteristika - nejvyšší rychlosti, směr dopředu	38
40. Řídící charakteristika - nejvyšší rychlosti, směr dozadu.....	38
41. Řídící charakteristika - střední rychlosti, směr dopředu	39
42. Řídící charakteristika - střední rychlosti, směr dozadu.....	39
43. Řídící charakteristika - nejnižší rychlosti, směr dopředu.....	40
44. Řídící charakteristika - nejnižší rychlosti, směr dopředu (detail)	40
45. Řídící charakteristika - nejnižší rychlosti, směr dozadu	41
46. Řídící charakteristika - nejnižší rychlosti, směr dozadu (detail).....	41
47. Systém nano-polohování firmy DSM	43
48. Systém automatického ostření firmy Sunnytec.....	44
49. Systém piezo vstřikování paliva firmy Bosch.....	44
50. Mikrorobot typu PLIF	45

SEZNAM TABULEK

1. Parametry lineárního Piezo LEGS motoru	13
2. Parametry rotačního Piezo LEGS motoru.....	16
3. Parametry řídicí jednotky PDA 3.1.....	21
4. Absolutní min/max hodnoty Piezo WAVE motoru	29
5. Ideální hodnoty napájení Piezo WAVE motoru.....	29
6. Parametry Piezo WAVE motoru.....	30
7. Technické parametry Piezo WAVE motoru	30
8. Hodnoty lin. motoru měření závislosti rychlosti na síle	31
9. Hodnoty lin. motoru měření závislosti rychlosti na proudu.....	33
10. Hodnoty rot. motoru měření závislosti otáček na momentu	35
11. Hodnoty rot. motoru měření závislosti otáček na proudu	36



1. ÚVOD

Piezelektrické motory a jejich vývoj mají za sebou téměř čtyřicetiletou minulost, v posledních několika letech však dochází k jejich velkému rozmachu a díky miniaturizaci v elektrotechnice mají mnohočetná využití jak v lineárním tak i v rotačním provedení. Během této doby našly piezomotory značné uplatnění ve specifických aplikacích jako jsou zaostřování optických systémů, pohony malých časoměrných zařízení, přesné polohovací mechanismy, mikroposuvy apod.

Moderní miniaturní piezomotory mají oproti běžným motorkům (pracují na elektromagnetickém principu) stejných velikostí mnoho výhod, například mnohem nižší výrobní náklady, menší hmotnost a snazší ovladatelnost. Díky těmto faktorům jsou dnes piezomotory levnější než konvenční motory a většina světově prosperujících společností a firem je proto zavádí do svých aplikací a produktů.

Největší výhodou piezomotorů, která je předurčuje k využívání v nejpřesnějších polohovacích zařízeních, je jejich velmi přesné řízení pomocí standardních počítačových sběrnic (RS 232, USB, IEEE488) a jejich samosvornost.

1.1. Cíle práce

Existuje celá řada druhů piezomotorů. Tato práce se zabývá pouze třemi konkrétními typy: lineární piezomotor typu Piezo LEGS, rotační piezomotor typu Piezo LEGS a piezomotor typu Piezo WAVE (viz. obr. 1.). Obsahem jsou popisy jejich funkcí, vlastností, konstrukcí, způsoby řízení, ale také samotná jejich měření s návrhem zadání laboratorních úloh, se záměrem aplikace výsledků při inovaci výuky odborných předmětů. Rozsah a členitost zadání úloh úzce souvisí s požadavky a možnostmi v daném konkrétním předmětu bakalářského nebo magisterského studia. Struktura zapojení (Demo-kit) je obsažena v jednotlivých kapitolách.



Obr.1. Piezomotory typu a) Piezo LEGS lineární b) Piezo LEGS rotační c) Piezo WAVE lineární

2. PIEZOMOTORY

2.1. LINEÁRNÍ PIEZOMOTOR TYPU PIEZO LEGS

Jedná se o motor, který vykonává konečný přímočarý pohyb. Základním hnacím prvek piezomotoru typu Piezo LEGS je soustava hnacích nohou, jejichž počet se odvíjí od konfigurace motoru a bývají vytvořeny z bimorfnní krystalické piezokeramiky (dvě piezokeramické vrstvy s jednou střední a dvěma oddělenými elektrodami). Takto lze přivedeným napětím aktivovat každou vrstvu zvlášť.



Obr. 2. Lineární piezomotor Piezo LEGS firmy Uppsala AB

Lineární piezomotor typu Piezo LEGS je určen pro širokou škálu použití a je ideální pro pohybové a polohovací aplikace. To je dáno tím, že piezomotor nepotřebuje žádnou vnější sílu pro udržení stávající polohy stejně jako tím, že motor nemá téměř

žádný vlastní mechanický odpor a může se pohybovat po krocích v řádu nanometrů. Maximální síla piezomotoru je podle producenta dána počtem pružin. Lineární piezomotory typu piezo LEGS firmy "Piezomotor Uppsala AB" se vyrábí v silách 6N až 450N a jsou k dispozici v mnoha různých verzích pro vakuové i nemagnetické prostředí. Motor je snadno integrovatelný a může být dodatečně doplněn o volitelné tyčové adaptéry pro další usnadnění mechanického začlenění v mnoha systémech.

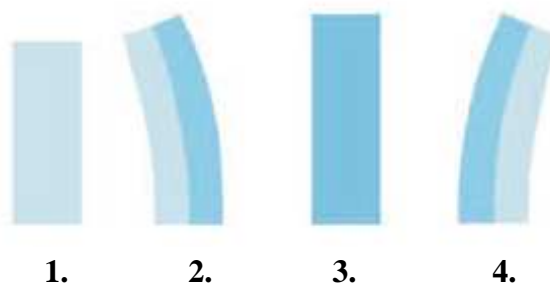


obr. 3. Tyčový adaptér sloužící k měření nasazený na hnané tyči

Motor se může pohybovat v delších krocích, kratších krocích a nebo částečných krocích (mikro-krocích) v nanometrovém rozsahu. Pro extrémní polohovací požadavky je dokonce možné se pohybovat po krocích menších než jsou nanometry díky tzv. speciálnímu "bending" módu, jež je dále popsán (nebyl však podroben samostatné analýze). Rychlost je snadno nastavitelná a to od extrémně nízkých až po relativně vysoké.



Obr. 4. Velikost skutečných keramických nohou firmy Uppsala AB



Obr. 5. Režimy prodloužení/smrštění a ohýbání nohou [2]



2.1.1. Popis práce piezokeramických nohou (obr. 5):

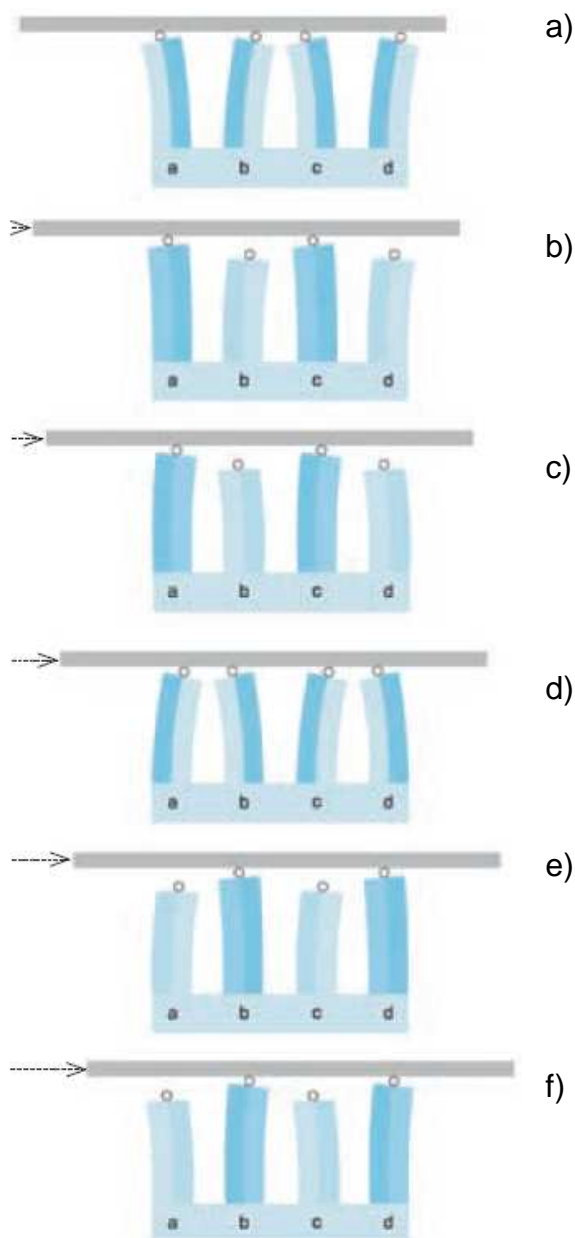
- 1) keramická noha bez přiloženého napětí.
- 2) řídicí napětí je přiloženo na pravou část řídicí nohy (v obrázku vyznačeno tmavě), pravá část se prodlužuje, levá část se zkracuje.
- 3) řídicí napětí přiložené na obě strany, celá piezokeramická noha se lineárně prodlouží.
- 4) řídicí napětí je přiloženo na levou část řídicí nohy, levá část se prodlužuje, pravá část se zkracuje.

2.1.2. Popis funkce lineárního pohybu piezomotoru:

Piezoelektrický jev umožňuje vytvoření pohybu motoru s pohyblivými „nohama“, kdy každá nožička ze 4-prvkového systému je tvořena „keramickým svalem“, který může být modelován (natahován, ohýbán atd.) podle způsobu pohybu motoru vpřed nebo vzad. Funkce lineárního motoru se dvěma páry hnacích nohou (nohy 1 a 3 jsou nohy prvního páru, 2 a 4 druhého páru) je vysvětlena na obr. 6., kde jsou polohy hnacích „nohou“ zobrazeny v jednotlivých okamžicích.

- A) Nohy prvního páru jsou v „uchopovacím“ režimu. Pohyb začíná při dotyku obou párů hnacích nohou s hnanou tyčí. Nohy prvního páru (1 a 3) jsou ohnuty doleva a nohy druhého páru (2 a 4) jsou ohnuty doprava.
- B) Nohy prvního páru (1 a 3) se pohybují nahoru doprava tzv. přenáší tyč směrem doprava. Nohy druhého páru (2 a 4) se pohybují směrem dolů doleva a nemají tudíž kontakt s hnanou tyčí. To znamená, že se bude tyč pohybovat stejným směrem jako první pár.
- C) Když jsou hnací nohy prvního páru (1 a 3) ve své maximální výchylce směrem doprava začnou se pohybovat směrem dolů. Druhý hnací pár (2 a 4) naopak směrem nahoru doleva.
- D) Nyní jsou oba páry hnacích nohou (1 a 3, 2 a 4) ve stejné úrovni a mají tak tedy kontakt s hnací tyčí. První pár nohou (1 a 3) je nakloněn směrem doprava a druhý pár nohou (2 a 4) je nakloněn směrem doleva.

E) F) Nyní piezoprvek bude konat stejný pohybový cyklus jako v předchozích bodech, ale posunovat hnanou tyč bude tentokrát druhý pár hnacích nohou (2 a 4). Cyklus se bude stále opakovat a tím dochází k lineárnímu pohybu.

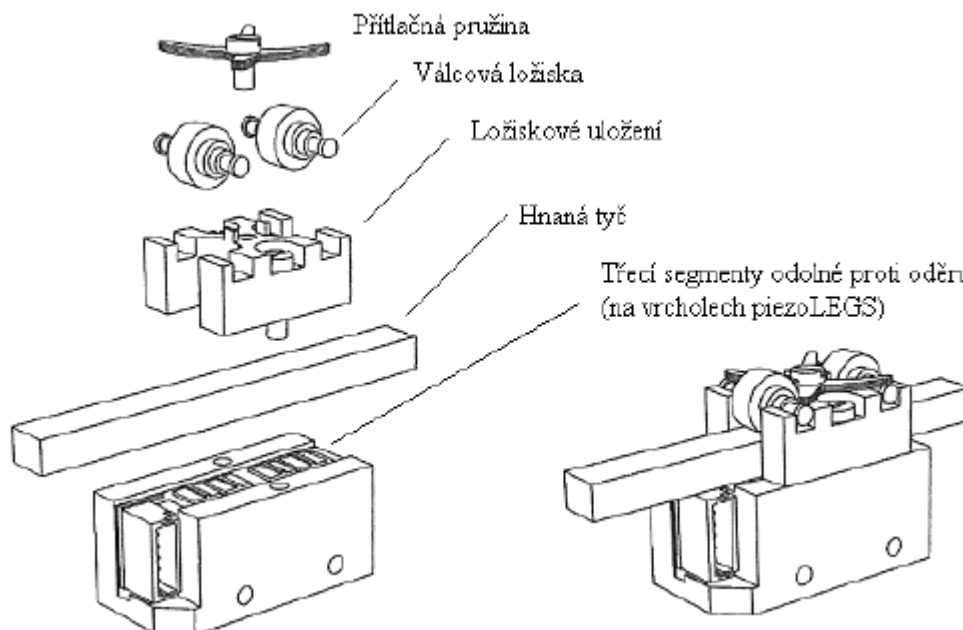


Obr. 6. Princip lineárního pohybu piezoelektrického motoru [2]

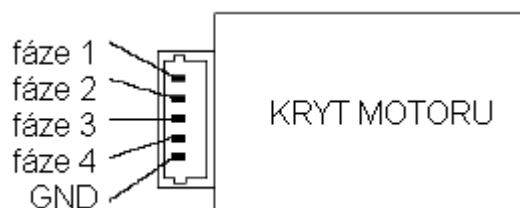
Ukázku pohybu tohoto motoru lze spatřit jako animaci na webu výrobce piezomotoru: www.piezomotor.se nebo www.piezomotor.com [1]

2.1.3. Konstrukce lineárního piezomotoru

Jedna z největších výhod piezomotoru je jeho jednoduchá konstrukce, která je zároveň velice pevná a odolná. Funkce piezomotoru je založena na působení třecí síly mezi hnanou tyčí a piezonohami, motor tedy neobsahuje žádná ozubená kola nebo jiné snadno opotřebovatelné mechanické části. Obr. 7. popisuje základní části demo-kitu piezomotoru, a jak lze vidět motor obsahuje opravdu minimum částí. Skládá se z následujících částí: tělo (kryt) motoru, hnaná tyč, ložiska a jejich držák, konektor, přítlačná pružina, třecí segmenty. Hnaná tyč je tlačena na třecí segmenty pomocí válcových ložisek, která jsou odpružena v jejich uložení pomocí přítlačné pružiny.



obr. 7. Konstrukce a popis činnosti lineárního piezomotoru typu Piezo LEGS



Obr. 8. Uspořádání konektoru piezomotoru typu Piezo LEGS

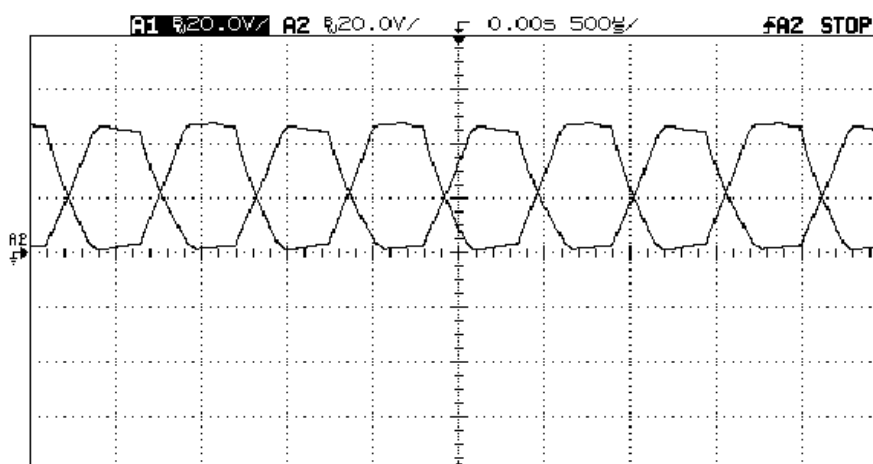
2.1.4. Životnost piezomotoru

Piezomateriály jsou vysoce odolné vůči namáhání a opotřebením. V praxi to znamená, že téměř vůbec nemění během práce svůj charakter a vlastnosti. Výdrž piezonožou však není nejdůležitějším faktorem trvanlivosti motoru, tím je materiál nanesený právě na těchto nožou piezomotoru (přechodová třecí vrstva).

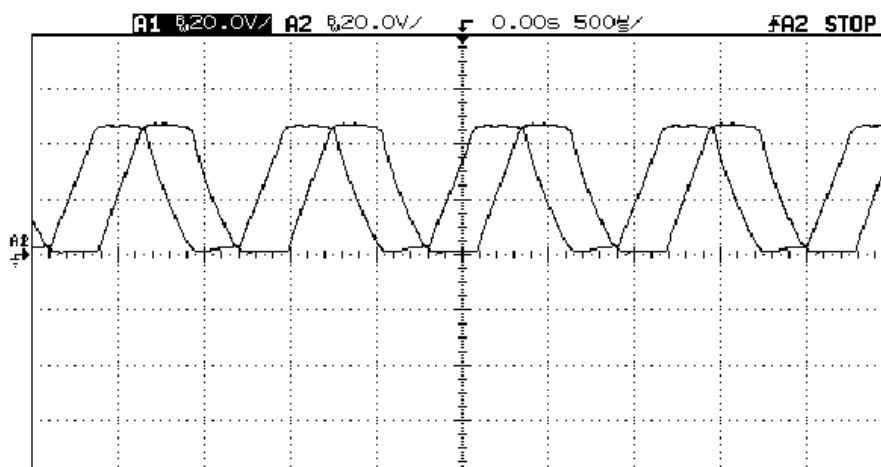
Pohyblivé části motoru a hnací povrch nožou se ale samozřejmě lehce opotřebovávají. Pokud jsou však ale tyto nohy pravidelně čištěny, tak že jejich hnací plocha je dokonale čistá a hladká, k opotřebením opravdu skoro nedochází. Každá z hnacích nožou může být vybavena speciální podložkou proti opotřebením. Stejný materiál může být využit také pro povrchy hnané části motoru. Tyto úpravy zajistí co nejdélejší životnost motoru.

2.1.5. Průběh signálů lineárního Piezo LEGS motoru udávaný výrobcem:

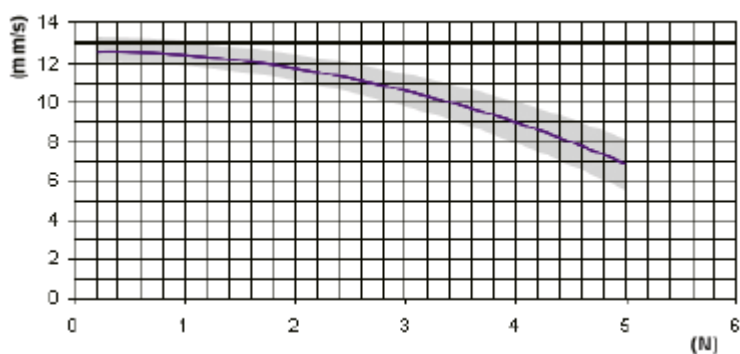
Oba páry hnacích nožou (1 a 3, 2 a 4) jsou řízeny dvěma podobnými signály o velikosti 46V, které jsou proti sobě posunuty o $\pi/2$. Na obr. 9 je signál 1 a 3 hnací nohy prvního páru. Signál pro nohu č.2 je posunut oproti signálu 1 s fázovým posunem $\pi/4$, zatímco vlny 3 a 4 jsou stejné jako vlny 1 a 2, ale s fázovým posunem $\pi/2$ (obr. 10.)



Obr. 9. Řídící signál fází č.1 a č.3 lineárního piezomotoru typu Piezo LEGS [2]

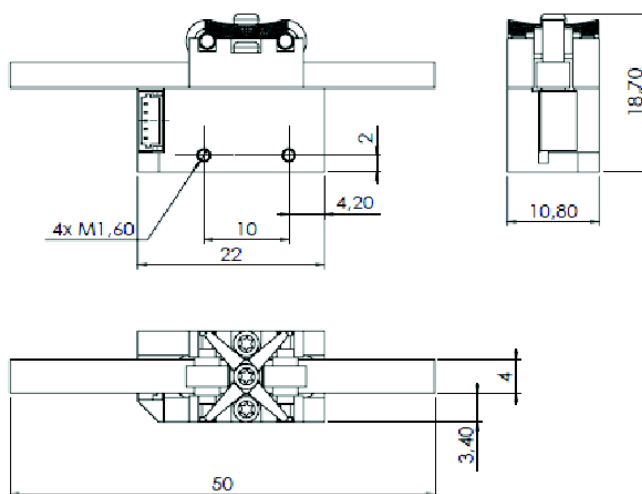


Obr. 10. Řídící signál fází č.1 a č.2 lineárního piezomotoru typu Piezo LEGS [2]



Obr. 11. Výrobce udávaná závislost rychlosti na síle lineárního motoru při $f=2100\text{Hz}$ [2]

2.1.6. Návrh lineárního piezomotoru typu Piezo LEGS a parametry



Obr. 12. Konstrukční návrh lineárního piezomotoru typu Piezo LEGS [2]



Tab. 1. Parametry lineární piezomotoru typu Piezo LEGS

<i>Rozměry [mm]</i>	22 x 10.8 x 18
<i>Váha [g]</i>	20
<i>Rychlost otáčení [mm/s]</i>	12.5 (2100Hz)
<i>Frekvenční rozsah [Hz]</i>	0 až 2100
<i>Síla [N]</i>	pohotová > 7.3, brzdná = 6.5
<i>Fázové napětí [V]</i>	0 až 42
<i>Rozlišení [nm]</i>	10
<i>Max. délka kroku [μm]</i>	3
<i>Zdvih [mm]</i>	35
<i>Fázová kapacitní reaktance [nF]</i>	430 (22°C)
<i>Odběr energie [mW/Hz]</i>	5
<i>Teplotní rozsah [°C]</i>	-20 až +70



2.2. ROTAČNÍ PIEZOMOTOR TYPU PIEZO LEGS



Obr. 13. Rotační piezomotor typu Piezo LEGS firmy Uppsala AB

Rotační piezomotory vykonávají klasický nekonečný rotační pohyb (Obr. 13) a má stejně jako lineární motor velké možnosti využití v mnoha aplikacích. Tyto piezomotory mají vysoký kroutící moment s vynikajícími vlastnostmi z hlediska regulace. Výhodou používání Piezo LEGS technologií je nepřekonatelná přesnost polohování. Technologie je založena na přímém pohonu, které nemá problém s mechanickým odporem a hystezí. I když základní princip funkce je stejný jako u lineárních motorů, provedení je však odlišné.

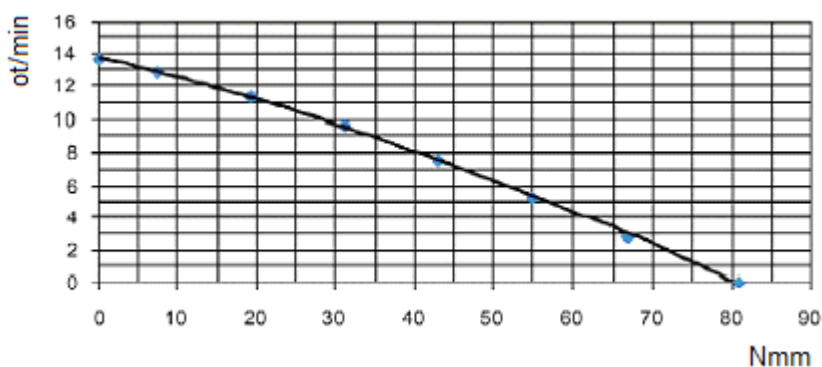
2.2.1. Princip činnosti

Princip činnosti je založen v buzení dvou mechanických piezosystémů statoru, které se přenáší třením na rotor, který je ke statoru přitlačován pružinou. Buzení kmitů probíhá frekvencemi podobnými rezonanční frekvenci odpovídající části, jež se u drtivé většiny piezomotoru pohybuje v rozmezí od 30 do 70 kHz. Tímto dosahujeme amplitudy mechanických kmitů až několik μm .

2.2.2. Výhody využití

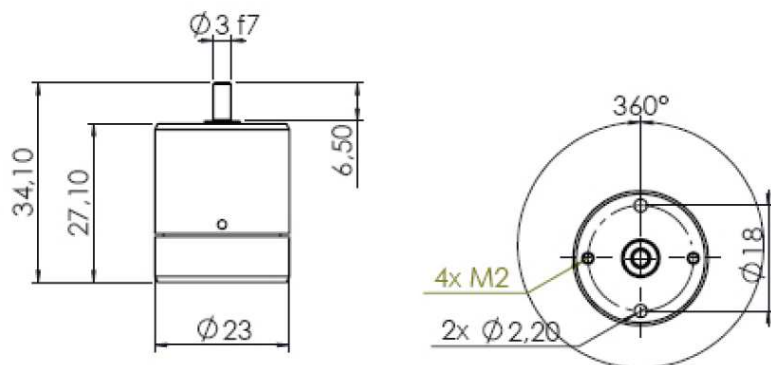
Aplikace principu „krokování“ umožnila vývoj rotačního piezomotoru nabízející výjimečné vlastnosti:

- nízká a proměnlivá rychlost (20 ot/min až 1 ot/týden)
- maximální moment 0,08 Nm s vysokou rozlišovací schopností 1/10000000 částí otáčky.
- dlouhá životnost s téměř nulovou údržbou, samosvorné vlastnosti (při zablokování nedojde k mechanickému poškození).
- vysoká adaptibilita k poháněným mechanismům.

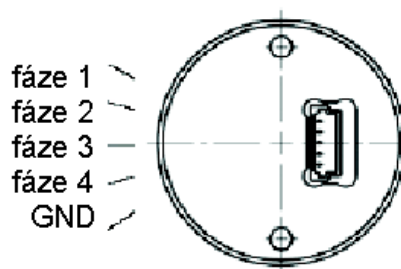


Obr. 14. Výrobce udávaná závislost otáček na zatěžovacím momentu rotačního piezomotoru [2]

2.2.3. Náčrtes rotačního piezomotoru typu Piezo LEGS a parametry



Obr. 15. Náčrtes rotačního piezomotoru typu Piezo LEGS [2]



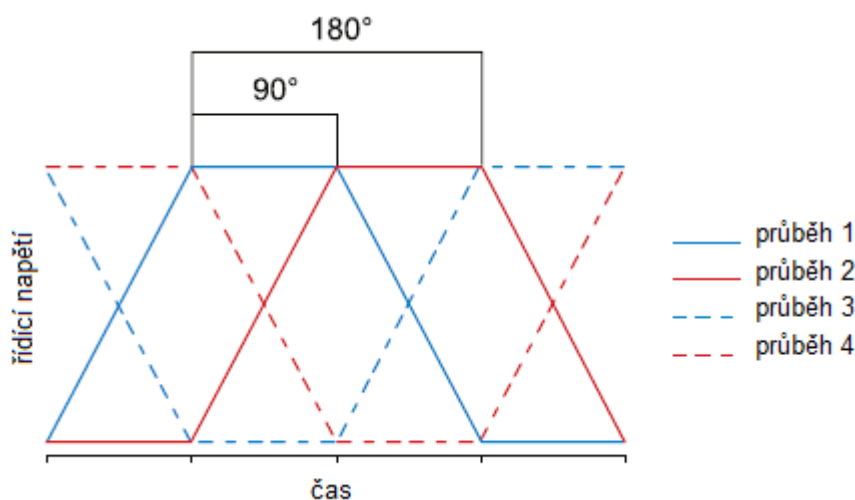
Obr. 16. Uspořádání konektoru rotačního piezomotoru

Tab. 2. Parametry rotačního piezomotoru Piezo LEGS

Rozměry [mm]	32 x 23
Váha [g]	70
Rychlost otáčení [ot/min]	13.5 (2100Hz)
Frekvenční rozsah [Hz]	0 až 3000
Točivý moment [Nmm]	pohotový > 90, brzdový = 80
Fázové napětí [V]	0 až 42
Rozlišení [μrad]	1
Maximální zatížení [mrad]	0.35
Fázová kapacitní reaktance [nF]	645
Odběr energie [mW/Hz]	7.5

2.3. ŘÍZENÍ MOTORŮ TYPU PIEZO LEGS

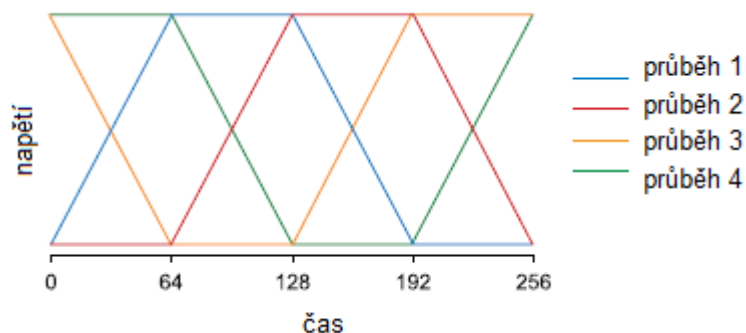
Z uvedeného principu chodu lze vidět, že k rozpořívání motoru je zapotřebí dvou cyklů. Princip chodu ukazuje, že jsou-li v pohonu využívány dva nezávislé páry řídících nohou nejsou pak potřebné další dva cykly. Na obě části piezonohou jsou přivedeny signály s fázovým posunem 90° . Jak ukazuje obr. 17, fázový posun je mezi dvěma páry řídících nohou je za normálního stavu 180° .



Obr. 17. Průběh řídících napětí [2]

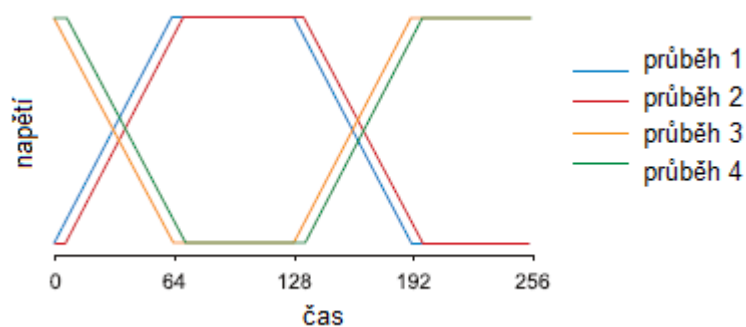
2.3.1. Průběhy signálů a rozlišení

Jak bylo dříve uvedeno, každý pár bývá řízen dvě podobnými signály o velikosti cca 46V. Z hlediska elektrického lze čtyři fáze piezomotoru považovat za kondenzátor s kapacitou 470nF. Podle obr. 18 je průběh signálu č.2 zrcadlově k průběhu č.1, vlny č.3 a č.4 jsou na tom stejně jako první dvě ovšem s fázovým posunutím $\pi/2$ (180°). Taková vlna vytváří pohyb hnacích nohou podél kosočtverce a je ideální pro vysokou rychlost pohybu, ovšem samotný pohyb může být nelineární a během cyklu může dojít k reverzaci.



Obr. 18. Vlny vytvářející pohyb hnacích nohou podél kosočtverce [2]

Lepšího rozlišení je často dosahováno využitím maximálního cyklu délky kroku. Délka kroku tak může být o něco kratší a může se přizpůsobovat fázovému posunu mezi vlnami. Na Obr. 19. průběh vytváří krok o velikosti 10% kroku předchozího případu (obr. 18.).



obr. 19. Vlny vytvářející zmenšenou délku kroku [2]

Polohování s rozlišením větším než je 5% maximální délky kroku vyžadují jiné řešení. Maximální délka kroku je u piezomotorů typu Piezo LEGS v rozmezí od 4 do 8 μ m. Využitím metody redukováného fázového posunu může být rozlišovací schopnost až 200nm. Tohoto rozlišení můžeme docílit také využitím režimu "nano-step". Maximální dosažitelná rozlišovací schopnost je dána kombinací rozlišovací schopnosti D/A převodníku a počtem bodů vlny. Pokud je na vlně 256 bodů, dostaneme rozlišovací schopnost až 20nm (u 4 μ m délky kroku). V tomto případě nám již D/A převodník nabízí dostatečnou rozlišovací schopnost.

2.3.2. Řídící jednotka PDA 3.1

Řídící jednotka PDA 3.1. se využívá pro řízení lineárních a rotačních piezomotoru typu Piezo LEGS.

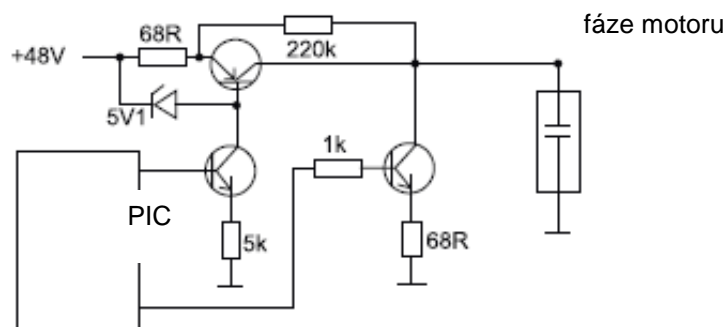


Obr. 20. řídící jednotka PDA 3.1. piezomotorů typu Piezo LEGS

Řídící jednotka je navržena pro použití se standardními typy piezomotorů poskytovanými firmou Piezomotor AB a její výstupy jsou navrženy pouze na udávané specifikace.

Vše co je třeba k používání řídicí jednotky je DC napěťový zdroj (12V a 0,3A) a analogové řídicí napětí (9,6V DC), které může být součástí řídicí smyčky. Rychlost bude záležet na rozsahu použitého řídicího napětí zatímco směr pohybu bude záviset na polaritě napětí. Obr. 20 ukazuje přední panel řídicí jednotky PDA 3.1.

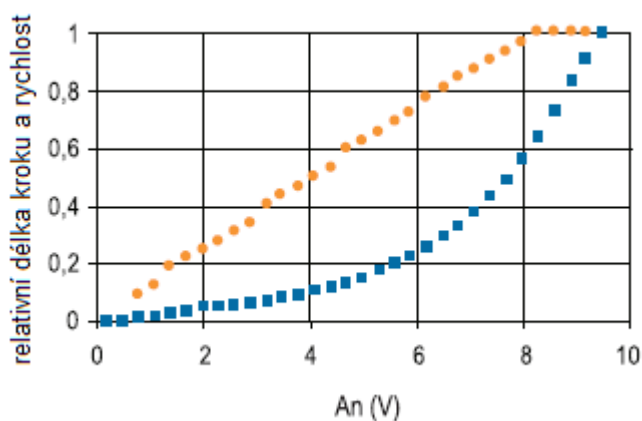
Poznámka : Experimentální využití této řídicí jednotky není součástí této práce.



Obr. 21. Schématický nákres řídicí jednotky [2]

2.3.2.1. Analogový řídicí signál

Toto zařízení pracující s $\pm 10V$ analogovým signálem by mělo být schopno poskytnout 1mA signálu proudu. Řídicí jednotka vede napětí do 32 rychlostních kanálů v každém směru. Záporné napětí znamená stejné chování ovšem v opačném směru. Každý rychlostní kanál je 0,3V široký. Pro první rychlostní kanál (0-0,3V) je pohyb motoru zastaven. Mezi 0,3 - 0,6V (tzv. "bending" mód) se motor může velice pomalu rozběhnout s velice vysokým počtem kroků, zatímco při napětí 0,6 - 9,6V motor přechází do "módu rychlého pohybu". "Bending" mód se využívá pro nejpresnější polohování s schopností dosáhnout nm kroků.



Obr. 22. Závislost délky kroku \bullet a rychlosti \blacksquare na velikosti řídicího napětí udávaná výrobcem [2]

Pokud je analogový signál ztracen, **An** pin donutí jednotku běžet dál při malé rychlosti. Toho se můžeme vyvarovat zapojením/připájením rezistoru o velikosti 2700 Ω mezi **An** pin a **GND**, i když tím zvětšíme analogový signál asi pětkrát.

Jednotka zareaguje na změnu během 0,3ms. První krok režimu kanálu od 0,6 - 0,9 V je zvláštní případ, neboť signál je jednotkou sledován o 1ms déle. Pokud se signál vrátí zpět do "bending" módu, jednotka v tomto módu dále setrvává. To však předpokládá novou cílovou pozici a nastavení vysoké ohybové rychlosti. Rychlost pro bezproblémový běh lineárních piezomotorů v "bending" módu je kolem 0,5 μ m/s.

2.3.2.2. Používání řídicí jednotky PDA 3.1.

Funkčnost jednotky může být jednoduše manuálně otestována: a to připojením napájecího zdroje a propojením konektorů **An** a **GND** vodičem. Po odpojení vodiče zůstatkový **An** signál rozeběhne pomalým pohybem motor. Připojením pinů **An** a



+12V se motor rozeběhne plnou rychlostí, zatímco propojení **An** a **GND** konektoru 10kΩ odporem rozběhne motor velice pomalu v řádu desetin $\mu\text{m/s}$.

2.3.2.3. Senzor zpětné vazby

Senzor zpětné vazby vyžaduje k fungování PC, které je schopno rozeznat signál snímače a ovládací analogový signál. Analogový řídicí signál by měl být úměrný pozičním chybám. Napětí signálu 8V znamená maximální délku kroku. Pokud je maximální délka kroku motoru $6\mu\text{m}$, potom je úměrná hodnota $8\text{V}/6\mu\text{m} = 1,3\text{V}/\mu\text{m}$. Maximální chyba u počátečního polohování by měla být méně než 1/30 maximální délky kroku (cca 200nm u lineárních piezomotorů).

Typický postup pro dosažení a zaměření polohy může vypadat takto: Jednotka je nejprve použita v krokové režimu k rychlému nalezení cílové polohy. Jakmile se poziční chyba zmenší, napětí **An** je nastaveno podle zesílení a když je **An** signál klesne pod 0,6 V jednotka vstoupí do "bending" módu. Dál se přibližuje k cílové poloze dokud napětí neklesne pod 0,3 V (tzn 200nm). Dále se zvyšuje zesílení aby bylo dosaženo co nevyšší přesnosti v řádu nm, ale zabránilo se vstupu do krokového režimu. Zesílení standardních Piezo LEGS motorů bývá cca 0,2 V/nm.

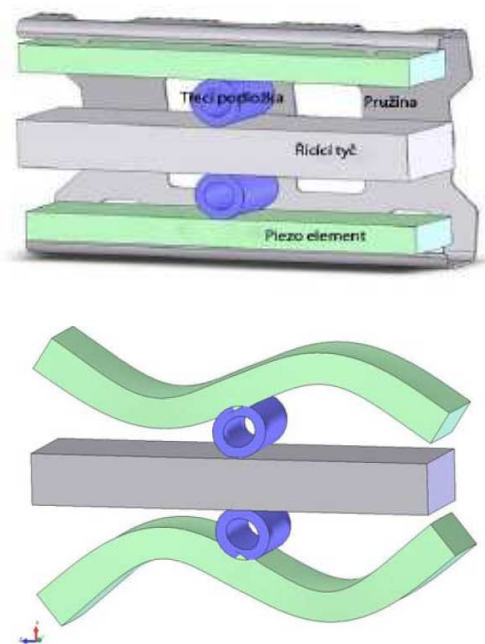
Tab. 3. Parametry řídicí jednotky PDA 3.1

Rozměry jednotky (VxŠxH)	73,6 x 71 x 17,2
Váha [g]	70
Frekvenční rozsah (430 Nf/fáze) [Hz]	0-700
Průběh	lichoběžníkový
Kapacitní rozsah fáze (μF)	0,1-3
Analogová regulace rychlosti [(V)	$\pm 9,6$
Napájecí napětí [V]	12 \pm 0,5
Napájecí napětí (A)	0,3
Klidový proud (mA)	<20
Počet fází	4
Fázové napětí [V]	47 \pm 3
Operační rozsah teplot [°C]	10-50
Skladovací rozsah teplot [°C]	-25-+85
Teplotní ochrana	~70
Uchytení	šrouby

3. PIEZOMOTOR TYPU PIEZOWAVE

3.1. LINEÁRNÍ PIEZOMOTOR TYPU PIEZOWAVE

Piezowave motory byli původně navrženy pro aplikace ve spotřební elektronice, a své využití měly například v mobilních telefonech. V průběhu dalšího času našly svoje využití ve fotoaparátech, medicínské elektrotechnice a elektromechanických dveřních zámcích. Jednoduchá konstrukce piezowave motoru umožňuje jeho masovou výrobu za velice nízkých nákladů a využití v dalších aplikacích. Piezowave motory se skládají z nízkého počtu částí a všechny jsou vyrobeny nejmodernějšími technologiemi.



Obr. 23. Části piezomotoru typu piezowave (nahore) a ohyb piezoelementů (dole) [2]

Každý piezoelement může být ovládán odděleně. Typicky dva sinusové signály s 90° posunem jsou přivedeny na **A** a **B** elektrody. Přivedeným napětím je vytvořeno pnutí piezokeramického materiálu mezi elektrodami. Střídáním napětí na vysoké frekvenci jsou piezoelementy uvedeny do rezonance. Fáze mezi těmito dvěma signály bude určovat směr pohybu pohonu tyče. Pohyb Piezo WAVE motoru je založen na tření, to znamená, že pohyb se přenáší kontaktem třením mezi podložkou a hnanou tyčí. Třecí podložky, které slouží k převedení pohybu z

piezoelementu na jezdec, začnou vytvářet eliptický pohyb, díky zvlněnému prohnutí piezoelementu. Třecí podložka je v kontaktu s jezdcem po dobu poloviny cyklu a proto se jezdec začne pohybovat krok dopředu nebo dozadu podle způsobu zapojení. K vytvoření tření mezi podložkou a jezdcem slouží pružinový systém. Průměrná délka kroku je cca 1 mikrometr.

Frekvence samotného pohonu je se blíží 100 kHz což znamená, že tyč se může pohybovat rychle po malých krocích. Protože PiezoWave přídržná síla se přenáší třením, není potřeba, aby byl motor energeticky aktivován k udržení své stávající polohy. V případě, že je na tyč vyvinuta velká nárazová síla, tyč proklouzne a motor tak nebude poškozen. V důsledku tohoto, je PiezoWave motor odolný.

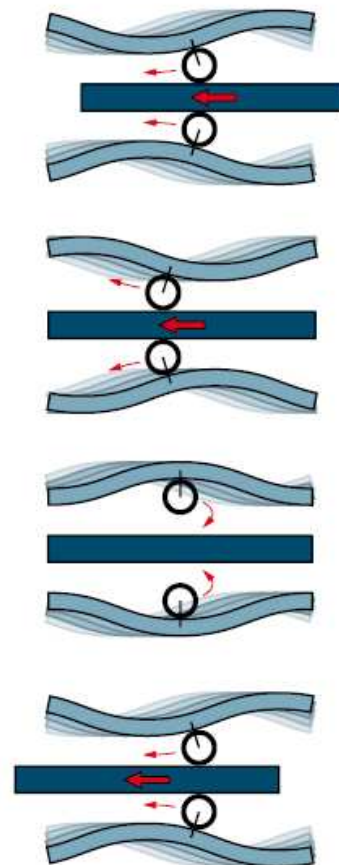
3.1.1. Popis funkce motoru typu Piezo WAVE

1) Motor se skládá ze dvou piezo prvků, oba jsou přiloženy na řídicí podložky. Když je motor aktivován, piezo prvky a podložky se pohybují, což způsobí pohyb hnané tyče (tmavě modrá část s červenou šipkou)

2) Když je první cyklus u konce, řídicí podložky se nacházejí co nejvíce vlevo.

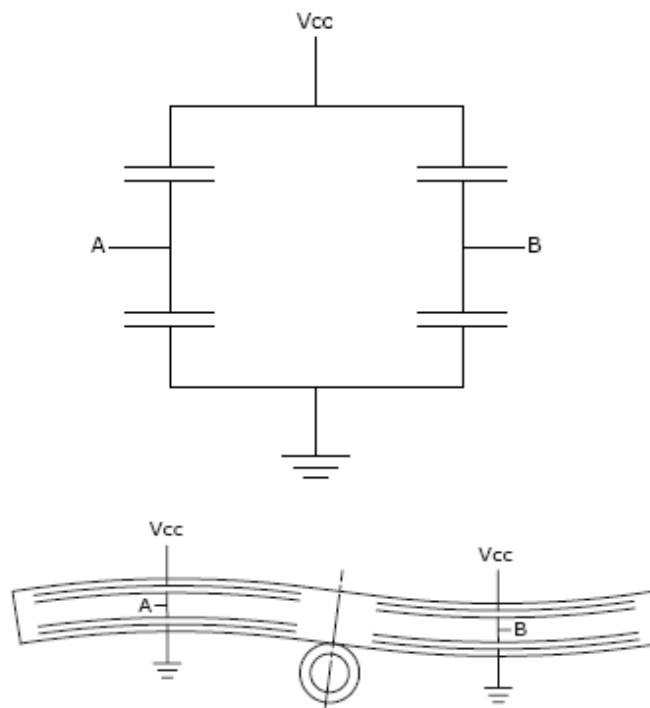
3) Řídicí podložky jsou poté zdviženy z řídicí tyče aby umožnili piezoelementům se přemístit zpět.

4) Znovu zahájení pohybu, piezomotor může opět pohybovat třecími podložkami směrem doleva.



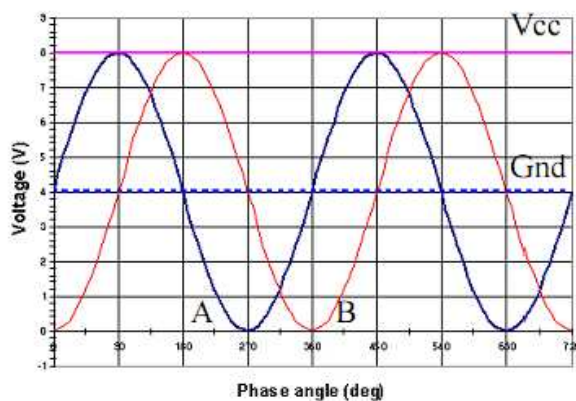
Obr. 24. Princip funkce Piezowave motoru [2]

Ukázku pohybu tohoto motoru lze spatřit jako animaci na webu výrobce piezomotoru: www.piezomotor.se nebo www.piezomotor.com [1]



Obr. 25. Elektrické schéma piezomotoru typu Piezowave [2]

Oba piezoelementy se skládají ze dvou na sobě nezávislých částí, které můžeme znázornit jako dva kondenzátory. Ze schématu vyplývá to, že jednotlivé části jsou v paralelním zapojení a přivádíme na ně dva vzájemně posunuté signály o 90° . Fázový posuv mezi signály vytváří pohyb ve směru jezdc. Při pohybu motoru v kladném směru je fáze **A** o $+90^\circ$ posunutá oproti fázi **B**, při opačném směru jsou fáze zapojeny opačně.



Obr. 26. Ideální průběh řídicích napětí Piezowave motoru udávaný výrobcem [1]

Obvyklé hodnoty napájecího napětí (U_{Vcc}) a napětí zemního vodiče (U_{gnd}) lze vyčíst z grafu obrázku 26. Je nutné, aby špička fázového napětí nepřesahovala o více jak 2 V nad U_{Vcc} a zároveň nebyla menší než 2 V od zemního vodiče. Změna časového průběhu fázového napětí od sinusového průběhu nemá téměř žádný vliv na činnost motoru.

3.2. ŘÍZENÍ MOTORU TYPU PIEZO WAVE



Obr. 27. Struktura Piezowave motoru s ručním ovladačem a komunikačním portem pro řízení pomocí PC

Piezowave motor lze řídit pomocí (vždy se využívá buzení resonančním LC obvodem):

3.2.1. Ruční ovládání pomocí ovladače

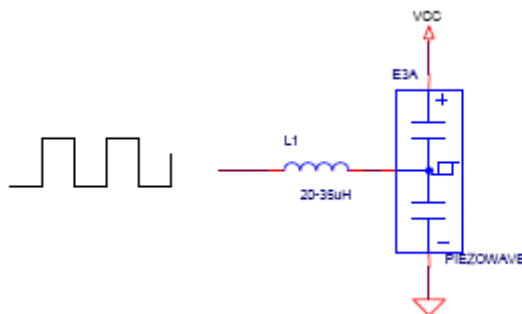
Je napájeno 12V bateriemi, přičemž využívané napětí je necelé 4V. Ovladač obsahuje 4 tlačítka, dvě slouží k výběru směru posuvu, další dvě ke změně rychlosti. Nastavit můžeme celkem tři rychlostní stupně.

3.2.2. Ovládání pomocí PC

K ovládání Piezowave motoru pomocí PC můžeme využít například programu "LabView Application" a přiloženého modulu s konektorem RS232.

Nejjednodušším způsobem ovládání Piezowave motoru je vysílání obdélníkových impulsů přes sériově zapojenou indukčnost na vlastní kapacitu, kterou tvoří

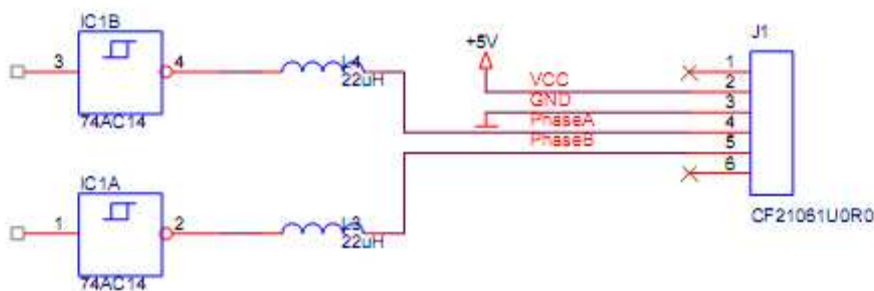
piezoelementy. Sériový LC obvod pak z pravoúhlých impulsů vytvoří signál, odpovídající sinusovému průběhu signálu. Amplitudy obou signálů musí být přibližně stejné jako amplituda napájecího napětí U_{VCC} .



Obr. 28. Schéma principu řízení s indukčností v sérii s fází motoru [2]

3.2.3. Příklady hnacích stupňů

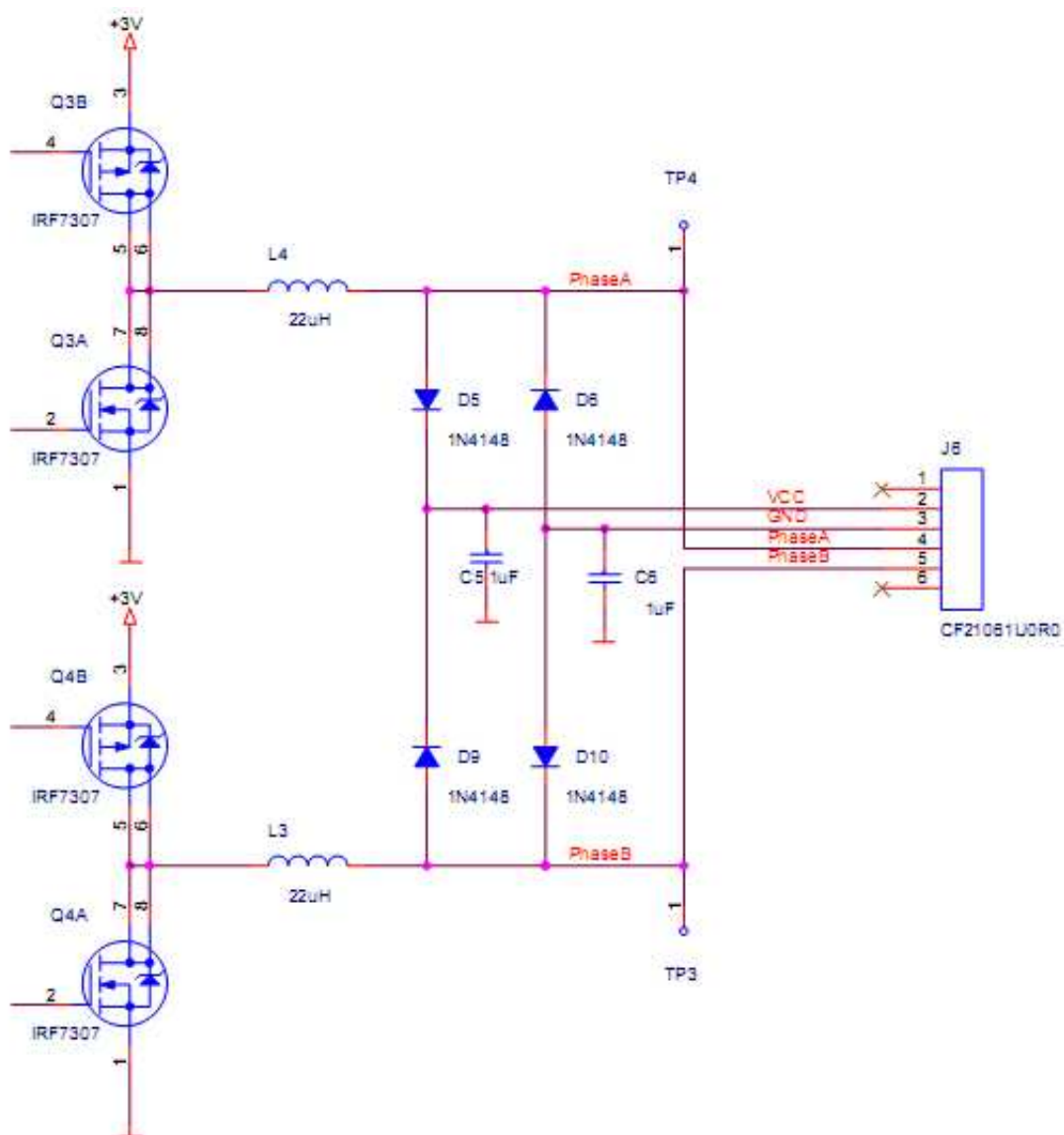
Obr. 29 ukazuje využití jednoduchého TTL klopného obvodu. Jedná se o jednoduché ovládání, které může být využito v aplikacích nenáročných na velkou účinnost. Řídícím signálem jsou čtvercové pulzní vlny s 90° fázovým posunutím. Směr pohybu se mění pomocí přepínání fází.



Obr. 29. Schéma jednoduchého ovladače vhodného pro obvod motoru typu Piezo WAVE [2]

Na obr. 30 je zobrazen obvod s větší účinností, který může být napájen v rozsahu 2,7-3,3 V. Toto zapojení je použito v ručním ovladači, který je napájen tužkovými bateriemi. Při navrhování přepínání je velmi důležité povolit dostatečně dlouhou "mrtvou dobu" mezi vypnutím/zapnutím přepínacího signálu nízké a vysoké úrovně.

Tento návrh schématu využívá virtuálního U_{GND} a řídicí napětí obvodu U_{VCC} je generováno fázovým napětím zdroje. Obdobný návrh může být ovšem samozřejmě použit zároveň s řídicími obvody na bázi TTL klopných obvodů.

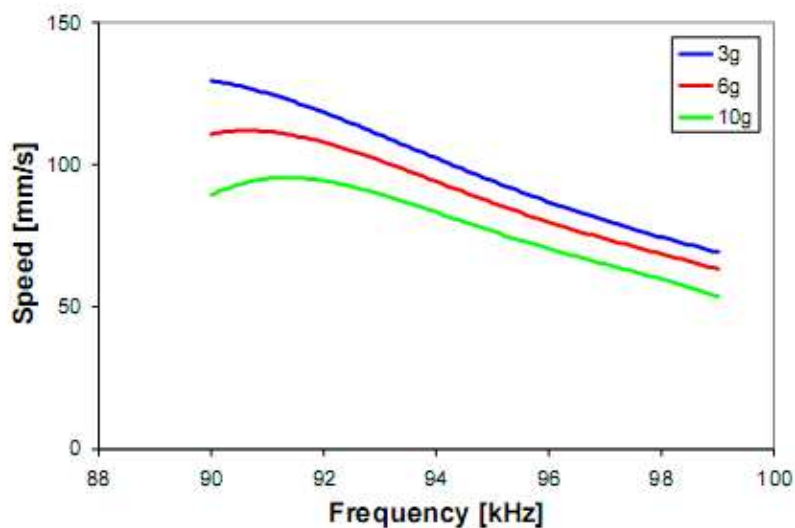


Obr. 30. Schéma nízkonapětového řízení pro piezomotor typu Piezowave [2]

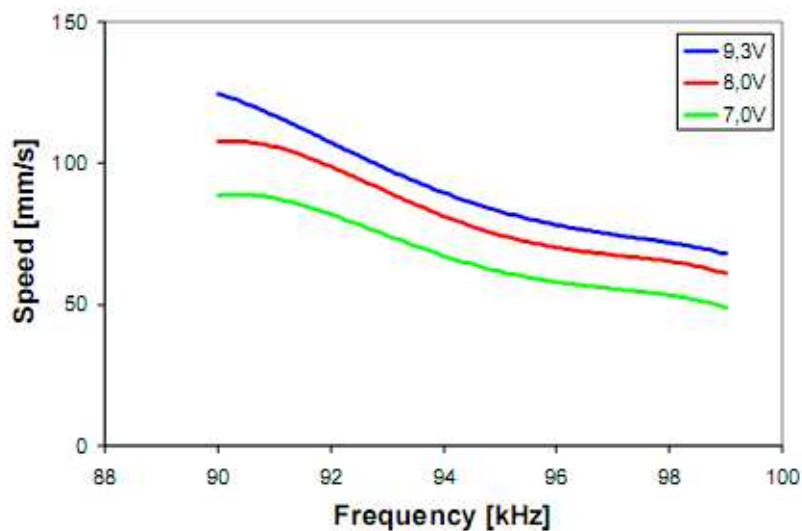
Oba tyto uvedené návrhy využívají rezonančního LC obvodu. Je samozřejmě možné řídit motor pomocí sinusového průběhu vygenerovaného pomocí jiného obvodu, ale energetická spotřeba se logicky zvýší, pokud využijeme nerezonančního typ řízení. Klasické příklady pro různé řídicí podmínky udávají následující grafy. Odchylka

mezi rychlostmi jednotlivých typů motorů je $\pm 10\%$. Činnost motoru může být nestabilní při frekvenci nižší než 90 kHz, tyto frekvence proto nejsou doporučovány.

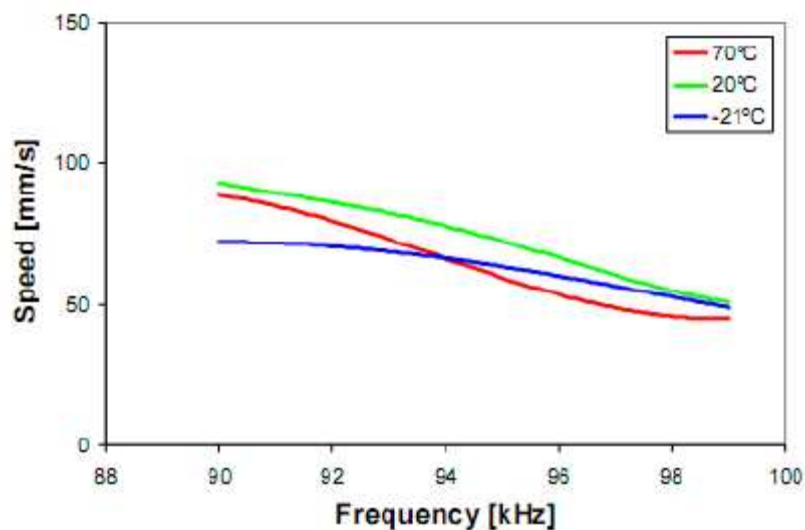
3.2.4. Charakteristiky a parametry uváděné výrobcem



Obr. 31. Závislost rychlosti na frekvenci pro různé zátěže při 8V a 20°C [1]



Obr. 32. Závislost rychlosti na frekvenci pro různá napětí při 0,1N a 20°C [1]



Obr. 33. Závislost rychlosti na frekvenci pro různé teploty při napětí 8V a 0,1N [1]

Tab. 4. Absolutní min/max hodnoty

Fázové napětí U_{pp}	0 - 9V
Rozdíl $U_{max} - U_{Vcc}$	< +2 V
Rozdíl $U_{max} - U_{Gnd}$	> -2 V
Frekvence	90 - 98 kHz

Tab. 5. Ideální napájecí hodnoty

Fázové napětí U_{pp}	8 V
Fázové napětí (DC)	4 V
Fázový posuv A-B	$\pm 90^\circ$
U_{Vcc} (DC napětí)	8 V
Kapacita/fáze	100 nF
Frekvence	91 - 93 kHz



Tab. 6. Vlastnosti motoru typu piezowave

Rychlost bez zátěže	150mm/s
Rychlost s 0.1N zátěží	50mm/s
Maximální síla	0.15 N
Přídržná síla	0.3 N
Zdvih	8 mm
Průměrná délka kroku	0.5-1 μ m
Životnost (cyklus = 8mm)	>100.000

Tab. 7. Mechanické hodnoty

Rozměry motoru	14x7,2x4,4mm
Hmotnost motoru	0,6 g
Rozměry piezoelementu	8,1x1,4x0,6 mm



4. MĚŘENÍ PIEZOMOTORŮ

4.1. MĚŘENÍ NA LINEÁRNÍM PIEZOMOTORU TYPU PIEZO LEGS

4.1.1. Měření závislosti rychlosti na síle

Při měření využijeme tíhového zatížení, jehož síla F má určitě tího zrychlení g . Tato síla má velikost

$$F = m \times g \quad (1)$$

kde g je tíhové zrychlení a m je hmotnost závaží.

Určení rychlosti piezomotoru lze teoreticky provést pomocí digitálního měřicího přístroje, ale měření by vzhledem k nízké rychlosti a ráze nebylo přesné. Měření rychlosti proto vychází ze vztahu (s je dráha, t je čas):

$$v = s / t \quad (2)$$

Tab. 8. naměřené a spočítané hodnoty

Měření	Čas (t)	Hmotnost (m)	Rychlost (v)	Tíhová Síla (F)
-	[s]	[g]	[mm.s ⁻¹]	[N]
1	6,8	0	4,41	0,00
2	7,0	25	4,29	0,25
3	7,4	50	4,05	0,49
4	7,9	75	3,80	0,74
5	8,6	100	3,49	0,98
6	9,6	125	3,13	1,23
7	10,9	150	2,75	1,47
8	12,9	175	2,33	1,72
9	16,1	200	1,86	1,96
10	20,5	250	1,46	2,45

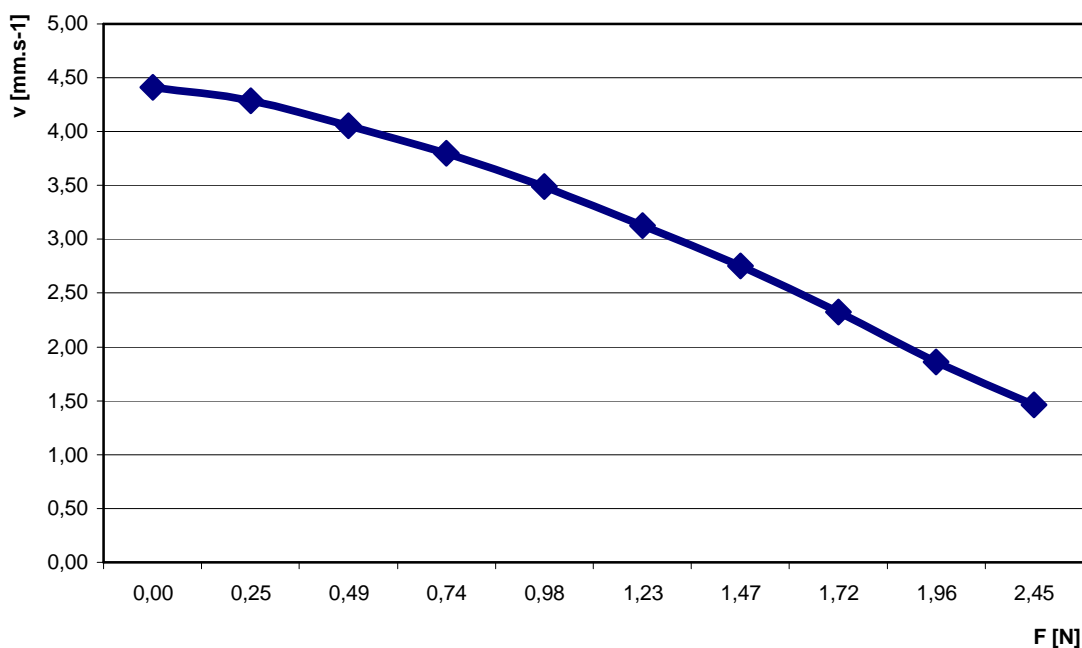
Dráha pojezdu hnané tyče při měření byla rovna 30mm.



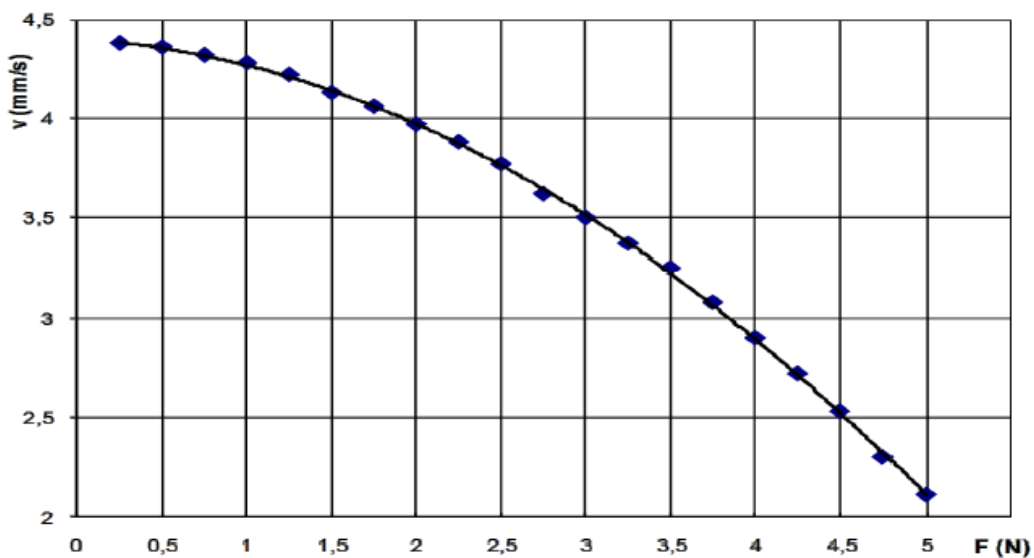
Příklad výpočtu pro druhý řádek tabulky:

$$v = s / t = 30 \text{ mm} / 7,0 \text{ s} = \underline{4,29 \text{ mm.s}^{-1}} \quad (3)$$

$$F = m \times g = 25 \text{ g} \times 9,81 \text{ m.s}^{-2} = \underline{0,25 \text{ N}} \quad (4)$$



obr. 34. závislost rychlosti na síle piezomotoru zjištěná měřením



obr. 35. závislost rychlosti motoru na síle ($f = 700 \text{ Hz}$) udávaná výrobcem [1]



4.1.2. Měření přídržné síly

U tohoto měření lze opět využít tíhového zatížení. Na měřicí podložku se kladou závaží o určité hmotnosti dokud nedojde k prokluzování hnané tyče. Zjišťujeme tedy maximální sílu, kterou je piezomotor schopen udržet při vypnutém stavu. Opět platí:

$$F = m \times g = 700 \text{ g} \times 9,81 \text{ m.s}^{-2} = \underline{6,87 \text{ N}} \quad (5)$$

Dle katalogu výrobce motoru by maximální statická síla měla mít hodnotu 7,3N.

4.1.3. Měření závislosti rychlosti na proudu

Využijeme opět vztahu

$$v = s / t \quad (6)$$

kde s je dráha, jejíž délka se nemění, a t je doba, za kterou ji hnaná tyč urazí. Velikost proudu lze odečíst z ampérmetru. Výsledky tohoto měření jsou vzhledem k možnostem převzaty z dřívějších prací. [6]

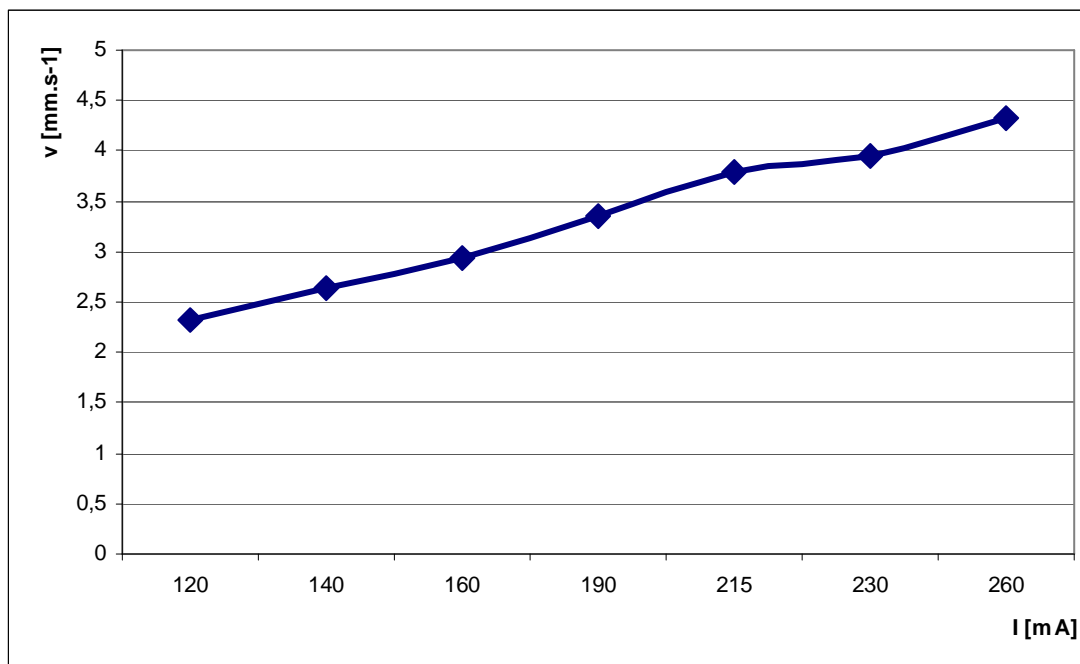
tab. 9. naměřené a spočítané hodnoty

Měření	Čas (t)	Proud (I)	Rychlost (v)
-	[s]	[mA]	[mm.s ⁻¹]
1	12,00	120	2,33
2	10,60	140	2,64
3	9,55	160	2,93
4	8,36	190	3,35
5	7,40	215	3,78
6	7,09	230	3,95
7	6,46	260	4,33

Dráha pojezdu hnané tyče při měření byla rovna 28 mm.

Příklady výpočtu pro první řádek:

$$v = s / t = 28 \text{ mm} / 12,00 \text{ s} = \underline{2,33 \text{ mm.s}^{-1}} \quad (7)$$



obr. 36. závislost rychlosti na proudu

Hnaná tyč má v každém směru jinou rychlost, proto je třeba při měření dodržet jeden směr, tzn. Zleva doprava nebo zprava doleva. Tuto skutečnost však výrobce nijak neuvádí.

4.2. MĚŘENÍ NA ROTAČNÍM PIEZOMOTORU TYPU PIEZO LEGS

4.2.1. Měření závislosti otáček na momentu

Využívá se momentu síly, jež je dán působením síly F , která působí na těleso při jeho otáčení kolem jeho osy. Směr síly F působí v rovině kolmé k ose otáčení. Pokud značíme polohový vektor působišťe síly F písmenem r , můžeme moment M vyjádřit jako:

$$M = r \times F \quad (8)$$

Moment síly je vektor. Počáteční bodem vektoru r je průsečík osy otáčení s kolmou rovinou. Potom pro jeho velikost platí:

$$M = r \times F_{\perp} = r \perp F = r \times F \sin\varphi \quad (9)$$



K měření využijeme například navijáku, který pevně připevníme k hřídeli piezomotoru. Za parametr r považujeme poloměr navijáku (24,5 mm). Poté se měří čas, za který se naviják otočí o jednu otáčku. Změřený čas se následně přepočítá na rychlost pomocí:

$$n = 60 / t \quad (10)$$

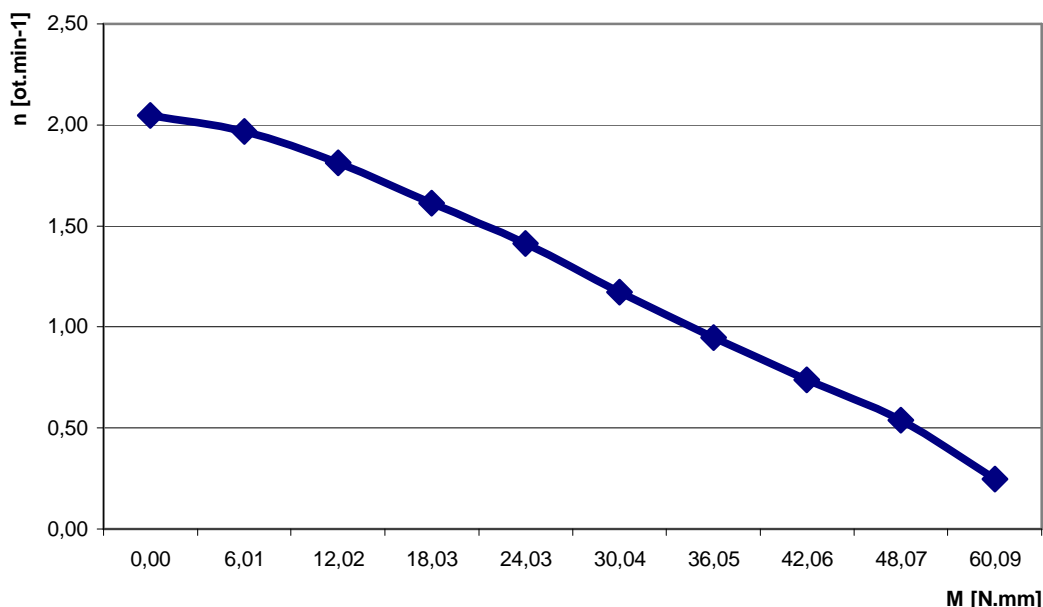
Tab. 10. Naměřené a spočítané hodnoty

Měření	Čas (t)	Hmotnost (m)	otáčky (n)	Moment (M)
-	[s]	[g]	[ot.min ⁻¹]	[N.mm]
1	29,3	0	2,05	0,00
2	30,5	25	1,97	6,01
3	33,1	50	1,81	12,02
4	37,2	75	1,61	18,03
5	42,5	100	1,41	24,03
6	51,2	125	1,17	30,04
7	63,4	150	0,95	36,05
8	81,1	175	0,74	42,06
9	111,5	200	0,54	48,07
10	242,3	250	0,25	60,09

Příklad výpočtu pro druhý řádek tabulky:

$$n = 60 / t = 60 / 30,5 = \underline{1,97 \text{ ot.min}^{-1}} \quad (11)$$

$$M = r \times F_1 = r \times m \times g = 24,5 \text{ mm} \times 25 \text{ g} \times 9,81 \text{ m.s}^{-2} = \underline{6,01 \text{ N.mm}} \quad (12)$$



obr. 37. závislost otáček na momentu zjištěná měřením

4.2.2. Měření závislosti otáček na proudu

Při měření vyjdeme opět ze vztahu:

$$n = 60 / t \quad (13)$$

kde t je čas za který se hřídel piezomotoru jedenkrát otočí kolem své osy. Hodnotu proudu lze měřit pomocí ampérmetru. Výsledky tohoto měření jsou vzhledem k možnostem převzaty z dřívějších prací. [6]

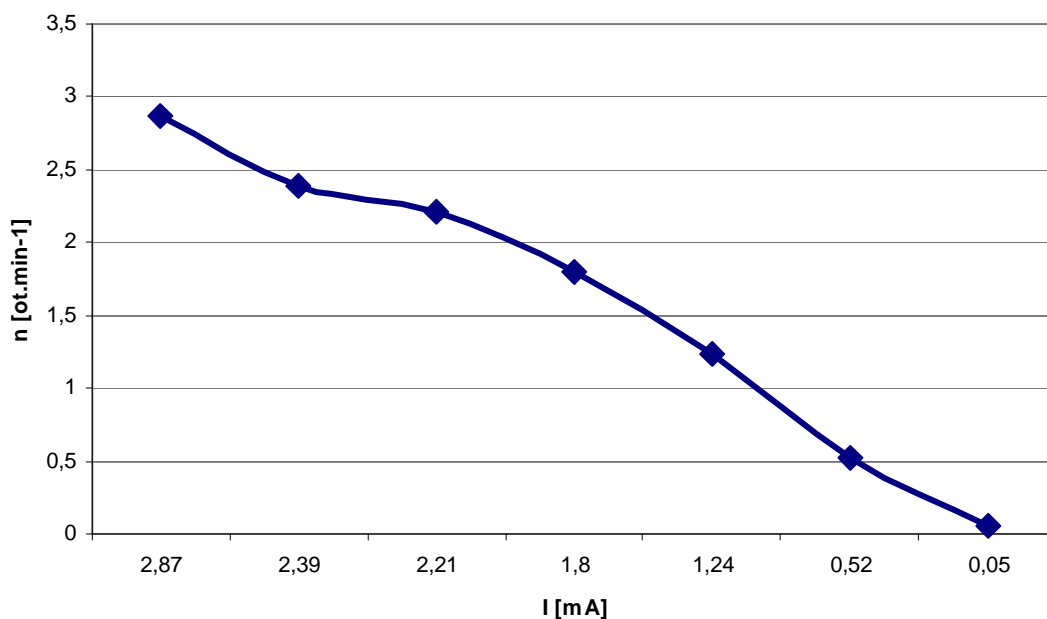
tab. 11. naměřené a spočítané hodnoty

Měření	Čas (t)	Proud (I)	otáčky (n)
-	[s]	[mA]	[ot.min ⁻¹]
1	20,90	280,00	2,87
2	25,14	240,00	2,39
3	27,20	225,00	2,21
4	33,30	190,00	1,80
5	48,60	160,00	1,24
6	115,00	110,00	0,52
7	1320,00	78,00	0,05



Příklad výpočtu pro první řádek tabulky:

$$n = 60 / t = 60 / 20,90 = \underline{2,87 \text{ ot.min}^{-1}} \quad (14)$$



Obr. 38. Závislost otáček na proudu rotačního piezomotoru

4.2.3. Měření statického momentu

Využívá se opět působení tíhové síly. K měření použijeme opět navijáku, který se postupně zatěžuje jednotlivými závažími dokud nedojde k pootočení hřídele rotačního piezomotoru. Zjistíme tedy maximální sílu, kterou je piezomotor schopen držet závaží při vypnutém stavu. Platí opět tato rovnice:

$$F = m \times g = 350 \text{ g} \times 9,81 \text{ m.s}^{-2} = \underline{3,43 \text{ N}} \quad (15)$$

kde m je celková hmotnost závaží a g je tíhové zrychlení. Pro moment potom platí rovnice:

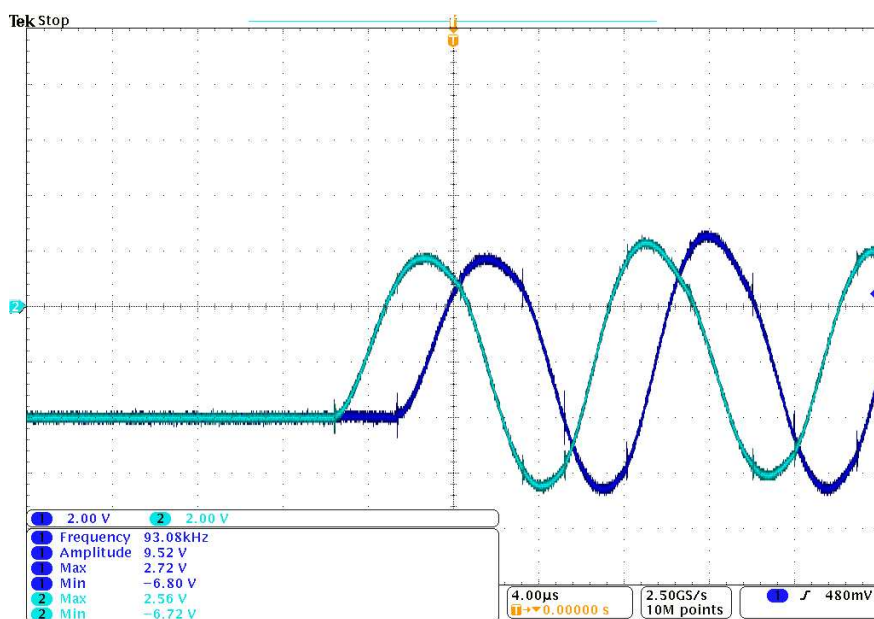
$$M = r \times F = 24,5 \text{ mm} \times 3,43 \text{ N} = \underline{84,04 \text{ N.mm}} \quad (16)$$

kde r je rameno síly. Tabulková hodnota udávaná výrobcem je 90N.mm.

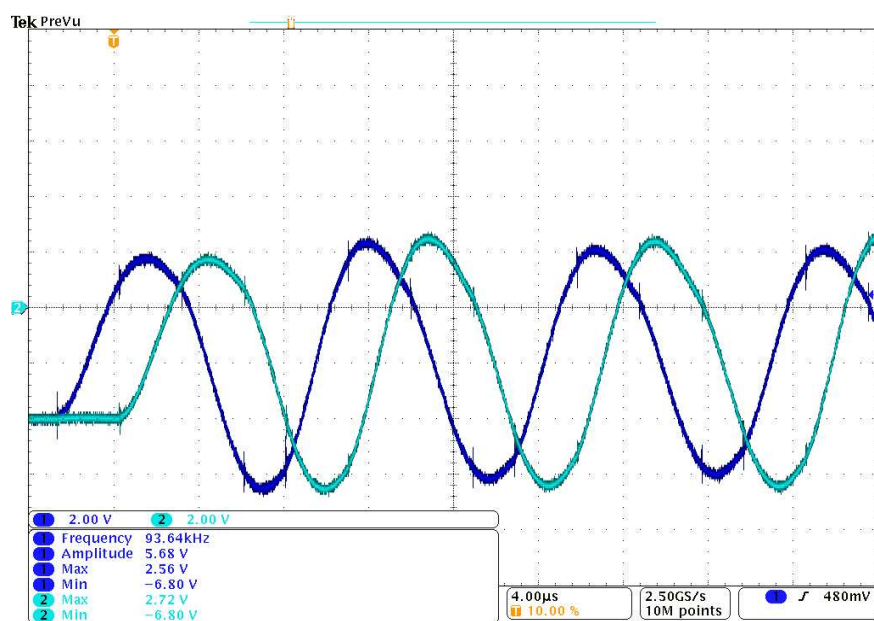
4.3. MĚŘENÍ ŘÍDÍCÍCH SIGNÁLŮ MOTORU PIEZO WAVE

4.3.1. MĚŘENÍ PRŮBĚHŮ ŘÍDÍCÍCH SIGNÁLŮ

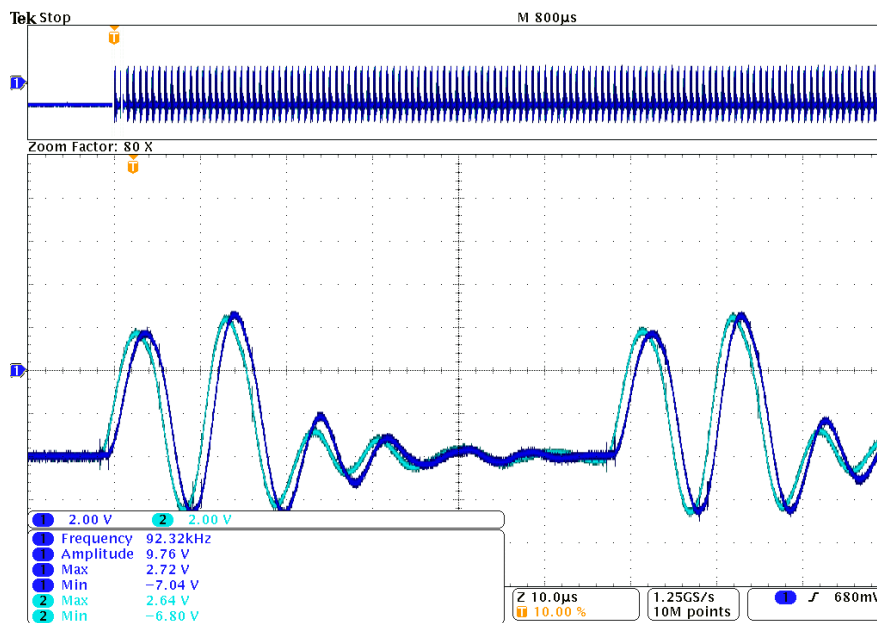
Měření řídicích charakteristik lze provést pomocí moderních osciloskopů s možností zaznamenání průběhu. Měření jsme provedli pro oba dva směry pohybu piezowave motoru a tři možné rychlosti motoru nastavitelné ručním ovladačem. Výsledkem měření jsou průběhy řídicích fází A (tyrkysový) a B (modrý).



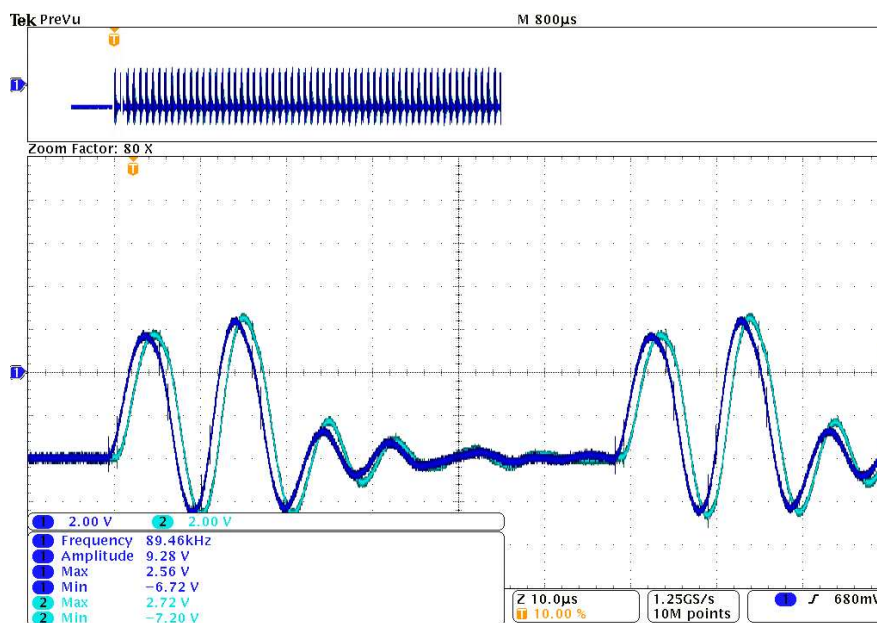
Obr. 39. Řídicí charakteristika piezowave motoru nejvyšší rychlosti, směr dopředu



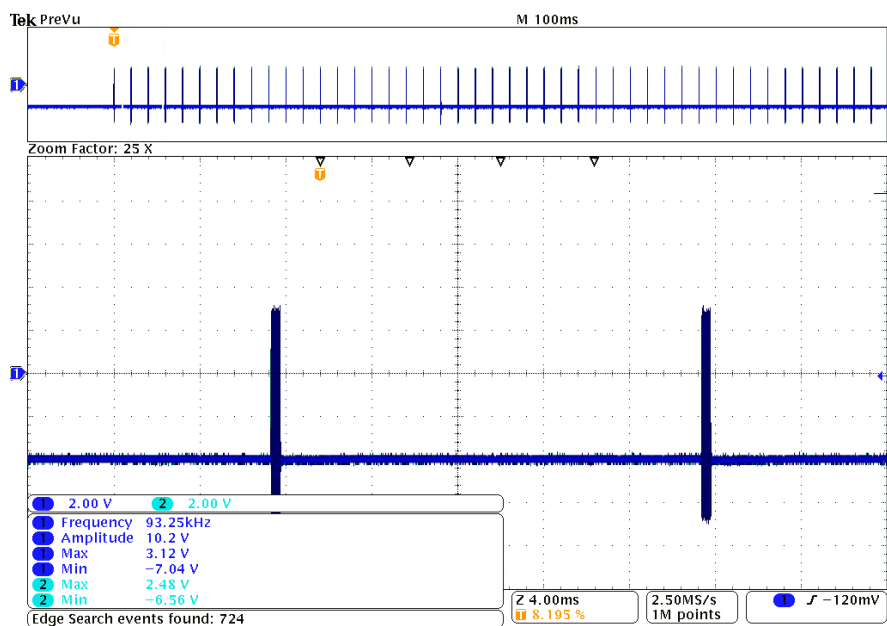
Obr. 40. Řídicí charakteristika piezowave motoru nejvyšší rychlosti, směr dozadu



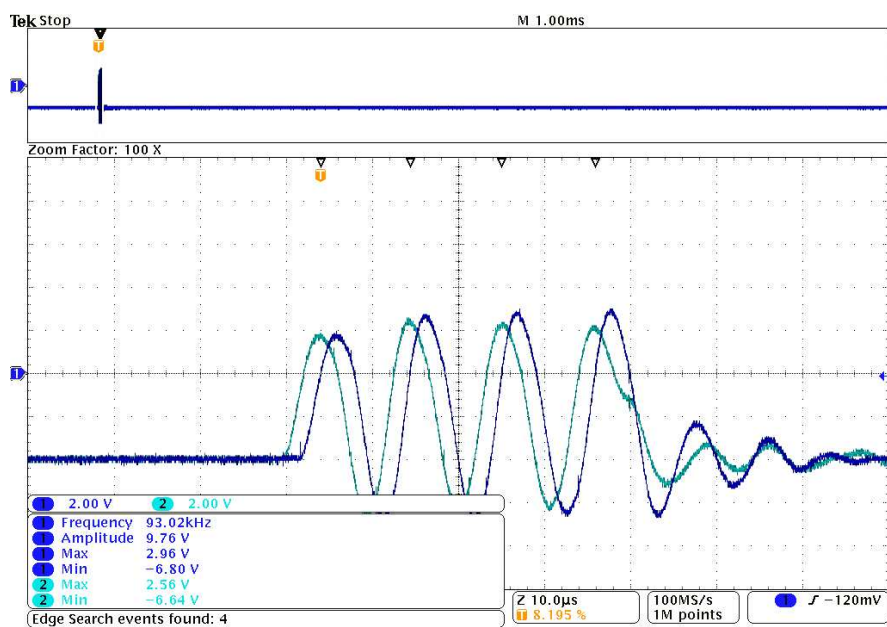
Obr. 41. Řídicí charakteristika piezowave motoru střední rychlosti, směr dopředu



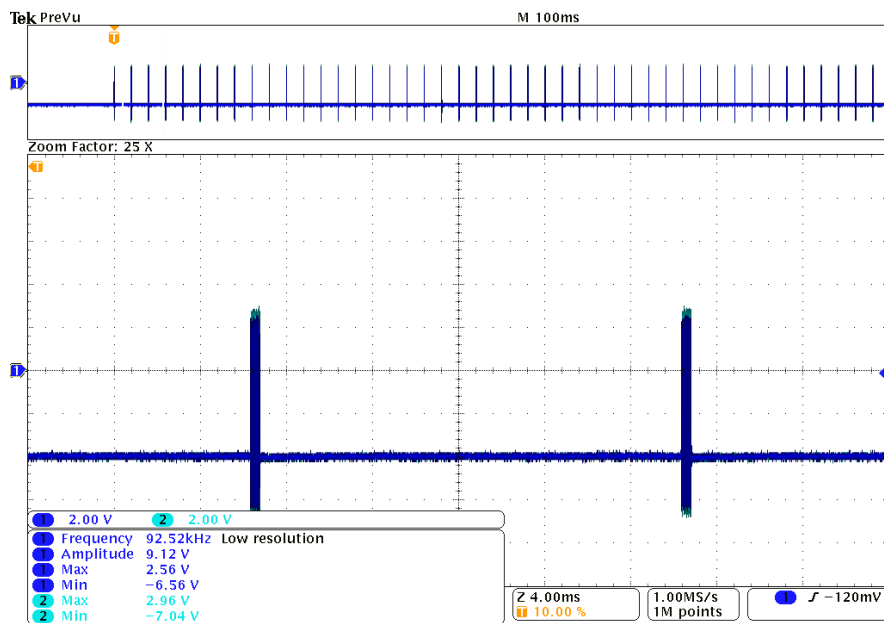
Obr. 42. Řídicí charakteristika piezowave motoru střední rychlosti, směr dozadu



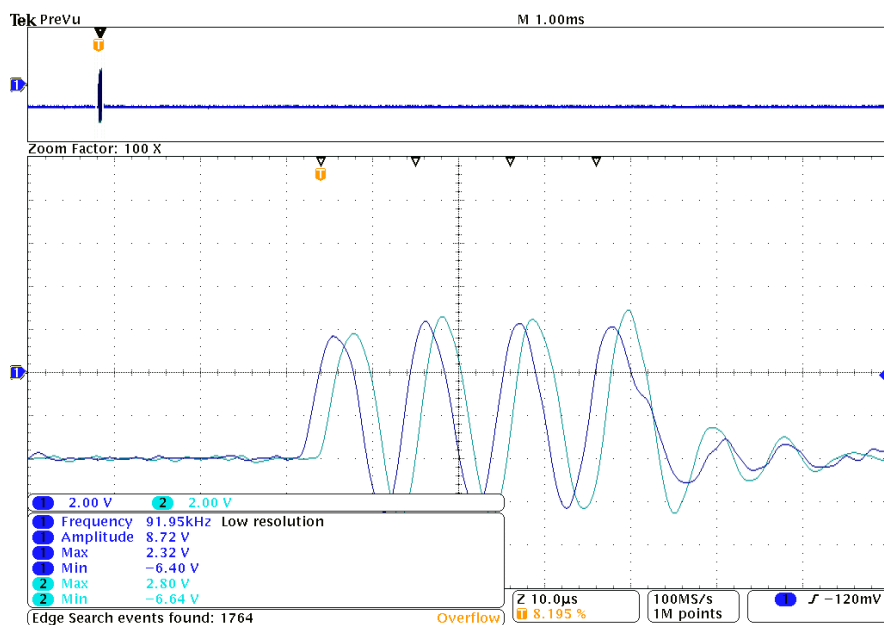
Obr. 43. Řídící charakteristika piezowave motoru *pomalé rychlosti, směr dopředu*



Obr. 44. Řídící charakteristika piezowave motoru *pomalé rychlosti, směr dopředu(detail)*



Obr. 45. Řídicí charakteristika piezowave motoru *pomalé rychlosti, směr dozadu*



Obr. 46. Řídicí charakteristika piezowave motoru *pomalé rychlosti, směr dozadu(detail)*



Výsledná podoba řídicích signálů, vycházejících ze záporného napětí je dána invertovaným zapojením elektrod při měření. Na podobu a vlastnosti signálů to ovšem nemá vliv.

Frekvence řídicích signálů u rychlého pohybu byla naměřena 93,08kHz ve směru dopředu a 93,64kHz ve směru dozadu a fázovým posunem asi 90°. U střední rychlosti se již frekvence signálů lišili více, ve směru dopředu bylo naměřeno 93,32kHz a ve směru dozadu 89,46kHz, fázový posun byl asi 30°. Při pomalé rychlosti byli naměřeny hodnoty 93,25kHz ve směru dopředu a 92,52kHz ve směru dozadu a fázovým posunem 60°.

K měření byl využit digitální čtyř-kanálový osciloskop Agilent DSO1004A s parametry 60MHz, paměť 20k bodů, vzorkování 2GSa/s

4. VYUŽITÍ PIEZOMOTORŮ V PRAXI

4.1. Polovodiče

Piezomotory se využívají čast při polohování v polovodičové výrobě. Množství těchto aplikací se podobně jako jejich náročnost se rozšiřuje, neboť požadavky na přesnost v průmyslu stále rostou. U polovodičů nacházejí využití zejména ultra vakuové a nemagnetické verze piezomotorů. Masové využití lze předpokládat zejména v nanometrologii, kde piezoelementy tvoří nosné manipulační nástroje.

4.2. Polohování

Mikroskopické, metrologické a biomedicínské zařízení jsou typickými příklady, kde jsou vyžadovány stále lepší a lepší polohovací vybavení. Proto se v tomto odvětví využívají piezomotory. Opět se jedná zejména o pohyb v řádu nanometrů.



Obr. 47. Systém nano-polohování firmy DSM

4.3. Spotřební elektronika

Piezomotory umožňují výrobcům nabídnout zákazníkům stále menší, lehčí, produkty s lepšími funkcemi jako například zoom (zvětšení) a automatické ostření v mobilních telefonech, fotoaparátech a kamerách. Zde se klade důraz zejména na minimální příkon piezomotoru, kdy při použití baterií je kladen důraz na co nejmenší energetickou spotřebu.



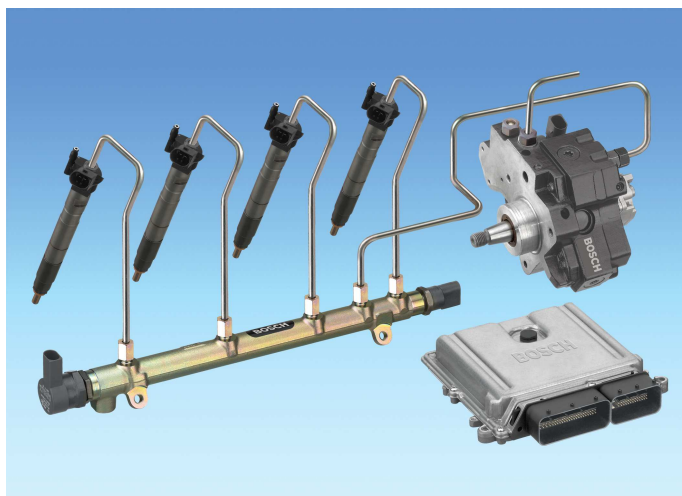
Obr. 48. Systém automatického ostření firmy Sunnytec

4.4. Dveřní systémy

Zámkový průmysl čelí výzvě dělat bezpečnostní systém více inteligentní, což znamená například automaticky zamezit přístup mimo úřední hodiny, nebo udělat ztracený klíč nefunkčním. To vyžaduje rozvoj pohotového velice malého a energeticky účinného elektromechanického systému. Piezomotory otevírají nové možnosti pro tento průmysl.

4.5. Automobilový průmysl

Možnosti piezomotorů v automobilovém průmyslu nejsou dosud plně využity. Nicméně je možné, že piezomotory budou v blízké budoucnosti ovládat stahování oken, polohovat křesla, nastavovat zpětná zrcátka apod. Nedávno se také objevily informace, že by piezomotorů mohlo být využito při přímém vstřikování benzínu do motorů.



Obr. 49. Systém piezo vstřikování paliva firmy Bosch



4.6. Mikrorobotika

Je v současnosti nesporně progresivně se vyvíjející oblastí technické robotiky. Do nynější doby byly vyrobeny mobilní roboty, jejichž rozměry se pohybují nejvíce v desítkách milimetrů. Příkladem je třínohý mobilní robot (obr. X), jehož dvě nohy jsou poháněny pomocí piezokeramických bimorfních akčních členů a třetí je noha je pasivní. Robot je velmi malý (20 mm) a má nízkou hmotnost (30 gramů), ale současně je vzhledem k rozměrům a hmotnosti velmi rychlý (až 20 cm/s). Pohybuje se pomocí velmi malých kroků (několik mikronů), přičemž nohy kmitají vysokou frekvencí (až 800 Hz).



Obr. 50. Mikrorobot typu PLIF (Itálie, 1996)



5. ZADÁNÍ LABORATORNÍCH ÚLOH

5.1. Měření s lineárním motorem typu Piezo LEGS

1. Pomocí vertikálního přípravku s lineárním piezomotorem změřte závislost rychlosti motoru na tíhové síle. Motor ve vertikální poloze vícekrát zatěžujte připravenými závažími a různých hmotnostech a měřte čas v daném úseku. Z času t a znalosti délky měřeného úseku s poté pomocí známých vzorců určete rychlost posunu v a tíhovou sílu F . Pro analýzu časových průběhů rychlosti použijte kameru s vysokou rychlostí snímání. Výsledky znázorněte v grafu.
1. Požitím více závaží najednou určete maximální možnou přídržnou sílu lineárního piezomotoru ve vypnutém stavu. Závaží o hmotnosti m pokládejte na přípravek dokud nedojde k prokluzování tyče motoru. Výpočtem určete maximální přídržnou sílu F .
2. Zjistěte závislost rychlosti na proudu. Měňte velikost řídicího proudu a zároveň měřte čas za který tyč urazí předepsanou vzdálenost s . Vypočítejte rychlost posuvu pro jednotlivé úrovně proudu. Výsledek opět vyneste do grafu.
4. Pomocí vhodného typu osciloskopu zjistěte průběhy řídicích signálů, fázových napětí, proudů a hodnoty frekvencí v nastavitelných režimech pohybu.
5. Ověřte vlastnosti sestavy demo-kitu s řídicí jednotkou PDA 3.1, senzorem zpětné vazby a připojeným PC.

5.2. Měření s rotačním piezomotorem typu Piezo LEGS

1. Změřte závislost otáček na momentu. Pomocí navijáku o určitém poloměru, který je připojen k hřídeli motoru, budeme motor zatěžovat připravenými závažími o různých hmotnostech m , přičemž měříme dobu, za kterou dojde k pootočení osy hřídele o 360° . Z této doby výpočtem určíme počet otáček za minutu n . Moment určete z velikosti zátěže, poloměru navijáku a tíhového zrychlení. Pro analýzu časových průběhů rychlosti použijte kameru s vysokou rychlostí snímání. Výsledky vyneste do grafu.



2. Zjistěte závislost otáček na proudu. Měňte velikosti řídicího proudu a zároveň měřte čas za který se hřídel otočí kolem své osy. Ze vzorce spočítejte rychlost otáček za minutu n a výsledky vynesete do grafu.
3. Změřte statický moment M využitím tíhové síly F . Využijte opět navijáku, který budete zatěžovat hmotností m dokud nedojde k pootočení hřídele piezomotoru. Z této hmotnosti a tíhového zrychlení g určete maximální statickou sílu, pomocí které určíte výsledný statický moment.
4. Pomocí vhodného typu osciloskopu zjistěte průběhy řídicích signálů, fázových napětí, proudů a hodnoty frekvencí v nastavitelných režimech pohybu.
5. Ověřte vlastnosti sestavy demo-kitu s řídicí jednotkou PDA 3.1, senzorem zpětné vazby a připojeným PC.

5.3. Měření s motorem Typu Piezowave.

1. Změřte rychlost pohybu motoru typu Piezowave při různých zatíženích závažími pro nejvyšší, střední a nejnižší rychlost pohybu v obou směrech. Pro přesné měření využijte kameru s vysokou rychlostí snímání.
2. Změřte sílu tahu dostupným siloměrem pro nejvyšší, střední a nejnižší rychlost pohybu v obou směrech.
3. Změřte charakteristiky řídicích signálů piezomotoru typu Piezowave pomocí osciloskopu pro nejvyšší, střední a nejnižší rychlost pohybu v obou směrech. Charakteristiky vynesete v grafech a popište je.
4. Využijte nabídky demo-kitu pro experimentální analýzu řídicí elektroniky.



6. ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá třemi konkrétními typy piezomotorů z hlediska jejich funkcí, provozních vlastností, parametrů, konstrukčního provedení a možnými aplikacemi v rychlostních a polohovacích systémech., se záměrem využití v procesu inovace výukového procesu. Pro sestavování laboratorních úloh jsou k dispozici funkční demo-kity Piezo LEGS v lineární / rotační verzi a Piezo WAVE s lineárním pohybem.

V první části je popisován každý druh jednotlivě. Jsou zde také uvedeny průběhy signálů a konstrukční provedení dané výrobcem.

Druhá část je věnována samotnému měření věch tří druhů piezomotorů. Zatímco u Piezo LEGS motorů jsme měřili rychlosti pohybu/otáčení, velikosti řídicích proudů a statickou sílu, u Piezo WAVE došlo z technických příčin pouze k měření charakteristik řídicích signálů. Z důvodu náročnosti měření, dostupnosti speciálních měřících zařízení a v neposlední řadě také ke kontinuitě sledování této problematiky na ústavu, byly některé naměřené hodnoty částečně převzaty z dřívějších prací realizovaných v rámci pedagogického procesu. [6]

Další část zmiňuje využití piezomotorů v praxi. Jsou zde uvedena různá odvětví, kde se můžeme s využitím piezomotorů setkat.

Závěrečná část obsahuje zadání laboratorních úloh pro všechny tři zmiňované typy piezomotorů. Zadání vychází, mimo jiné, z měření, které bylo provedeno v druhé části. Rozsah a členitost zadání úloh úzce souvisí s požadavky a možnostmi v daném konkrétním předmětu bakalářského nebo magisterského studia a proto požadavky zadání v bodě 3. (po dohodě s vedoucím práce) byly akceptovány v jednodušší formě. Respektování didaktických a bezpečnostních pravidel je v podstatě obsaženo v jednotlivých částech řešení této práce a konečnou podobu získají při realizaci předmětových modifikací.

Za velice zajímavé považuji experimentální ověření funkce lineárního motoru Piezo WAVE ve struktuře s komunikačním portem a PC (nebylo součástí zadání)..



LITERATURA

- [1] web PiezoMotor Uppsala AB - <http://www.piezomotor.com>
- [2] manuály a katalogy firmy Piezomotor Uppsala AB, 2005
- [3] HOLUB, O.; HURÁK, Z.; ŠPILLER, M. : Řízení piezoelektrických motorů pro polohování, Automa, 04/2007
- [4] ČERNÝ, J.: Piezoelektrické motory - regulace a řízení, Elektro, 01/2004
- [5] PEŘINA, M.: Elektrické pohony s piezomotory, semestrální projekt, vedoucí práce doc. Ing. Josef Kolářský CSc., VUT FEKT Brno 2008
- [6] ŠÍBL, O.: Elektrický pohon s piezomotorem, diplomová práce, vedoucí práce doc. Ing. Josef Kolářský CSc., VUT FEKT Brno, 2006
- [7] GRMELA, P.: Mikropohon s elektrickým piezomotorem, bakalářská práce, vedoucí práce doc. Ing. Josef Kolářský CSc., VUT FEKT Brno 2008
- [8] web Wikipedie - http://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectric_motor
- [9] ROBOTKA, J.: Řízení piezomotoru, bakalářská práce, vedoucí práce Ing. Tomáš Macho, Ph.D. VUT FEKT Brno, 2006
- [10] RYDLO, P.; RICHTER, A.: Piezoelektrické motory, Automa, 01/2005

