

## **Řízení krokového motorku**

Stepper Motor control

**Bc. Kamila DUDOVÁ**

Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Libor Štěpanec, Ph.D.

Ostrava, 2022

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroniky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Kamila Dudová**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2612T003 Aplikovaná elektronika

Téma: **Řízení krokového motoru  
Stepper Motor Control**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rozbor způsobů řízení krokového motoru.
2. Výběr vhodného systému řízení krokového motoru.
3. Navržení demonstračního stanoviště řízení krokového motoru dle konzultace s vedoucím práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

Weidauer, J., Messer R. Electrical Drives - Principles, Planning, Applications, Solutions, Publicis Publishing, Erlangen, 2014. ISBN: 978-3-89578-434-7

Neborák, I. Servopohony malých výkonů: Učební texty pro kombinované a distanční studium. VŠB-TU Ostrava.

Další literatura dle pokynů a konzultace s vedoucím bakalářské práce.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Libor Štěpanec, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 08.07.2022

---

prof. Ing. Petr Palacký, Ph.D.  
*vedoucí katedry*

---

prof. Ing. Jan Platoš, Ph.D.  
*děkan fakulty*

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala Ing. Liboru Štěpancovi, Ph.D. za odbornou pomoc a podporu při vytváření této diplomové práce.

Také chci poděkovat všem mým nejbližším za podporu a pomoc v případech, kdy bylo zapotřebí "3. ruky", např. při navíjení cívek apod.

## **Abstrakt**

Práce se zabývá možnostmi řízením krokového motorku. V první části je uvedeno základní dělení krokových motorků a přehled způsobů řízení krokových motorků. V druhé části je vybrán vhodný systém řízení krokového motorku a ve třetí části je proveden návrh demonstračního stanoviště řízení krokového motorku demonstrující princip fungování a řízení krokového motorku, jež má sloužit dále ve výuce.

## **Klíčová slova**

Krokový motorek, pasivní rotor, aktivní rotor, hybridní krokový motor, velikost kroku, plný krok, poloviční krok, mikrokrokování, řízení bipolární, řízení unipolární

## **Abstract**

This thesis deals with stepper motors and their control. In the first part there is presented basic classification of stepper motors and a summary of the ways of stepper motor control. In the second part there is made a choice of suitable system of stepper motor control. The main objective in this thesis is to design the demonstration workplace of stepper motor control which can be used in education and is presented in the third part of this thesis.

## **Key words**

Stepper motor, variable-reluctance stepper motors, permanent magnet stepper motors, hybrid stepper motors, step size, full step, half step, microstepping, bipolar stepper motor control, unipolar stepper motor control

# OBSAH

Seznam symbolů .....	7
Seznam zkratk .....	8
Seznam obrázků .....	9
Seznam tabulek.....	11
<b>ÚVOD.....</b>	<b>12</b>
<b>1 Rozbor způsobů řízení krokového motoru .....</b>	<b>13</b>
1.1 Vlastnosti krokových motorů .....	13
1.2 Dělení krokových motorů .....	15
1.2.1 Krokové motorky s pasivním rotorem.....	16
1.2.2 Krokové motorky s aktivním rotorem .....	17
1.2.3 Krokové motorky hybridní.....	17
1.3 Způsoby řízení krokových motorků .....	19
1.3.1 Unipolární řízení .....	19
1.3.2 Bipolární řízení.....	23
1.3.3 Mikrokrokování .....	25
1.3.4 Momentová charakteristika krokového motoru KM .....	26
1.3.5 Krokový pohon .....	28
<b>2 Výběr vhodného systému řízení krokového motoru.....</b>	<b>30</b>
2.1 Arduino UNO R3 .....	30
2.2 Motor Shield Rev 3 .....	32
<b>3 Navržení demonstračního stanoviště řízení krokového motoru .....</b>	<b>35</b>
3.1 Cívky .....	36
3.2 Držák cívek a kompasu .....	38
3.3 Desky plošných spojů .....	39
3.3.1 Deska plošných spojů STEPPER .....	39
3.3.2 Deska plošných spojů SHIELD.....	42

<b>4 Výsledky měření a experimentování .....</b>	<b>46</b>
4.1 Průběh budicího pulzu cívky.....	47
4.2 Velikost časové konstanty cívek.....	49
4.2.1 Bipolární zapojení motoru.....	49
4.2.2 Unipolární zapojení motoru .....	50
4.3 Závislost proudu a napětí .....	51
4.4 Délka trvání smyčky programu jednotlivých režimů řízení.....	53
4.5 Výsledky měření na desce plošných spojů DPS_STEPPER.....	56
4.5.1 Bipolární zapojení motoru.....	56
4.5.2 Unipolární zapojení motoru - UNIPOLAR TOP .....	58
4.5.3 Unipolární zapojení motoru - UNIPOLAR BOT .....	60
4.6 Výsledky měření na desce plošných spojů DPS_SHIELD .....	62
4.6.1 Bipolární zapojení motoru.....	62
4.6.2 Unipolární zapojení motoru - Unipolar-TOP .....	64
4.6.3 Unipolární zapojení motoru - Unipolar-BOT .....	66
4.7 Uzavření magnetického obvodu .....	68
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>70</b>
<b>Použité zdroje .....</b>	<b>72</b>
<b>PŘÍLOHY</b>	

## Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam symbolu
$\alpha$	(°)	velikost kroku
$\Delta\Phi$	(-)	velikost kroku
$\tau$	(s)	časová konstanta (LR obvodu)
$f$	(Hz)	frekvence
$I$	(A)	elektrický proud
$I_R$	(A)	ustálená hodnota proudu
$i_\tau$	(A)	okamžitá hodnota proudu v čase odpovídající hodnotě časové konstanty
$M$	(Nm)	moment motoru
$m$	(-)	počet fází vinutí statoru
$N$	(-)	počet zubů rotoru
$n$	(-)	počet mikrokroků
$R$	( $\Omega$ )	elektrický odpor
$R_{DC}$	( $\Omega$ )	sériový odpor cívky
$t$	(s)	čas
$T$	(s)	perioda
$U$	(V)	elektrické napětí

## Seznam zkratek

Zkratka	Význam
BIPOLAR	bipolární zapojení motoru
CLK	hodinový signál (clock)
FULL (STEP) 1 F	plný krok s napájením jedné fáze
FULL (STEP) 2 F	plný krok s napájením dvou fází
GND	zem (ground)
HALF (HALF STEP)	poloviční krok
KM	krokový motor
LED	světlo vyzařující dioda (Light emitting diode)
MIKROSTEP (MIKROSTEPPING)	mikrokrokování
PC	osobní počítač (Personal computer)
PM	permanentní magnet (Permanent magnet)
PWM	pulzně šířková modulace (Pulse width modulation)
SW	software
TP	měřicí bod (Test point)
UNIPOLAR-BOT	unipolární zapojení motoru, kdy vyvedené středy vinutí jsou připojeny na zem
UNIPOLAR-TOP	unipolární zapojení motoru, kdy středy vinutí jsou připojeny na napájecí napětí motoru (VMOT)
USB	univerzální sériová linka (Universal serial bus)
VMOT	napájecí napětí motoru
VR	proměnná magnetická vodivost/odpor (Variable reluctance)



## Seznam obrázků

Obrázek 1 Čtyřfázový reluktanční krokový motor.....	16
Obrázek 2 Magnetický obvod krokového motoru s aktivním rotorem .....	17
Obrázek 3 Stavba hybridního krokového motoru .....	18
Obrázek 4 Magnetický obvod čtyřfázového krokového motorku s pasivním rotorem v řezu .....	19
Obrázek 5 Schéma unipolárního řízení.....	19
Obrázek 6 Průběh statické momentové charakteristiky s magnetizací dvou fází.....	21
Obrázek 7 Čtyřfázový krokový motor s čtyřtaktním řízením s magnetizací dvou fází.....	21
Obrázek 8 Princip bipolárního řízení .....	23
Obrázek 9 Princip mikrokrokování .....	25
Obrázek 10 Průběh proudu při mikrokrokování.....	26
Obrázek 11 Momentová charakteristika krokového motorku .....	27
Obrázek 12 Reálná momentová charakteristika KM v semilogaritmických souřadnicích.....	27
Obrázek 13 Blokové schéma krokového pohonu.....	28
Obrázek 14 Zapojení 1 fáze výkonového spínacího zesilovače pro KM s pasivním rotorem .....	28
Obrázek 15 Schéma výkonového spínacího zesilovače pro KM s aktivním rotorem .....	29
Obrázek 16 Topologie desky Arduino UNO R3 při pohledu shora .....	30
Obrázek 17 Arduino R3 - rozložení a zapojení pinů .....	31
Obrázek 18 Blokové schéma integrovaného obvodu L298 se dvěma H-můstky .....	32
Obrázek 19 Příklad ovládání duálního H-můstku L298 .....	33
Obrázek 20 Arduino Motor shield s připojenými kabely .....	34
Obrázek 21 Blokové schéma navrženého stanoviště.....	35
Obrázek 22 Demonstrace principu navíjení a měření počtu navinutých závitů cívek .....	36
Obrázek 23 Navinuté cívky z měděného drátu .....	36
Obrázek 24 Součásti nosné konstrukce cívek a kompasu navržené v SW Inventor.....	39
Obrázek 25 Elektrické schéma desky DPS_STEPPER.....	40
Obrázek 26 Rentgenový pohled na spoje obou vrstev desky DPS_STEPPER .....	40
Obrázek 27 Osazovací plán desky DPS_STEPPER.....	41
Obrázek 28 Osazená deska DPS_STEPPER ve výsledném provedení stanoviště .....	41
Obrázek 29 Elektrické schéma navržené desky DPS_SHIELD .....	43
Obrázek 30 Deska plošných spojů DPS_SHIELD v "rentgenovém pohledu" vrstev TOP i BOTTOM.....	43
Obrázek 31 Osazovací plán desky DPS_SHIELD .....	44
Obrázek 32 Osazená deska DPS_SHIELD .....	44
Obrázek 33 Propojení obou desek DPS_SHIELD a DPS_STEPPER.....	45
Obrázek 34 Průběh budicího pulzu cívek při bipolárním zapojení motoru.....	47
Obrázek 35 Průběh budicího pulzu cívky při unipolárním zapojení motoru.....	48
Obrázek 36 Průběh okamžité hodnoty proudu při přechodném ději LR obvodu .....	49
Obrázek 37 Detail měření časové konstanty při unipolárním zapojení motoru .....	50
Obrázek 38 Graf závislosti mezi napětím a "proudem" při bipolárním zapojení motoru.....	52
Obrázek 39 Graf závislosti mezi napětím a "proudem" při unipolárním zapojení motoru.....	52
Obrázek 40 Délka trvání smyčky programu pro plný krok s napájením jedné fáze .....	54

Obrázek 41 Délka trvání smyčky programu pro plný krok s napájením dvou fází .....	55
Obrázek 42 Délka trvání smyčky programu pro poloviční krok .....	55
Obrázek 43 Délka trvání smyčky programu u mikrokrokování .....	55
Obrázek 44 Bipolární zapojení motoru - plný krok s napájením 1 fáze.....	57
Obrázek 45 Bipolární zapojení motoru - plný krok s napájením 2 fází.....	57
Obrázek 46-a Bipolární zapojení motoru - poloviční krok.....	58
Obrázek 46-b Bipolární zapojení motoru - poloviční krok (normální režimu osciloskopu).....	58
Obrázek 47 Bipolární zapojení motoru - mikrokrokování .....	59
Obrázek 48 Unipolární zapojení motoru (UNIPOLAR-TOP) - plný krok s napájením 1 fáze.....	59
Obrázek 49 Unipolární zapojení motoru (UNIPOLAR-TOP) - plný krok s napájením 2 fází.....	60
Obrázek 50 Unipolární zapojení motoru (UNIPOLAR-TOP) - poloviční krok .....	60
Obrázek 51 Unipolární zapojení motoru (UNIPOLAR-TOP) - mikrokrokování (n = 4 mikrokroky).....	60
Obrázek 52 Unipolární zapojení motoru (UNIPOLAR-TOP) - mikrokrokování (normální režim).....	61
Obrázek 53 Unipolární zapojení motoru (UNIPOLAR-BOT) - plný krok s napájením 1 fáze.....	61
Obrázek 54 Unipolární zapojení motoru (UNIPOLAR-BOT) - plný krok s napájením 2 fází.....	62
Obrázek 55 Unipolární zapojení motoru (UNIPOLAR-BOT) - poloviční krok .....	62
Obrázek 56 Unipolární zapojení motoru (UNIPOLAR-BOT) - mikrokrokování (n = 4) .....	62
Obrázek 57 Unipolární zapojení motoru (UNIPOLAR-BOT) - mikrokrokování (n = 4), normální režim..	63
Obrázek 58 Bipolární zapojení motoru - plný krok s magnetizací 1 fáze .....	63
Obrázek 59 Bipolární zapojení motoru - plný krok s magnetizací 2 fází .....	64
Obrázek 60 Bipolární zapojení motoru - poloviční krok.....	64
Obrázek 61 Bipolární zapojení motoru- mikrokrokování (n = 10).....	64
Obrázek 62 Bipolární zapojení motoru - mikrokrokování (n = 10) - normální režim osciloskopu .....	65
Obrázek 63 Unipolární zapojení motoru (Unipolar-TOP) - plný krok s magnetizací 1 fáze.....	65
Obrázek 64 Unipolární zapojení motoru (Unipolar-TOP) - plný krok s magnetizací 2 fází.....	65
Obrázek 65 Unipolární zapojení motoru (Unipolar-TOP) - poloviční krok .....	66
Obrázek 66 Unipolární zapojení motoru (Unipolar-TOP) - mikrokrokování (n = 10) .....	66
Obrázek 67 Unipolární zapojení motoru (Unipolar-TOP) - mikrokrokování (n = 10) - normální režim.	66
Obrázek 68 Unipolární zapojení motoru (Unipolar-BOT) - plný krok s magnetizací 1 fáze.....	67
Obrázek 69 Unipolární zapojení motoru (Unipolar-BOT)- plný krok s magnetizací 2 fází.....	67
Obrázek 70 Unipolární zapojení motoru (Unipolar-BOT) - poloviční krok .....	67
Obrázek 71 Unipolární zapojení motoru (Unipolar-BOT) - mikrokrokování (n = 10) .....	68
Obrázek 72 Unipolární zapojení motoru (Unipolar-BOT) - mikrokrokování (n = 10) - normální režim.	68
Obrázek 73 Unipolárním zapojení motoru (Unipolar-BOT) - signály BRAKEA, BRAKEB.....	68
Obrázek 74 Uzavření magnetického obvodu magneticky vodivým materiálem ze závitové tyče .....	69
Obrázek 75 Paralelní zapojení cívek na pólech .....	70

## Seznam tabulek

Tabulka 1	Přehled spínání fází při unipolárním čtyřtaktním řízení s magnetizací jedné fáze .....	20
Tabulka 2	Spínání fází při unipolárním čtyřtaktním řízení s magnetizací dvou fází .....	22
Tabulka 3	Přehled spínání fází při unipolárním čtyřtaktním řízení s magnetizací 1 nebo 2 fází .....	22
Tabulka 4	Přehled spínání fází při bipolárním čtyřtaktním řízení s magnetizací 1 fáze .....	23
Tabulka 5	Čtyřfázový KM s pasivním rotorem - algoritmus spínání při bipolárním čtyřtaktním řízení s magnetizací dvou fází .....	24
Tabulka 6	Přehled spínání fází při bipolárním čtyřtaktním řízení s magnetizací 1 nebo fází .....	24
Tabulka 7	Přehled velikostí proudů jednotlivými fázemi při mikrokrokování.....	27
Tabulka 8	Popis topologie desky Arduino R3 uvedené na obrázku 16 .....	31
Tabulka 9	Pravdivostní tabulka logického hradla XNOR v Motor Shieldu.....	34
Tabulka 10	Výsledky měření odporu odporu Naměřené hodnoty navinutých cívek.....	38
Tabulka 11	Režimy bipolárního řízení spouštěné pomocí tlačítek na DPS_SHIELD .....	42
Tabulka 12	Naměřené střední hodnoty napětí a "proudu" při mikrokrokování.....	51
Tabulka 13	Výsledky měření doby trvání smyčky programu.....	55

## ÚVOD

Práce je zaměřena na řízení krokových motorků. Krokové motory jsou v podstatě bezúdržbové synchronní motorky malých výkonů, které převádí digitální signál na mechanický pohyb - úhel natočení. Jsou velmi rozšířené v oblasti řídicí a regulační techniky. V podstatě se jedná o nejjednodušší akční člen převádějící digitální signál na polohu (úhel natočení rotoru). Jsou jednoduché na ovládání. V běžném provozu je řízení prováděno v otevřené smyčce.

První kapitola práce se zabývá teorií krokových motorků. Je popsán princip fungování, dělení krokových motorků a jejich hlavní typy - motory s pasivním rotorem, aktivním rotorem a hybridní motory. Následně jsou popsány způsoby řízení - unipolární, bipolární, jednofázové, dvoufázové, řízení s plným a s polovičním krokem, mikrokrokování a rovněž jsou popsány momentové charakteristiky krokového motorku.

Cílem práce, jímž se zabývá praktická část, je navržení demonstračního pracoviště krokového motorku, jež by demonstrovalo princip fungování a řízení krokového motorku. Sofistikované způsoby řízení krokových motorků nejsou předmětem této práce - ty již byly zpracovány v dřívějších bakalářských a diplomových pracích. Demonstrační stanoviště je navrženo pro demonstraci bipolárního způsobu řízení s využitím platformy Arduino.

# 1 Rozbor způsobů řízení krokového motoru

## 1.1 Vlastnosti krokových motorů

Krokové motory jsou modifikací synchronního stroje. Řadí se mezi servomotory, tj. motory menších výkonů, určené k regulaci zejména polohy. Rozsah výkonů je v oblasti desetin až stovek wattů. Jsou označovány jako tzv. dvojité vyniklé stroje, které mají zuby jak na statoru, tak na rotoru. Vinutí krokových motorů je napájeno pulzně. Ke své obsluze vyžadují elektronické zařízení - ovladač. [1, 2, 3, 4, 5]

Jejich pohyb je nespojitý - krokový. Obvykle je definován počet kroků na otáčku. Při zvyšování frekvence digitálních pulsů se krokový pohyb mění v kontinuální otáčení přímo úměrné frekvenci řídicích pulsů. [5]

Krokový motor přeměňuje elektrické impulsy na mechanický pohyb, a to tak, že každý elektrický impuls způsobí rotaci motoru o určitý přesně definovaný diskrétní úhel - tzv. krok. [2, 5] Je to v podstatě nejjednodušší akční člen, který převádí digitální signál na polohu (úhel natočení) rotoru. [6]. Je standardně provozován se stejnosměrným napětím, ale jak zmiňuje Tan Kiong, je možný i provoz se střídavým napětím. [2]

Krokové pohony jsou čtyř-kvadrantové pohony. Mohou zrychlovat i brzdít v obou směrech rotace. Poskytují moment až do 5 Nm. [1]

Princip fungování krokového motoru je jednoduchý a je založen na proudu procházejícím cívkou statoru, čímž je vytvářeno magnetické pole, které přitáhne opačný pól magnetu rotoru (nebo nejbližší zub rotoru pracujícího na reluktančním principu). Postupným zapojováním cívek statoru je vytvořeno "rotující" magnetické pole, které otáčí rotorem. Podle aktuálních požadavků (velikost kroutícího momentu, přesnost nastavení polohy, odběr proudu) je vybrán vhodný styl řízení. [7, 8]

Hlavní výhodou krokového motoru je provoz v otevřené smyčce. Nemají tedy v běžném provozu zpětnovazební řízení proudu, rychlosti, ani polohy. Z tohoto důvodu však nejsou tak dynamické ani odolné vůči poruše (jako stejnosměrné nebo elektronicky komutované stroje se zpětnou vazbou). Nesmí být proto příliš zrychlovány ani přetěžovány, jinak může dojít k zastavení nebo ke ztrátě kroku (k čemuž dochází zejména při velkých rychlostech), kdy pak nejsme schopni určit jeho polohu. Z těchto důvodů některé aplikace dodatečně monitorují polohu užitím enkodéru. [1] Přesto je provoz při běžném režimu v otevřené smyčce bez nutnosti užití nákladných snímačů otáček a polohy jejich velkou předností. Jsou tím jednodušší a z tohoto hlediska i provozně spolehlivější a levnější. Stěžejní podmínkou jejich správné funkce je proto jejich správné dimenzování ve všech provozních režimech. Při správném dimenzování a dostatečném momentu motoru je pak rotační rychlost krokového motoru nezávislá na zátěži.

Chyba kroku bývá menší než 5 % a nedochází k jejímu nárůstu s počtem kroků - není tedy kumulativní. Se zmenšením velikosti kroku dochází k růstu přesnosti, s jakou rotor zaujímá svoji polohu [2]

Vinutí je umístěno na statoru motoru, rotor nemá žádné elektrické vinutí. Motory jsou tedy bezúdržbové a mají vysokou životnost, která je dána životností ložiska. Jelikož jsou motory bezkartáčové, nedochází ke vzniku jisker a mohou být použity i v rizikovějším prostředí. [1]

Další výhodou krokového motoru je, že umožňuje kompatibilitu s digitálními systémy bez nutnosti použití digitálně analogových převodníků, má široký rozsah velikosti kroku v rozmezí několika desetin stupně až 90°, umožňuje provoz při malých rychlostech bez nutnosti použití převodovky a má nízký budicí proud. [2]

Mezi jeho nevýhody patří malá účinnost, velká citlivost na nesouosost zátěže a pohonu [2] Možnosti krokového motoru mají své limity díky existenci přechodných magnetických jevů. Maximální rychlost otáčení je omezena na několik stovek kroků za sekundu (dle typu motoru a zatížení). Po jejím překročení (nebo při příliš velké zátěži) dochází ke ztrátě kroku. [7] Ztráta kroku může také s velkou pravděpodobností nastat při nepředpokládaných, ale v praxi se vyskytujících, momentových přetíženích. Nevýhodou je také jejich větší hlučnost způsobená jejich diskrétním pohybem. a zmíněné horší dynamické vlastnosti, kdy při změně rovnovážné polohy dochází ke vzniku tlumených kmitů. [5]

Jelikož se KM používají v oblastech, kde je třeba řídit nejen otáčky, ale i polohu, nachází své uplatnění v přesné mechanice, řídicí a regulační technice, v robotice jako pohony průmyslových robotů a manipulátorů, v letectví [8] ve strojírenství pro číslicové řízení strojů (NC - *numerical control* - numerické řízení obráběcích strojů) [9] jako polohovací mechanismy pro tiskárny, frézky, plottery, menších CNC strojích (např. 3D tiskárnách) nebo v ručkových ukazatelích na přístrojové desce automobilu. [8] Z krokového motorku lze rovněž vyrobit pohon pro pohyb vteřinové ručičky. [9]

Krokové motorky jsou také využívány v lékařství v oblasti zdravotní techniky, například jako chirurgické nástroje a chirurgické roboty (např. při laparoskopických operacích), masážní přístroje nebo endoskopické kapsle, které pomáhají lékařům vyhodnotit stav tenkého střeva, kdy při průchodu kapsle trávicím traktem krokový motor s krokovým úhlem 7,5° otáčí kamerou a umožňuje pořizovat snímky ze všech úhlů (kapslí je pořízeno cca 870 000 snímků za 8 hodin). Dalším využitím jsou terapeutická zařízení jako např. CMP - *Continuous Passive Motion* - terapie pomocí motodlahy, která umožňuje v rámci léčebné rehabilitace plynulou pasivní pohybovou léčbu kloubů končetin za použití motorové dlahy, která zajišťuje anatomicky správný pohyb končetin, plynulé nastavení rychlosti i maximální rozsah pohybu dané končetiny. Pomáhá tak předcházet poškození tkání v důsledku imobilizace a umožňuje včasné obnovení pohybu kloubů a urychlení a zlepšení výsledku terapie. [10]

Používají se také pro kalibraci rychlosti a délky pohybu pístů spirometrů. Spirometry jsou přístroje užívající se k diagnostice poruch dýchacího soustavy a zdravotního stavu vrcholových sportovců určováním vitální kapacity plic. [11]

Krokový motorek je užíván také k řízení injekčních dávkovačů, jež slouží k přesnému dávkování léčiv dodávaných ve speciálních plastových injekčních stříkačkách, jež jsou součástí čerpacího mechanismu. Infuzní dávkovače jsou nezastupitelným pomocníkem např. na jednotkách intenzivní péče. [12]

## 1.2 Dělení krokových motorů

Krokové motorky lze dělit podle řady kritérií. Nejvýznamnější je dělení dle principu (viz níže), od kterého se pak odvíjí i způsob řízení a vlastnosti pohonu.

Dle počtu fází jsou rozlišovány:

- dvoufázové
- čtyřfázové
- trojfázové
- N-fázové

Nejčastěji jsou používány dvoufázové a čtyřfázové krokové motorky.

Dle počtu kroků na jednu periodu přiváděných řídicích impulsů jsou rozlišovány:

- 4-taktní
- 8-taktní
- N-taktní [6]

Dle konstrukce:

- rotační
- lineární - nerealizuje rotační pohyb, ale pohyb lineární - tj. pohyb v jedné ose
- planární - umožňuje téměř plynulý pohyb ve dvou osách (x, y)
- tubulární - zuby akční i reakční části jsou provedeny ve tvaru zápchů (v rovině kolmé na osu motoru) do vnějšího, resp. vnitřního povrchu magnetického obvodu a to tak, že vnější zuby reakční části i vnitřní zuby akční části jsou tvořeny jedno- nebo vícechodou šroubovicí. Stoupání šroubovice odpovídá celistvému násobku zubové rozteče. [3]

Dle počtu fází, které jsou současně buzeny:

- magnetizace jedné fáze (proud je přiváděn jen do jedné fáze) - tzv. jednofázové řízení - magnetické pole je generováno pouze jednou cívkou, případně dvojicí protilehlých cívek při bipolárním řízení
- magnetizace dvou fází (proud je přiváděn současně do dvou fází) - dvoufázové řízení - shodně orientované magnetické pole generují dvě sousední cívky [6, 8]

#### Dle počtu kroků na otáčku:

- řízení s plným krokem - na jednu otáčku rotoru připadá přesně tolik kroků, kolik je zubů na statoru daného motoru
- řízení s polovičním krokem - vzhledem k tomu, že velikost kroku je poloviční, připadá na jednu otáčku rotoru dvojnásobné množství kroků - dosáhneme tím dvojnásobné přesnosti a získáme ho střídáním kroků s magnetizací jedné (jednofázové řízení) a dvou fází (dvoufázové řízení) [6, 8]

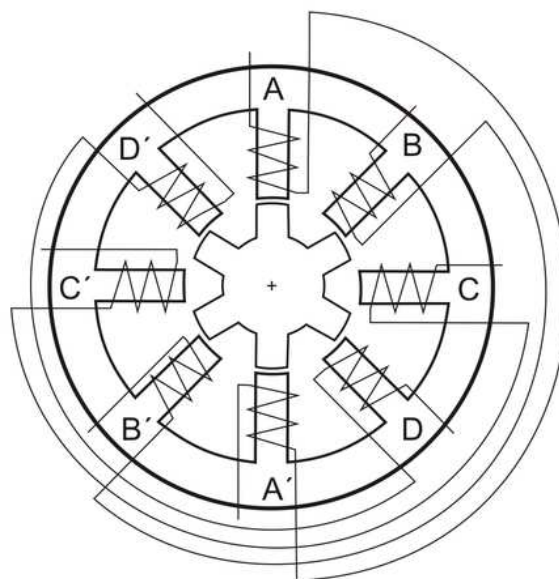
#### Dle způsobu napájení fázových vinutí je rozlišováno:

- Unipolární napájení vinutí, při kterém je na vinutí přiváděn proud pouze jedné polarity. Je používáno u motorů s pasivním rotorem (reakčních, reluktančních).
- Bipolární napájení vinutí, při kterém může být přiveden na vinutí proud obou polarit a je používáno u motorů s aktivním rotorem (permanentním magnetem). [6]

### **1.2.1 Krokové motorky s pasivním rotorem**

Krokové motorky s pasivním rotorem, které mají vyjádřené póly na statoru i rotoru - využívají tak rozdílné magnetické reluktance v příčné a podélné ose. Podmínkou funkce je rozdílný počet pólů (zubů) na statoru a rotoru. Bývají označovány také jako reakční, reluktanční nebo s proměnnou reluktancí. [6] Bývají také označovány jako "VR" - variable reluctance motors - neboť minimální magnetický odpor vzniká při zákrytu buzených pólů statoru a zubů rotoru. Při odpojení napájení od statoru nevykazují žádný přídržný moment. [3]

Mívají poměrně velký krok. [1] Jsou konstrukčně jednoduché a mají malý moment setrvačnosti. Velikost kroku bývá  $1^\circ - 30^\circ$ , moment  $10^{-3} - 1$  Nm a provozní kmitočty řádově  $10^4$  Hz. Magnetický proud je tvořen výhradně proudy ve vinutí. Bývají realizovány jako v provedení na obrázku 1 nebo jako vícevrstvé, kde jsou stator i rotor rozděleny na více částí. Reluktanční motory mají menší moment setrvačnosti než krokové motory s permanentními magnety a jsou také rychlejší. [5, 9]



Obrázek 1 Čtyřfázový reluktanční krokový motor [5]

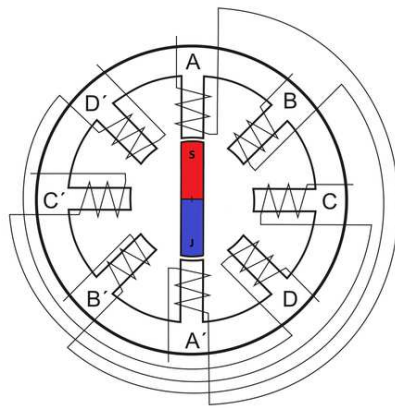


### 1.2.2 Krokové motorky s aktivním rotorem

Aktivní rotor je tvořen permanentním magnetem (viz obrázek 2). Magnetický obvod je buzen ze dvou zdrojů - z permanentních magnetů a z budících cívek. [9]

Tyto motory vytváří tzv. klidový moment, i když motor není napájen. Klidový moment je tvořen permanentními magnety a zvyšuje sílu, která je zapotřebí pro pootočení rotoru ve chvíli, kdy motor není napájen - má velký klidový moment a dobře drží polohu. [5]

Opět je nutnou podmínkou funkce rozdílný počet pólů na statoru a rotoru. Dle uspořádání pólů magnetu jsou rozlišovány motorky s radiálně polarizovaným nebo s axiálně polarizovaným permanentním magnetem. [6] Mívají velikost kroku  $10^\circ$ -  $45^\circ$ , moment  $10^{-3}$  - 1 Nm. Provozní kmitočty bývají řádově  $10^3$  Hz. Jsou menší a lehčí, ale mají horší dynamické vlastnosti. [9]

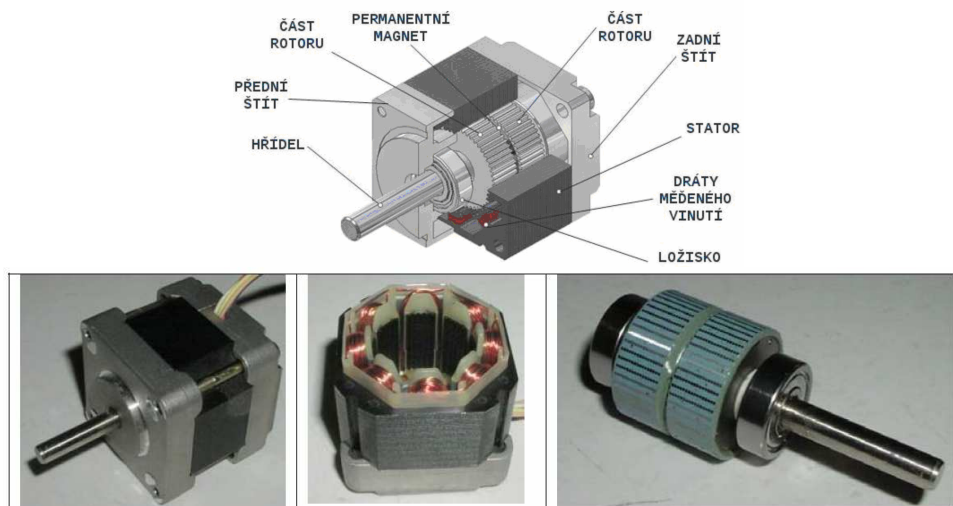


Obrázek 2 Magnetický obvod krokového motoru s aktivním rotorem [8]

### 1.2.3 Krokové motorky hybridní

Hybridní krokové motorky (viz obrázek 3) vznikly sloučením konstrukčních principů krokových motorů s pasivním a s aktivním rotorem. Hlavním zdrojem magnetického toku je permanentní magnet a proudy ve statorových vinutích směřují jejich tok do alternativních cest, čímž je vyvoláno natáčení. [6, 5]

Mají malý základní krok, větší točivý moment a větší moment přídržný. V praxi jsou velmi rozšířené. Ve spojení s moderní elektronikou poskytují krok  $0,1$ - $1^\circ$ , moment  $10^{-2}$ - $10$  Nm, provozní kmitočty řádově  $10^4$  Hz. [3, 9]



Obrázek 3 Stavba hybridního krokového motoru [8]

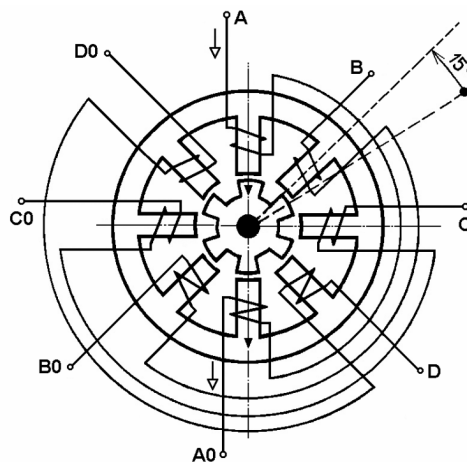
Rotor je tvořen hřídelí z nemagnetické oceli usazené na kuličkových ložiscích s axiálně orientovaným (polarizovaným) permanentním magnetem, na jehož koncích jsou nalisovány dva feromagnetické pólové nástavce (složené z plechů), které tak mají každý jinou polaritu (severní a jižní pólový nástavec). Těmto motorům se také říká "krokové motory s aktivním rotorem s axiálně polarizovaným permanentním magnetem". Jak severní, tak jižní pólový nástavec jsou rozděleny např. na 50 zubů stejné šířky jako zuby statorové a jsou vzájemně pootočený o polovinu rotorové zubové rozteče, takže proti osám zubů jednoho pólového nástavce jsou osy drážek druhého pólového nástavce. [8] Všeobecně jsou pólové nástavce statoru vroubkovány se stejnou roztečí, jako je rozteč pólových nástavců permanentního magnetu na rotoru. [5]

## 1.3 Způsoby řízení krokových motorků

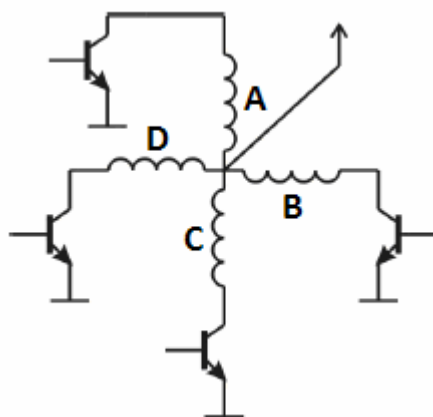
Rozeznáváme dva základní způsoby řízení KM - a to bipolární a unipolární.

### 1.3.1 Unipolární řízení

U unipolárního napájení, kdy je na statorová vinutí přiváděn proud pouze jedné polarity, je používáno u krokových motorů s pasivním rotorem, např. čtyřfázový krokový motor s pasivním rotorem (viz obrázek 4). [6, 7, 8, 14] Princip unipolárního řízení je znázorněn na obrázku 5.



Obrázek 4 Magnetický obvod čtyřfázového krokového motorku s pasivním rotorem v řezu [8]



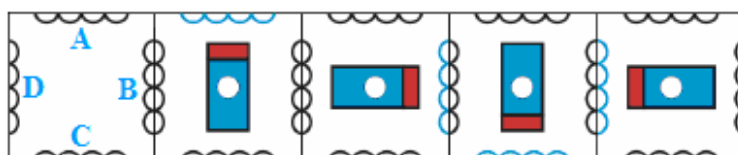
Obrázek 5 Schéma unipolárního řízení [7]

### 1.3.1.1 Unipolární řízení s magnetizací jedné fáze

Tento nejjednodušší způsob řízení krokových motorků lze použít pro 4-fázový reakční (s pasivním motorem) krokový motor, ale také případně i pro 2-fázový hybridní krokový motor v zapojení fází pro unipolární buzení. [8] Rotor a rotorové zuby jsou bez vinutí. Fáze statorových vinutí jsou připojeny na výstupy ovladače, který řídí přes spínací prvky buzení jednotlivých fází statorových vinutí dle určitého algoritmu odpovídající požadovanému způsobu řízení. Fáze statorových vinutí jsou buzeny protékajícím budičím stejnosměrným proudem.

V tabulce 1 je zobrazeno spínání fází při unipolárním čtyřtaktním řízení s magnetizací jedné fáze na zjednodušeném modelu motoru se čtyřmi kroky na otáčku. Černě je zobrazena cívka bez proudu, modře - cívka s proudem. [7] V tabulkách 1 až 3 pro unipolární řízení by měl být optimálně zobrazen pasivní rotor na němž by nebyly rozlišeny magnetické póly, avšak takto je to uvedeno a převzato z citovaného zdroje. Princip unipolárního řízení, kdy je buzena právě jen jedna cívka, je však i tak patrný.

Tabulka 1 Spínání fází při unipolárním čtyřtaktním řízení s magnetizací jedné fáze [7]



Cívka A	1	0	0	0
Cívka B	0	1	0	0
Cívka C	0	0	1	0
Cívka D	0	0	0	1

Velikost kroku lze vypočítat dle vztahu:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{m \cdot N}, \quad (1)$$

kde  $m$  je počet fází vinutí statoru a  $N$  je počet zubů rotoru. Pro krokový motor uvedený na obrázku 17 je počet fází vinutí statoru  $m = 4$  a počet zubů rotoru  $N = 6$ . Motor má 24 kroků na otáčku a velikost kroku pak bude:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{m \cdot N} = \frac{360^\circ}{4 \cdot 6} = 15^\circ.$$

Ze vztahu (1) plyne, že zvětšení počtu kroků může být dosaženo zvětšením počtu fází vinutí statoru  $m$  nebo zvětšením počtu zubů rotoru  $N$ .

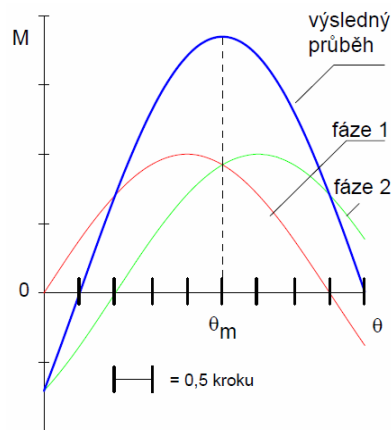
Změny kroků neprobíhají náhlou skokovou změnou, ale mají svůj přechodný průběh s překmitem a postupným ustálením se v čase, jež závisí na momentu setrvačnosti poháněného zařízení.

### 1.3.1.2 Unipolární řízení s magnetizací dvou fází

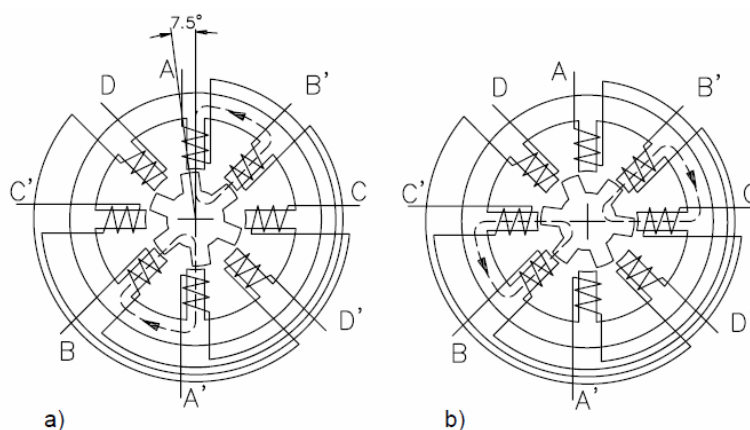
#### Unipolární čtyřtaktní řízení s magnetizací dvou fází

Při unipolárním čtyřtaktním řízení s magnetizací dvou fází (viz obrázek 7) jsou, na rozdíl od předchozího případu, současně spínány vždy dvě sousední fáze, což má za následek, že rovnovážná poloha rotoru se ustálí přesně uprostřed mezi fázemi, které jsou buzeny a rovnovážná poloha je tak vychýlena oproti způsobu řízení s magnetizací jedné fáze o polovinu kroku.

Vzhledem k tomu, že jsou buzeny dvě fáze současně, dochází tím ke dvojnásobnému zvyšování odběru proudu (a tím i k většímu oteplení motoru), ale také ke (asi dvojnásobnému) zvýšení statického momentu, který drží motor v klidové poloze (viz obrázek 6, kde jsou zakresleny i uzavřené magnetické toky a jejich směry). Při tomto řízení závisí na polaritě napájení jednotlivých fázových vinutí a na směru generovaného magnetického toku, což je zajištěno konstrukčně - smyslem vinutí jednotlivých fází. Díky větší strmosti momentové charakteristiky je dosaženo většího tlumící účinku mechanických oscilací rotoru při krokování, což následně umožní použití vyšších krokovacích frekvencí.



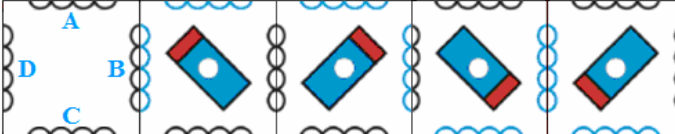
Obrázek 6 Průběh statické momentové charakteristiky s magnetizací dvou fází [8]



Obrázek 7 Čtyřfázový krokový motor s čtyřtaktním řízení s magnetizací dvou fází  
a) magnetizace fází AB; b) magnetizace fází BC [8]

V tabulce 2 je zobrazeno spínání fází při unipolárním čtyřtaktním řízení s magnetizací dvou fází na zjednodušeném modelu motoru se čtyřmi kroky na otáčku. Černě je zobrazena cívka bez proudu; modře - cívka s proudem). [7]

Tabulka 2 Spínání fází při unipolárním čtyřtaktním řízení s magnetizací dvou fází [7]



Cívka A	1	1	0	0
Cívka B	0	1	1	0
Cívka C	0	0	1	1
Cívka D	1	0	0	1

### 1.3.1.3 Unipolární s magnetizací jedné nebo dvou fází

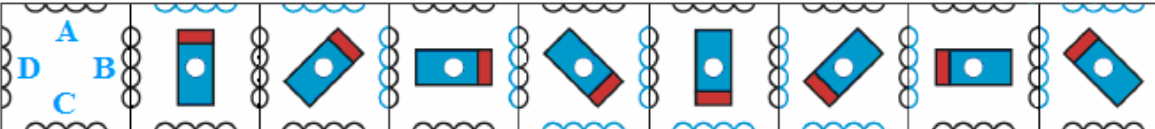
#### Unipolární osmi-taktní řízení s magnetizací jedné fáze nebo dvou fází

Při tomto způsobu řízení jsou kombinovány oba předchozí způsoby a dochází k postupnému střídání intervalů, kdy je buzena jen jedna fáze s intervaly, kdy jsou buzeny současně dvě fáze.

Nevýhodným jevem při střídání úseků s buzením jedné fáze a dvou fází však je, že se střídají úseky s různou velikostí maximálního momentu ve statické momentové charakteristice, který je odlišný při buzení jedné fáze a při buzení dvou fází. Dochází tak nevyhnutelně ke zvětšení zvlnění momentu (ve srovnání se čtyřtaktním řízením). Toto je možné odstranit, pokud v krocích, kdy jsou buzeny dvě fáze současně, budou tyto fáze napájeny nižším proudem. Následkem je také zvýšení hlučnosti motoru a výskyt dvou odlišných průběhů oscilací rotoru v čase se postupně střídajících, což nutno vzít v úvahu při návrhu pohonu a počítat s horšími parametry.

V tabulce 3 je zobrazeno spínání fází při unipolárním čtyřtaktním řízení s magnetizací jedné nebo dvou fází na zjednodušeném modelu motoru se čtyřmi kroky na otáčku. Černě je zobrazena cívka bez proudu, modře - cívka s proudem. [7]

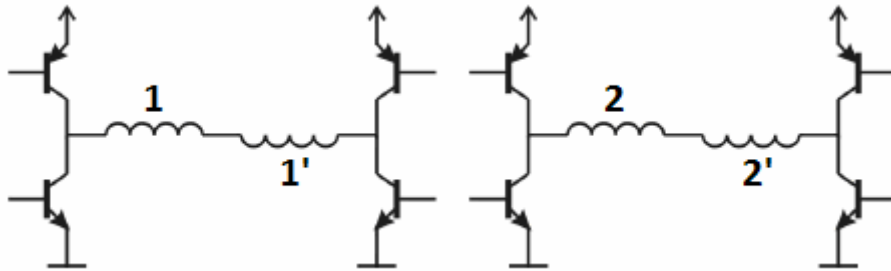
Tabulka 3 Přehled spínání fází při unipolárním čtyřtaktním řízení s magnetizací 1 nebo 2 fází [7]



Cívka A	1	1	0	0	0	0	0	0	1
Cívka B	0	1	1	1	0	0	0	0	0
Cívka C	0	0	0	1	1	1	0	0	0
Cívka D	0	0	0	0	0	1	1	1	1

### 1.3.2 Bipolární řízení

Jelikož bipolární napájení, kdy je na statorová vinutí přiváděn proud obou polarit, je používáno u krokových motorů s aktivním rotorem, je k popsání bipolárního řízení použit dvoufázový krokový motor s aktivním rotorem s radiálně polarizovaným permanentním magnetem (viz obrázek 8). [6, 7, 8, 14]



Obrázek 8 Princip bipolárního řízení [7, 8]

#### 1.3.2.1 Bipolární řízení s magnetizací jedné fáze

##### Bipolární čtyřtaktní řízení s magnetizací jedné fáze

K tomuto řízení lze použít např. dvoufázový krokový motor s aktivním rotorem s radiálně polarizovaným permanentním magnetem. V jednom časovém okamžiku, je buzena pouze jedna fáze.

Jak je názorně vidět v tabulce 4, kde černě je opět znázorněna cívka bez proudu, modře cívka s proudem a červeně cívka s proudem opačného směru. Při bipolárním jednofázovém (s magnetizací jedné fáze) řízení prochází proud v daný okamžik dvěmi protilehlými cívkami, které jsou zapojeny tak, že tvoří navzájem opačně orientované magnetické pole. Tímto způsobem řízení je dosaženo většího kroutícího momentu, ale při zvýšené spotřebě elektrické energie.

Tabulka 4 Přehled spínání fází při bipolárním čtyřtaktním řízení s magnetizací jedné fáze [7]

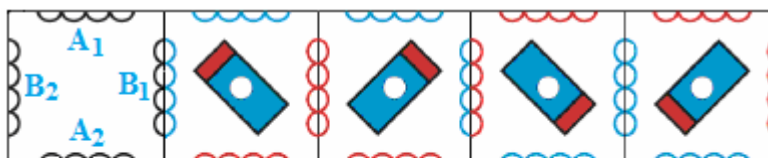
Cívka A <sub>1</sub>	1	0	1	0
Cívka B <sub>1</sub>	0	1	0	1
Cívka A <sub>2</sub>	1	0	1	0
Cívka B <sub>2</sub>	0	1	0	1

### 1.3.2.2 Bipolární řízení s magnetizací dvou fází

#### Bipolární čtyřtaktní řízení s magnetizací dvou fází

Algoritmus i princip bipolárního čtyřtaktního řízení s magnetizací dvou fází je obdobný jako u unipolárního řízení, kdy v jednom okamžiku jsou buzeny současně dvě fáze. Na rozdíl od unipolárního řízení zde však může být proud obou polarit (tedy i záporný).

Tabulka 5 Čtyřfázový KM s pasivním rotorem - algoritmus spínání při bipolárním čtyřtaktním řízení s magnetizací dvou fází [7]



Cívka A <sub>1</sub>	1	1	1	1
Cívka B <sub>1</sub>	1	1	1	1
Cívka A <sub>2</sub>	1	1	1	1
Cívka B <sub>2</sub>	1	1	1	1

Jak je názorně vidět v tabulce 5, je v prvním taktu (první sloupec tabulky 5) pod proudem cívk A<sub>1</sub> a B<sub>2</sub> (v tabulce znázorněno "1") přitahující červený konec rotoru a zároveň cívk B<sub>1</sub> a A<sub>2</sub>, jež tvoří opačně orientované magnetické pole (v tabulce označeno "1") přitahující modrý konec rotoru.

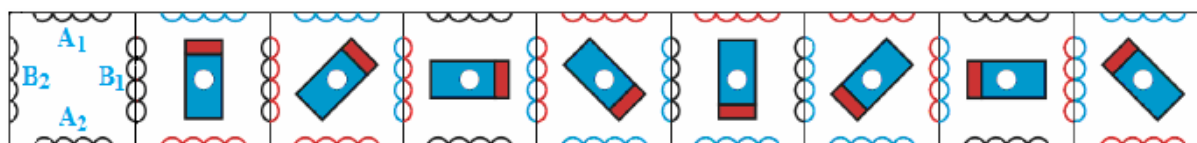
Při bipolárním dvoufázovém (s magnetizací dvou fází) řízení prochází proud v daný okamžik dvěma sousedními shodně orientovanými cívkami, které tvoří shodně orientované magnetické pole a dvěma protilehlými cívkami, jež tvoří k nim vzájemně opačně orientované magnetické pole, čímž je dosaženo ještě většího kroutícího momentu, ale za cenu dalšího nárůstu spotřeby elektrické energie.

### 1.3.2.3 Bipolární řízení s magnetizací jedné nebo dvou fází

#### Bipolární osmi-taktní řízení s magnetizací jedné nebo dvou fází

Algoritmus i princip bipolárního osmi-taktního řízení s magnetizací jedné nebo dvou fází je zachycen je obdobný jako u unipolárního řízení, kdy se střídají úseky buzení jedné fáze s úseky, kdy jsou buzeny současně dvě fáze. Na rozdíl od unipolárního řízení zde však může být proud obou polarit (tedy i záporné polarity) a průběh se tak lehce přibližuje sinusovému průběhu.

Tabulka 6 Přehled spínání fází při bipolárním čtyřtaktním řízení s magnetizací 1 nebo 2 fází [7]



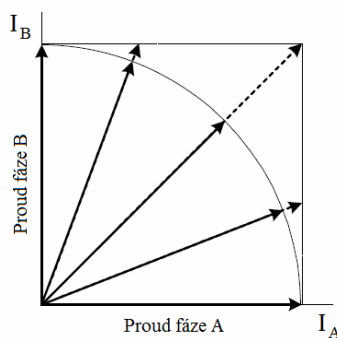
Cívka A <sub>1</sub>	1	1	0	1	1	1	0	1
Cívka B <sub>1</sub>	0	1	1	1	0	1	1	1
Cívka A <sub>2</sub>	1	1	0	1	1	1	0	1
Cívka B <sub>2</sub>	0	1	1	1	0	1	1	1



### 1.3.3 Mikrokrokování

Mikrokrokování je způsob řízení, který zvětšuje počet kroků na otáčku (v praxi 64 až 128 mikrokroků) a umožňuje tak jemnější rozlišení a nastavení polohy než je to, které nám umožňuje krok daný mechanickou konstrukcí krokového motoru. Velikost kroku je možno snížit až na zlomky stupně. Velice jemné rozlišení polohy je potřeba např. v tiskárnách, fototechnice, mikromechanice, robotice apod. Mikrokrokováním je kompenzováno tlumení mechanických rázů, obtížnost výroby rotoru s více jak 50 zuby a nevýhodnost použití více jak čtyř fází, jež by konstrukčně pomohly snížit velikost kroku.

Mikrokrokování docílíme postupným snižováním hodnoty budícího proudu v jedné fázi a zvyšováním hodnoty proudu v sousední fázi, čímž dosáhneme toho, že se výsledný vektor magnetické indukce bude pohybovat mezi krajními polohami, které odpovídají polohám vybuzení jednotlivých fází. (viz obrázek 9). [6, 8, 16]



Obrázek 9 Princip mikrokrokování [6, 8, 16]

V případě dvoufázového hybridního motoru je pro jeden plný krok motoru nutná rotace magnetického pole o  $90^\circ$  elektrických. Mění-li se moment motoru sinusově s polohou rotoru a mezní vazební moment je úměrný proudu fází, pak platí:

$$M_A = -k_T \cdot i_A \cdot \sin(N \cdot \Delta\Phi), \quad (2)$$

$$M_B = -k_T \cdot i_B \cdot \sin\left(N \cdot \Delta\Phi - \frac{\pi}{2}\right), \quad (3)$$

kde:  $k_T$ ... konstrukční konstanta motoru,  
 $i_A, i_B$  ... proudy fáze A, B.

Uvažujeme-li provoz s plnou délkou kroku, fáze vinutí statoru mohou být buzeny kladným nebo záporným proudem o velikosti  $I$  a výsledný vektor magnetického pole je při jednom kroku pootočen o úhel odpovídající jednomu kroku, zde tedy  $\varphi = 90^\circ$ . Při mikrokrokování je tento úhel rozdělen na  $n$  mikrokroků a pro velikost proudu v jednotlivých fázích pak platí vztahy:

$$i_A = I \cdot \cos\left(\frac{k \cdot \varphi}{n}\right) \quad (4)$$

$$i_B = I \cdot \cos\left(\frac{k \cdot \varphi}{n} - \frac{\pi}{2}\right) \quad (5)$$

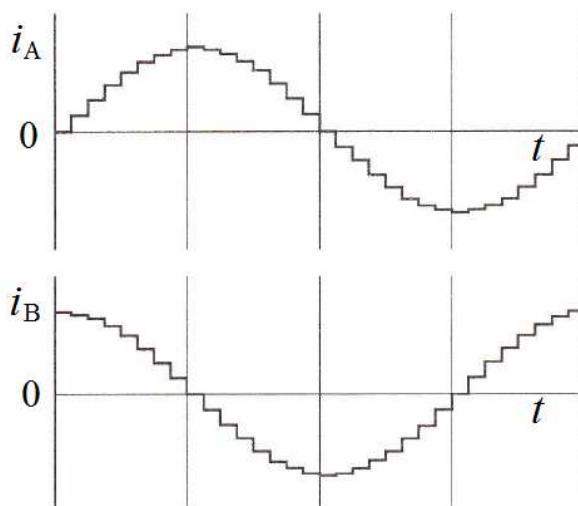
kde  $k = 0, 1, 2 \dots$

Budou-li požadovány 4 mikrokroky na 1 plný krok, pak hodnoty proudů ve fázích A a B jsou uvedeny v následující tabulce (viz tabulka 7).

Tabulka 7 Přehled velikostí proudů jednotlivými fázemi při mikrokrokování [6]

Mikrokrok číslo	Elektrický úhel	$i_A$ - proud fáze A	$i_B$ - proud fáze B
0	$0^\circ$	$I$	0
1	$22,5^\circ$	$0,924.i$	$0,383.i$
2	$45^\circ$	$0,707.i$	$0,707.i$
3	$67,5^\circ$	$0,383.i$	$0,924.i$
4	$90^\circ$	0	$I$

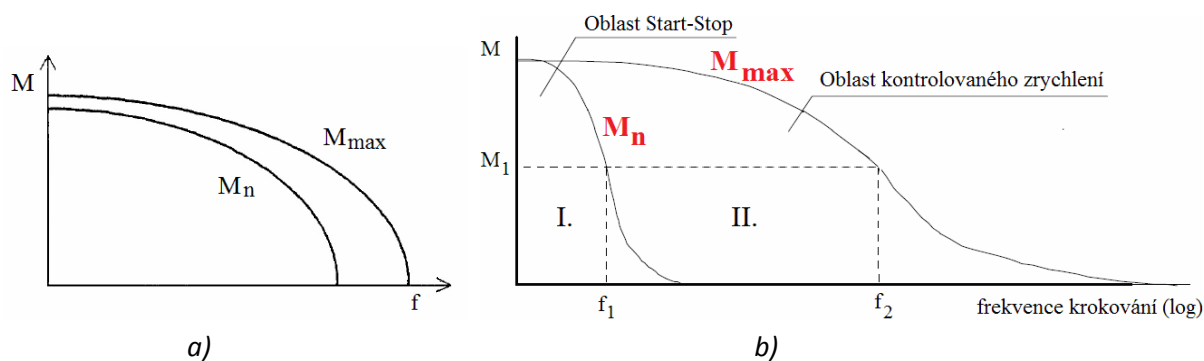
Mezi výhody mikrokrokování patří jemné rozlišení polohy, téměř konstantní točivý moment na jeden krok, pokles hluku úměrný zvýšenému počtu mikrokroků, kdy hluk vzniká při velkých změnách proudu a následnou změnou momentu, tlumení mechanických rázů, pokles přirozené rezonance omezením velikosti přechodných dějů mezi jednotlivými polohami kroků a zvýšení účinnosti díky lepšímu využití momentu. Za nevýhodu mikrokrokování lze považovat složitější obvod pro řízení. Průběh proudu při mikrokrokování je zachycen na obrázku 10. [8]



Obrázek 10 Průběh proudu při mikrokrokování [6, 8, 13]

### 1.3.4 Momentová charakteristika krokového motoru KM

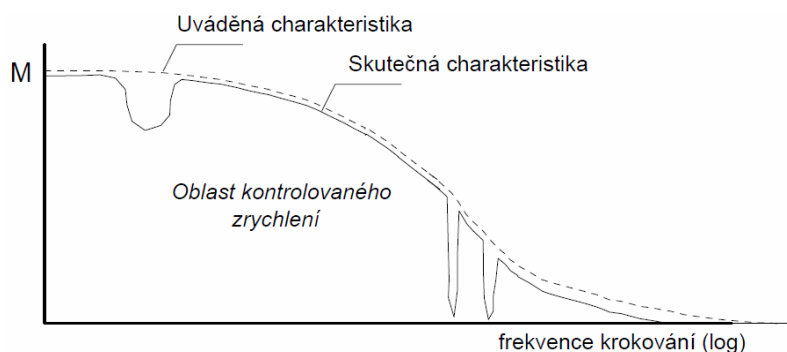
Závislost momentu motoru na napájecí frekvenci představující rychlost otáčení motoru vyjadřuje statická momentová charakteristika (viz obrázek 11), v níž lze rozlišit jmenovitou charakteristiku  $M_n$  a mezní charakteristiku  $M_{max}$ , nad níž dojde ke kritické situaci ztráty kroku s následkem polohové chyby. Oblast pod jmenovitou charakteristikou  $M_n$  vymezuje pracovní oblast, ve které se může motor pohybovat bez ztráty kroku (tedy při přechodu z klidu po skokovém připojení řídicích impulsů dané frekvence). Mezi oběma křivkami se nachází oblast kontrovaného zrychlení, kde dochází k plynulému postupnému zvyšování řídicí frekvence motoru bez ztráty kroku. [6]



Obrázek 11 Momentová charakteristika krokového motorku [6, 8]

Průběh momentové charakteristiky KM jež je zobrazen na obrázku 11 a) je v souřadnicích frekvence a moment KM [6]. Na obrázku 11 b) je zobrazena stejná závislost, jen frekvence je v logaritmických souřadnicích. [8]

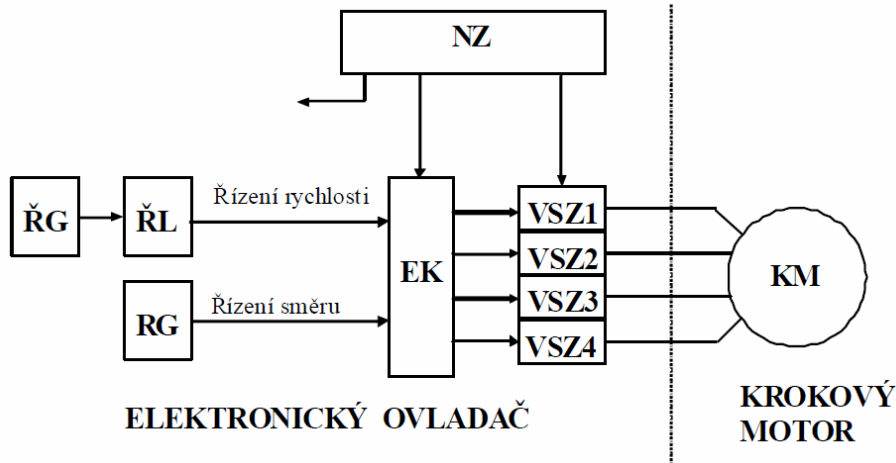
Reálné průběhy momentových charakteristik zjištěné v praxi se však liší od charakteristik katalogových (viz obrázek 12), a to výskytem poklesů při určitých frekvencích. Jedním z příčin je vlastní rezonance vyskytující se při nižších krokovacích frekvencích. Při vlastní rezonanci se frekvence krokování shoduje s vlastní frekvencí oscilací rotoru, které mohou narůstat až krokový motor může vypadnout ze synchronismu. Druhou příčinou je nestabilita systému zapříčiněná existencí kladné zpětné vazby mezi motorem a budičem. Tento jev se vyskytuje spíše v oblasti vyšších krokovacích frekvencí momentové charakteristiky a souvisí silně se stupněm viskózního tlumení (hlavně v ložiscích) jež je silně závislý na teplotě, a proto je významný zejména při trvalé činnosti krokového motoru v těchto oblastech. Tyto poklesy se však dají potlačit použitím vhodného tlumiče hřídele, jehož tlumící účinky se projeví jen při změně rychlosti motoru. Zároveň však tlumící účinky zvyšují skutečnou setrvačnost systému a snižují maximální zrychlení.



Obrázek 12 Reálná momentová charakteristika KM v semilogaritmických souřadnicích s poklesy při určitých frekvencích [8]

### 1.3.5 Krokový pohon

Krokový motor ke své činnosti a řízení potřebuje elektronický ovladač, se kterým dohromady tvoří krokový pohon (viz schéma na obrázku 13).

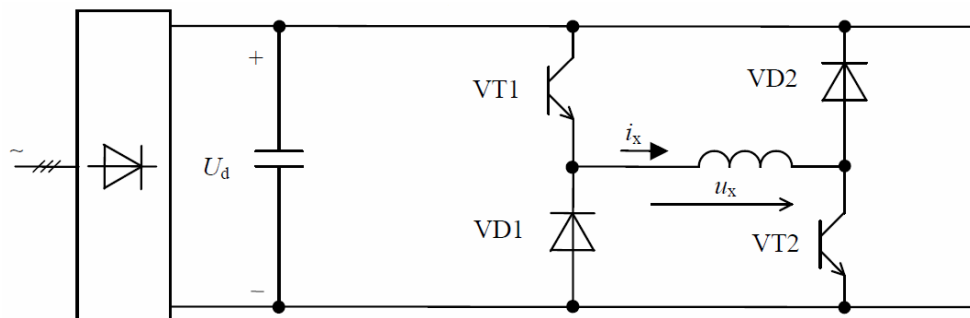


Obrázek 13 Blokové schéma krokového pohonu [6]

Krokový pohon dle blokového schématu na obrázku obrázek 13 se skládá z napájecího zdroje (NZ), generátoru řídicích signálů (ŘG), řídicí logiky (ŘL), reverzačního generátoru (RG), elektronického komutátoru (EK), výkonového spínacího zesilovače (VSZ) a samotného krokového motoru (KM). [6]

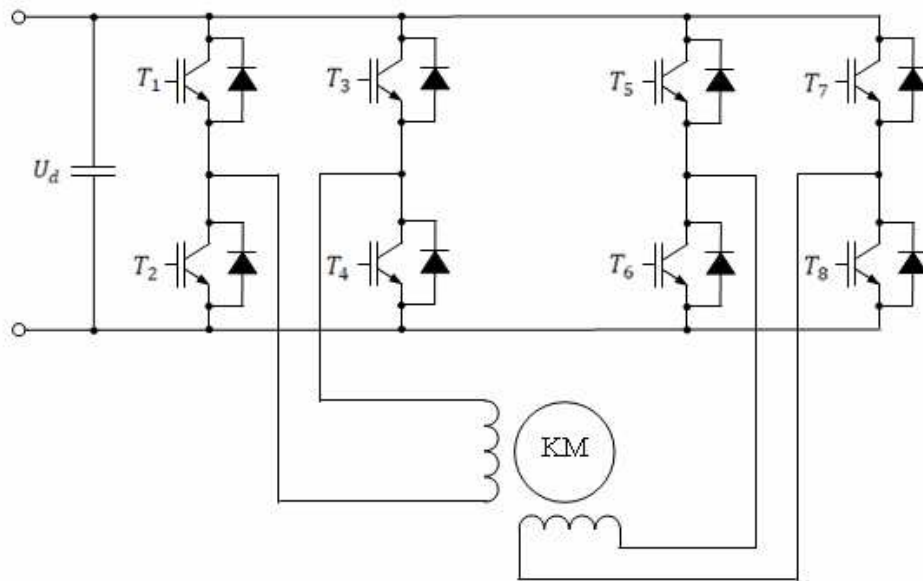
Pro spínání krokového motoru při unipolárním řízení, kdy proud vinutím může protékat jen jedním směrem, je nejčastěji pro každou fázi používán měnič v zapojení dle obrázku 38, který se skládá z dvojice výkonových polovodičových spínačů (např. tranzistorů IGBT) a z dvojice zpětných diod.

Při sepnutí tranzistorů VT1 a VT2 je k příslušné fázi připojeno kladné stejnosměrné napětí zdroje  $U_d$  a dochází k nárůstu proudu. Při rozpojení tranzistorů proud protéká zpětnými diodami VD1 a VD2 a dojde ke změně polarity stejnosměrného napětí vinutí příslušné fáze na  $-U_d$  a proud začne klesat. Druhou možností pro pokles proudu vinutím je zapojení se sepnutým tranzistorem např. VT1 a rozepnutým tranzistorem VT2, kdy se klesající proud bude uzavírat přes obvod tranzistoru VT1 a diody VT2. [13]



Obrázek 14 Zapojení 1 fáze výkonového spínacího zesilovače pro KM s pasivním rotorem [6]

Pro spínání krokového motoru při bipolárním řízení, kdy proud vinutím může protékat oběma směry se používá můstkové zapojení uvedené na obrázku 15. [6]



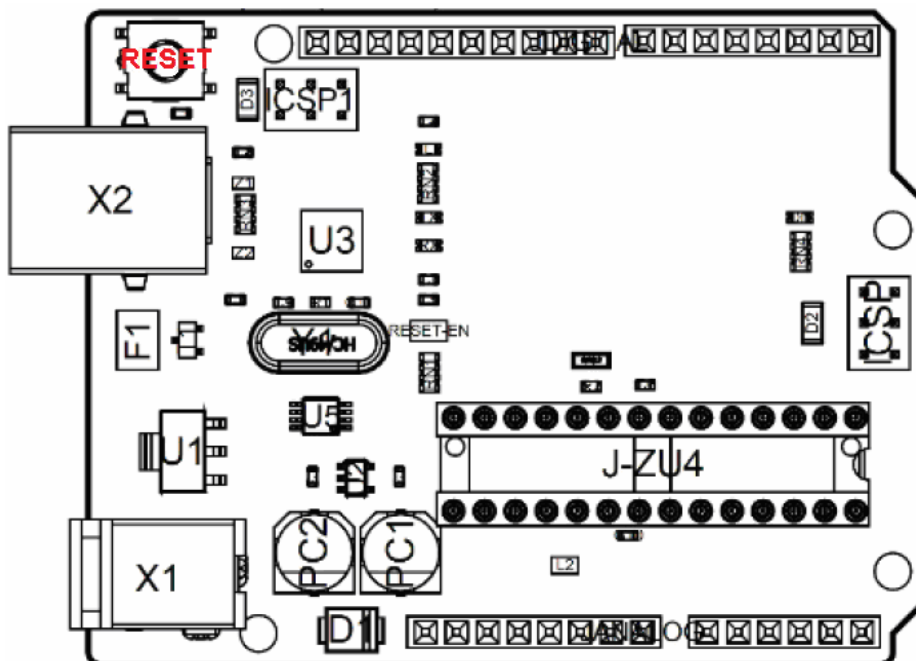
Obrázek 15 Schéma výkonového spínacího zesilovače pro KM s aktivním rotorem [6]

## 2 Výběr vhodného systému řízení krokového motoru

Pro demonstraci řízení krokového motorku bylo zvoleno bipolární řízení používané v praxi. Řízení je provedeno na světově asi nejrozšířenější platformě Arduino. Důvodem k výběru byla také cenová dostupnost a široká podpora na domovských internetových stránkách portálu Arduina, kde jsou dostupné veškeré potřebné dokumenty, volně dostupný software Arduino IDE, základy programovacího jazyka, potřebné knihovny i řada ukázkových příkladů a výukových tutoriálů. [15] Při návrhu demonstračního stanoviště je použito Arduino UNO R3, které je v současné době nepoužívanějším typem desky a Motor Shield REV3 používaný k řízení zejména stejnosměrných motorů a krokových motorů. [15, 16]

### 2.1 Arduino UNO R3

Kompletní dokumentace k desce Arduino UNO R3 je součástí elektronické přílohy. Hlavním procesorem je ATmega328P pracující na frekvenci 16 MHz. Základní topologie desky je uvedena na obrázku 16 a její popis v tabulce 8. Rozložení a zapojení pinů je uvedeno na obrázku 17.

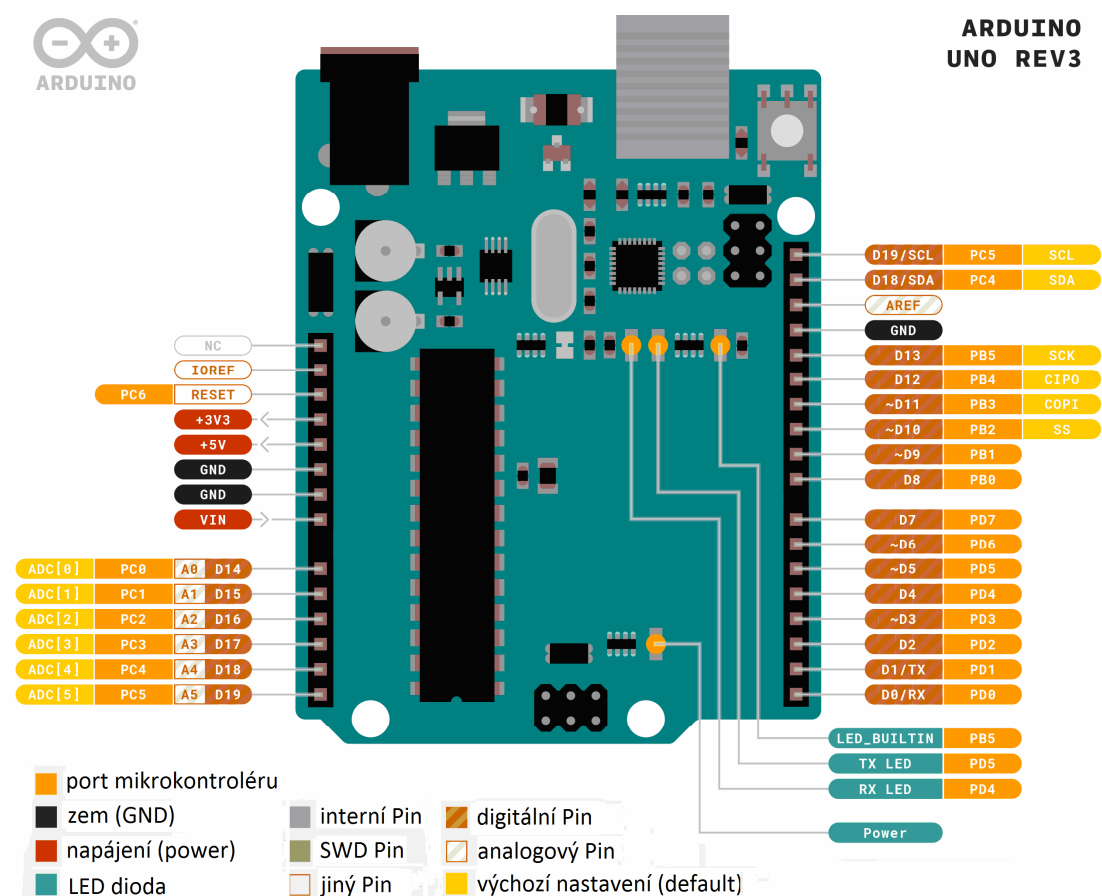


Obrázek 16 Topologie desky Arduino UNO R3 při pohledu shora [15, 16, 17]

Rozsah teplot pro celou desku:	<-40°C; 85°C>	
Vstupní napětí:	7 - 12 V	
Maximální vstupní napětí ( $V_{IN-MAX}$ ):	20 V ( $V_{IN-MIN} = 6$ V)	
Maximální vstupní napětí pro USB konektor:	5,5 V	[15, 17]

Tabulka 8 Popis topologie desky Arduino R3 uvedené na obrázku 16 [15, 16, 17]

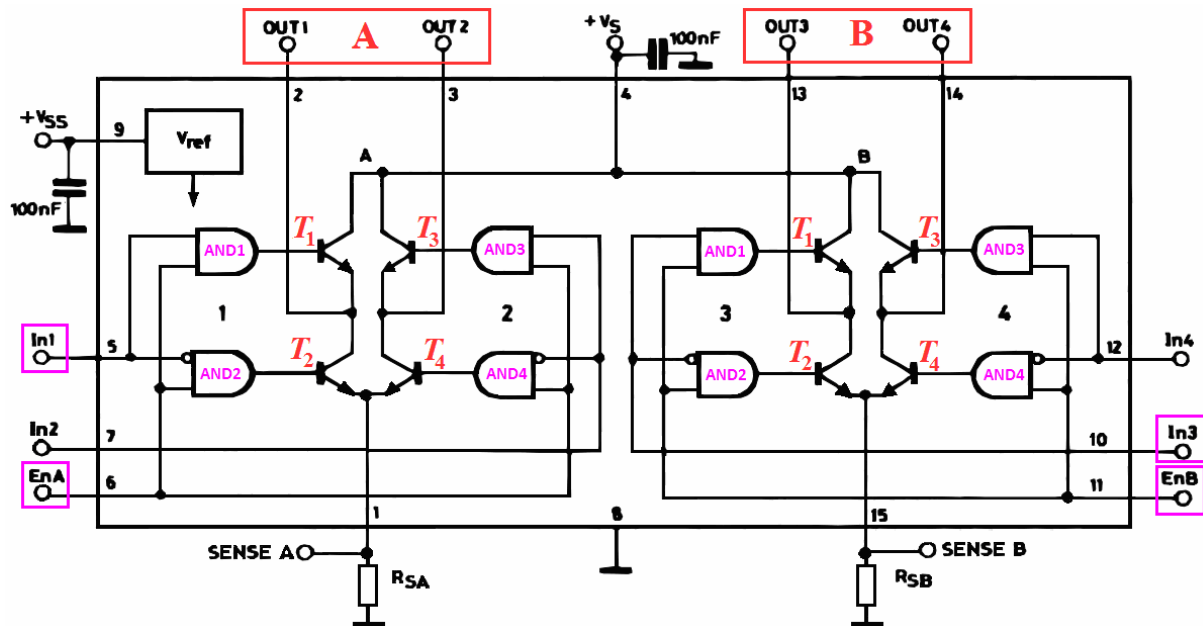
Značka	POPIS
X1	Napájecí konektor 2,1 x 5,5 mm, který lze využít, pokud Arduino není napájeno z USB
X2	Konektor USB, typ B
PC1	EEE-1EA470WP 25V SMD elektrolytický kondenzátor
PC2	EEE-1EA470WP 25V SMD elektrolytický kondenzátor
D1	CGRA4007-G dioda
J-ZU4	ATMEGA358P mikrokontrolér
Y1	ECS-160-20-4X-DU krystal
U1	SPX1117M3-L-5 lineární regulátor
U3	ATMEGA16U2 mikrokontrolér
U5	LMV358LIST-A.9 operační zesilovač
F1	Pojistka
ICSP	Hlavice pro externí programování USB-serial převodníku
ICSP1	Hlavice pro externí programování hlavního čipu
RESET	Tlačítko RESET umožňuje spuštění programu od začátku



Obrázek 17 Arduino R3 - rozložení a zapojení pinů [15, 17]

## 2.2 Motor Shield Rev 3

Arduino Motor Shield REV3 slouží k řízení stejnosměrných motorů, krokových motorů, relé a solenoidů. Schéma je uvedeno v příloze B. Motor Shield je založen na integrovaném obvodu L298, který obsahuje dva H-můstky, které umožňují řízení směru proudu v obou směrech. Blokové schéma je uvedeno na obrázku 18. Kompletní dokumentace k Motor Shieldu Rev3 i k integrovanému obvodu L298 je součástí elektronické přílohy práce. [18, 19]



Obrázek 18 Blokové schéma integrovaného obvodu L298 se dvěma H-můstkami [19]

K bázím tranzistorů, které tvoří H-můstky (viz obrázek 18) jsou připojena logická hradla AND. Příklad řízení H-můstek prostřednictvím vstupů EnA a In1 pro H-můstek A a prostřednictvím vstupů EnB a In3 pro můstek B je uveden názorně na obrázku 19.

Pokud jsou logické hodnoty vstupů  $EnA = 1$  a  $In1 = 1$ , jsou sepnuty tranzistory  $T_1$  a  $T_4$  H-můstku A. Analogicky jsou-li logické hodnoty vstupů  $EnB = 1$  a  $In3 = 1$ , pak jsou sepnuty tranzistory  $T_1$  a  $T_4$  H-můstku B.

Sepnutím tranzistoru  $T_1$  H-můstku A je připojen výstup OUT1 na kladné napájecí napětí. Obdobně sepnutím tranzistoru  $T_1$  H-můstku B je připojen výstup OUT3 na kladné napájecí napětí. Naopak sepnutím tranzistoru  $T_4$  H-můstku A je připojen výstup můstku OUT2 k zemnímu potenciálu. Obdobně sepnutím tranzistoru  $T_4$  H-můstku B je připojen výstup OUT4 k zemnímu potenciálu.

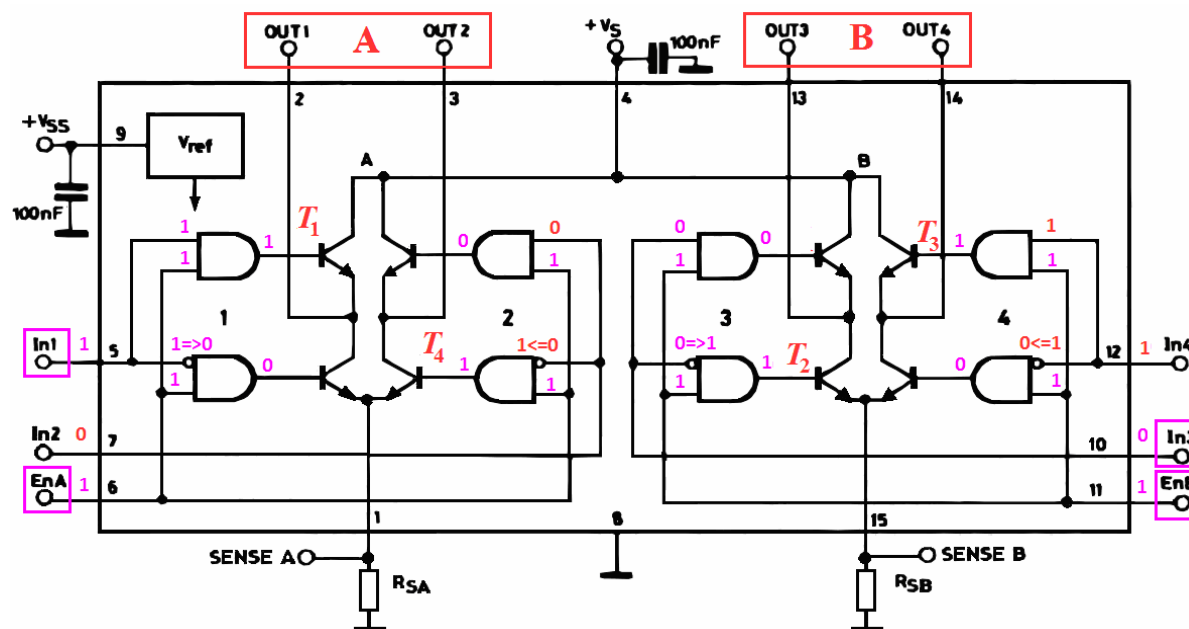
Mezi výstupy OUT1, OUT2 H-můstku A a mezi výstupy OUT3, OUT4 H-můstku B jsou připojena vinutí fáze A a vinutí fáze B krokového motorku. Změnou polarit napětí na těchto výstupech je ovlivněn směr proudu tekoucího vinutím příslušné fáze.



Opačné polarity napětí (a směru proudu) je dosaženo, pokud jsou hodnoty vstupů  $EnA = 1$  a  $In1 = 0$  H-můstku A (nebo obdobně  $EnB = 1$ ,  $In3 = 0$  u H-můstku B), pak jsou sepnuty tranzistory  $T_2$  a  $T_3$  a na výstup OUT1 H-můstku A (OUT3 H-můstku B) je přiveden zemní potenciál a na výstup OUT2 H-můstku A (OUT4 H-můstku B) je připojeno kladné napájecí napětí.

Pro názornou představu je situace rovněž ilustrována na obrázku 19. Hodnoty na vstupech H-můstku A jsou  $In1 = 1$  a  $EnA = 1$ , čímž jsou sepnuty tranzistory  $T_1$  a  $T_4$  a na výstup OUT1 je připojeno kladné napájecí napětí, na výstup OUT2 je připojen zemní potenciál. V případě H-můstku B jsou hodnoty na vstupech  $In3 = 0$  a  $EnB = 1$ , čímž dojde k sepnutí tranzistorů  $T_2$  a  $T_3$  a tím k připojení zemního potenciálu na výstup OUT3 a připojení kladného napájecího napětí na výstup OUT4.

K ovládní obou H-můstků tedy stačí měnit logické hodnoty na vstupech  $EnA$ ,  $EnB$ ,  $In1$  a  $In3$ . Je-li hodnota na některém ze vstupů  $EnA$  nebo  $EnB$  rovna nule, pak proud daným můstkem (A nebo B) neteče (bez ohledu na hodnoty vstupů  $In1$ ,  $In3$ ), neboť není sepnut žádný z tranzistorů  $T_1$  až  $T_4$  příslušného H-můstku.



Obrázek 19 Příklad ovládní duálního H-můstku L298 [19]

Aby nedošlo k současnému sepnutí dvou horních ( $T_1$  a  $T_3$ ) nebo dvou dolních ( $T_2$  a  $T_4$ ) tranzistorů, je vstup  $In2$  inverzní vůči vstupu  $In1$  a vstup  $In4$  je inverzní vůči vstupu  $In3$ , což je zajištěno logickými hradly XNOR mimo L298, jak je patrné ze schématu Motor Shieldu (viz příloha B).

Pro ilustraci, např. hodnota  $In2$  v Motor Shieldu je dána výstupní hodnotou hradla integrovaného obvodu 4077 (XNOR), jehož vstupy jsou DIRA (t.j.  $In1$ ) a BRAKE-A. Signál BRAKEA je pro účely této práce trvale nulový, jeho hodnota je nastavena pull-down rezistorem na desce Motor Shieldu.

Pravdivostní tabulka hradla XNOR je uvedena v tabulce 9. Vzhledem k tomu, že vstupy BRAKEA/BRAKEB jsou vždy nulové, připadají v úvahu jen první a třetí řádek uvedené pravdivostní

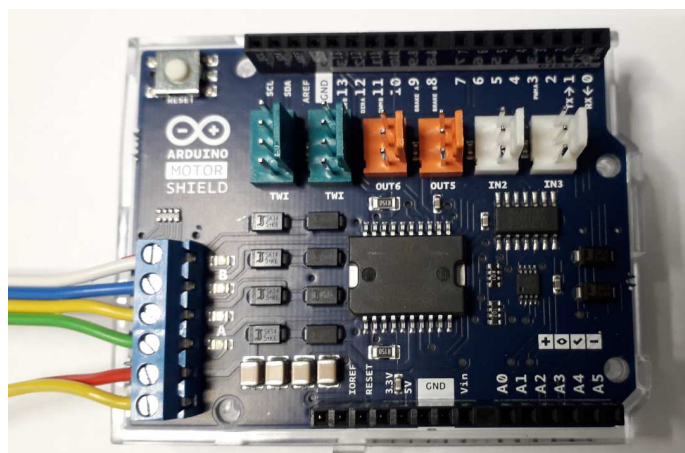
tabulky. Dle logických hodnot In1 u H-můstku A (In3 u H-můstku B) a In2 u H-můstku A (In4 u H-můstku B) na těchto řádcích je patrné, že jsou inverzní.

Tabulka 9 Pravdivostní tabulka logického hradla XNOR v Motor Shieldu [20]

A	B	XNOR
DIRA = In1 (DIRB = In3)	BRAKEA (BRAKEB)	In2 (In4)
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Signály označené jako DIRA a DIRB ve schématu Motor Shieldu (viz příloha B) odpovídají vstupům In1 a In3 ve schématu vnitřního zapojení obvodu L298 (viz obrázky 18, 19). Dále, signály PWMA a PWMB ve schématu Motor Shieldu (viz příloha B) odpovídají vstupům EnA, EnB ve schématu vnitřního zapojení obvodu L298 (viz obrázky 18, 19). Tato nekonzistence je způsobena tím, že výrobce Motor Shieldu zvolil jiné označení signálů, než uvádí technická dokumentace obvodu L298.

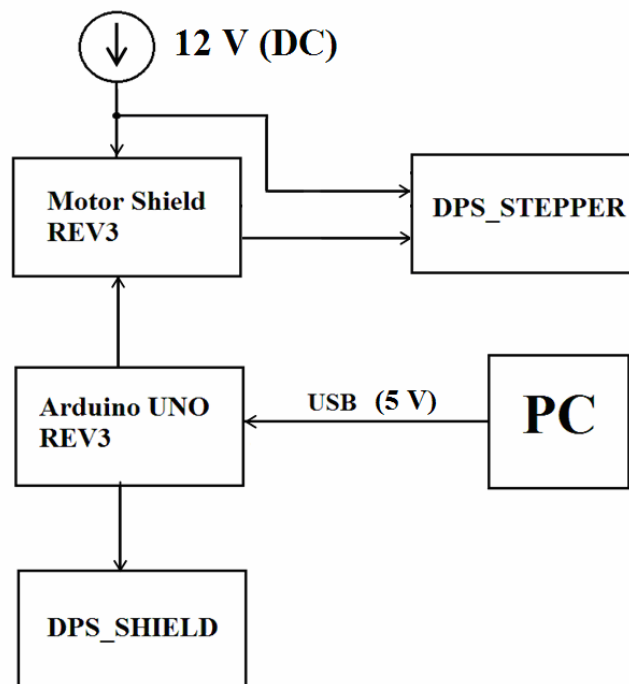
Arduino Motor Shield Rev 3 s připojenými kabely je viditelný na obrázku 20. V rámci demonstračního pracoviště je pod Motor Shieldem připojena deska Arduino s mikrokontrolérem, nad Motor Shieldem je připojena deska s LED diodami, tlačítky, potenciometrem a měřicími body (Test Pointy). Tato deska není na obrázku 20 přítomna. Všechny tři desky jsou propojeny řadovými konektory na okrajích desek. Každý ze signálů těchto konektorů prochází všemi deskami.



Obrázek 20 Arduino Motor Shield s připojenými kabely

### 3 Navržení demonstračního stanoviště řízení krokového motoru

Pro demonstrační stanoviště řízení krokového motoru, jehož blokové schéma je na obrázku 21, byly navinuty cívky z měděného drátu a navržena nosná konstrukce pro upevnění cívek a kompasu, jež byla vytisknuta na 3D tiskárně. K demonstraci principu činnosti krokového motoru s aktivním rotorem byl použit kompas. K řízení byla použita již zmíněná platforma Arduino UNO R3 a Motor Shield REV3 a navrženy a vyrobeny dvě desky plošných spojů. Na desce plošných spojů DPS\_STEPPER je ukotvena nosná konstrukce s navinutými cívkami a kompasem. Na desce plošných spojů DPS\_SHIELD jsou umístěna tlačítka ke spuštění režimů řízení krokového motoru a potenciometr k regulaci rychlosti otáčení krokového motoru.



Obrázek 21 Blokové schéma navrženého stanoviště

Deska Arduino UNO REV3 (tj. mikrokontrolér a programovací obvody) je připojena rozhraním USB k osobnímu počítači s vývojovým softwarem. Prostřednictvím USB kabelu je realizováno i napájení desky Arduino UNO REV3 napětím 5 V. Výkonové tranzistory H-můstků (Motor Shield) a deska krokového motoru (DPS\_STEPPER) jsou napájeny z napájecí větve 12 V DC ze samostatného zdroje. H-můstky a krokový motor není možné napájet napětím 5V z USB rozhraní. Naopak při připojení 12V napájecího zdroje není nutné připojovat USB rozhraní, Arduino UNO REV3 je napájeno z větve 12 V prostřednictvím regulátoru. To znamená, že napájecí větve Arduino UNO REV3 a H-můstků/motoru jsou ve výchozím stavu spojeny. Přerušením propojky na plošném spoji Motor Shieldu je možné dosáhnout rozpojení napájecích větví. Arduino UNO REV3 budí řídicí obvody H-můstků i uživatelské ovládací prvky (DPS\_SHIELD) signály o napětí 0 – 5 V. [17, 18, 19]

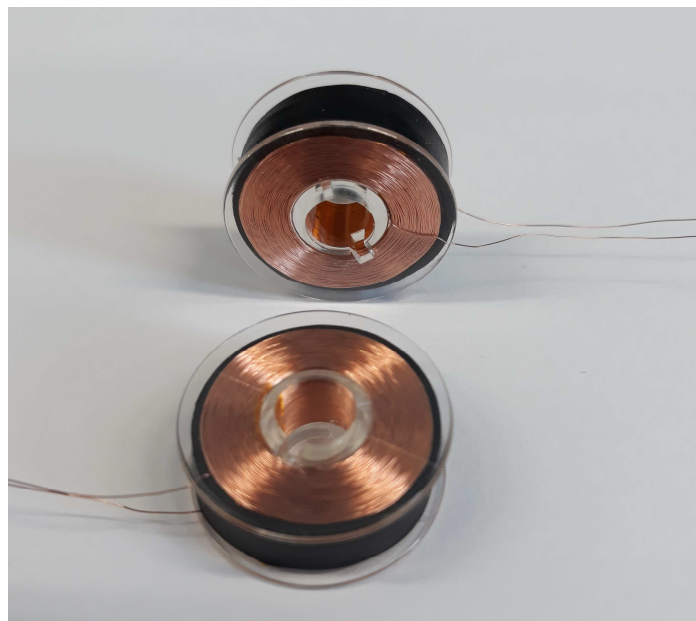
### 3.1 Cívky

Cívky byly navinuty z lakovaného měděného drátu o průměru 0,1 mm na plastovou cívku do šicího stroje. Celkem bylo navinuto a připraveno k použití 9 kusů cívek. Nakonec byly použity jen 4 navinuté cívky.

K navinutí cívek bylo použito vrtačky, šroubu s matickou upevňující plastovou cívku k navinutí, neodymových magnetů umožňujících počítání otáček pomocí volně dostupného SW Magnetic Counter instalovaného v mobilu (viz obrázek 22). Každá cívka byla navinuta na 1700 závitů. Po navinutí drátu byly cívky zataženy černou teplem smrštitelnou bužírkou. Na fotografii (viz obrázek 23) můžeme vidět ukázkou navinutých cívek.



Obrázek 22 Demonstrace principu navíjení a měření počtu navinutých závitů cívek



Obrázek 23 Navinuté cívky z měděného drátu

Jelikož cívky jsou napájeny stejnosměrným napětím, byl změřen stejnosměrný odpor navinutých cívek ( $R_{DC}$ ). Pomocí RLC metru Agilent 4263B (a pro kontrolu ověřeno i pomocí klasického multimetru) byl změřen stejnosměrný odpor navinutých cívek jak bez jádra, tak i odpor cívek s jádrem. V obou případech byl naměřen odpor cívek přibližně 120  $\Omega$ . Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 10.

Tabulka 10 Výsledky měření odporu navinutých cívek

Odpor cívek bez jádra			
Cívka 1	Cívka 2	Cívka 3	Cívka 4
$R_{DC-1} (\Omega)$	$R_{DC-2} (\Omega)$	$R_{DC-3} (\Omega)$	$R_{DC-4} (\Omega)$
119,90	119,87	119,79	119,96
Odpor cívek s jádrem			
Cívka 1	Cívka 2	Cívka 3	Cívka 4
$R_{DC-1} (\Omega)$	$R_{DC-2} (\Omega)$	$R_{DC-3} (\Omega)$	$R_{DC-4} (\Omega)$
120,07	119,95	119,94	120,03

Dále byla změřena elektromagnetická síla navinutých cívek. Hraniční hmotnost kovového závaží, které byla cívka s jádrem napájena 12 V, schopna udržet byla 50 g.

## 3.2 Držák cívek a kompasu

Konstrukce pro upevnění cívek a kompasu byla navržena pomocí SW Inventor a vytištěna na 3D tiskárně ORIGINAL PRUSA i3 MK3S+. Pro tisk byl použit materiál Prusament PETG Prusa Orange [21].

Konstrukce se skládá ze 3 součástí (viz obrázek 24):

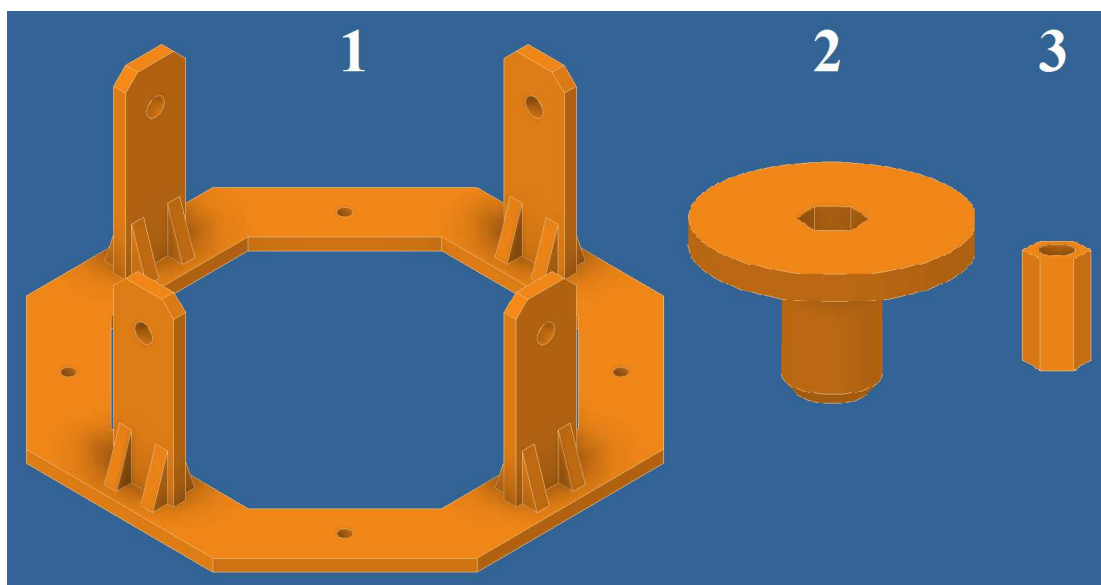
- 1) "coil hinge" - nosič cívek sloužící pro upevnění cívek v požadované pozici
- 2) "compass support" - podstavec pro uchycení kompasu a nastavení jeho vhodné výšky
- 3) "compass support plug" - pomocná zástrčka

Výkresy jednotlivých částí jsou uvedeny v příloze C - E.

Pomocná zástrčka (compass support plug) je umístěna do "nohy" kompasu, resp. její šestihorné dutiny v podstavci kompasu, kde slouží k zasunutí plastové matičky až na dno dutiny, kde vytváří závit pro šroub M 6 x 40, jelikož vytištění závitu pomocí 3D tisku je technologicky značně problematické a výsledky bývají nekvalitní, bylo použito výše uvedené řešení vnitřního závitu pomocí vnitřního závitu plastové matičky.

Podstavec pro upevnění kompasu (compass\_support) je přišroubován ze spodní strany a skrze desku plastovým šroubem M 6 x 40 a upevněn plastovou matičkou M 6.

Celá nosná konstrukce (coil hinge) je upevněna 4 plastovými šrouby M 4 x 8 skrze navrženou desku plošných spojů DPS\_STEPPEP a ze spodní strany připevněna plastovými matičkami. K indikaci buzení cívkou a zároveň směru protékajícího proudu cívkou slouží antiparalelní LED diody D1 - D4 navržené desky plošných spojů DPS\_STEPPEP (viz příloha H). Pro případnou možnost provozování stanoviště na jiné platformě než Arduino, jsou ochranné diody vinutí přidány ještě i na koncové stupně, ač jsou již primárně součástí Motor Shieldu, takže by zde nemusely nezbytně být. Slouží také jako ochrana připojených přístrojů, např. osciloskopu pro zobrazení průběhů elektrických veličin na měřicích bodech (TP).



Obrázek 24 Součásti nosné konstrukce cívek a kompasu navržené v SW Inventor

### 3.3 Desky plošných spojů

V programu Eagle byly navrženy dvě dvouvrstvé desky plošných spojů se zelenou nepájivou maskou:

- 1) DPS\_STEPPER (o rozměrech 250 mm x 220 mm)
- 2) DPS\_SHIELD (o rozměrech 80 mm x 60 mm)

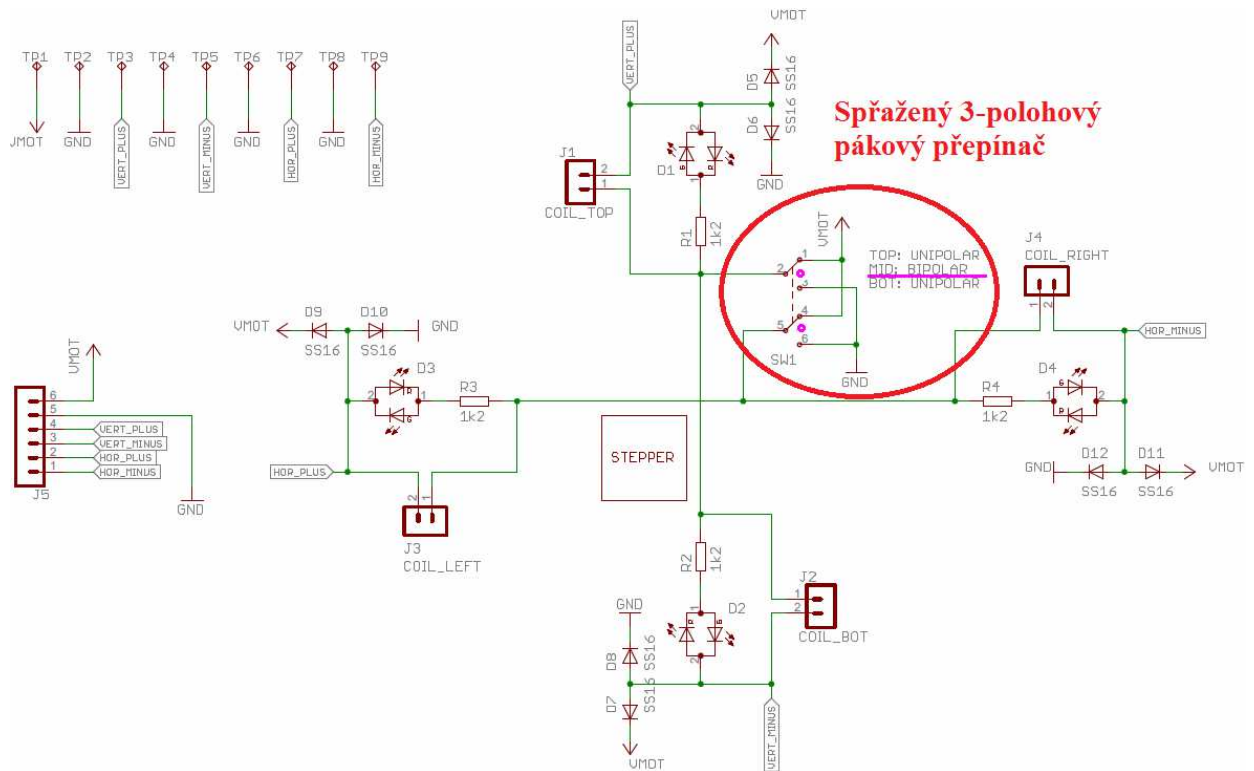
#### 3.3.1 Deska plošných spojů STEPPER

Na desce plošných spojů DPS\_STEPPER je provedeno upevnění nosné konstrukce s navinutými cívkami a také upevnění kompasu, který reprezentuje aktivní rotor krokového motorku. Dále je zde možno třípolohovým pákovým přepínačem volit přepínání mezi bipolárním a unipolárním zapojením vinutí motoru. Unipolární vinutí (a řízení) není úkolem této práce, a proto je zde navíc jen na ukázkou unipolární vinutí motoru. Navíc unipolární řízení se používá u pasivního rotoru působícího na reluktančním principu. Jednotlivé polohy pákového přepínače jsou zobrazeny v elektrickém schématu desky na obrázku 25. Výkres desky je rovněž uveden v příloze F. Spoje desky plošných spojů jsou pro názornost zobrazeny barevně a v "rentgenovém pohledu" obou vrstev zároveň - tedy jak spoje horní vrstvy TOP, které jsou zobrazeny červeně, tak spoje spodní vrstvy BOTTOM, které jsou zobrazeny modře (viz obrázek 26).

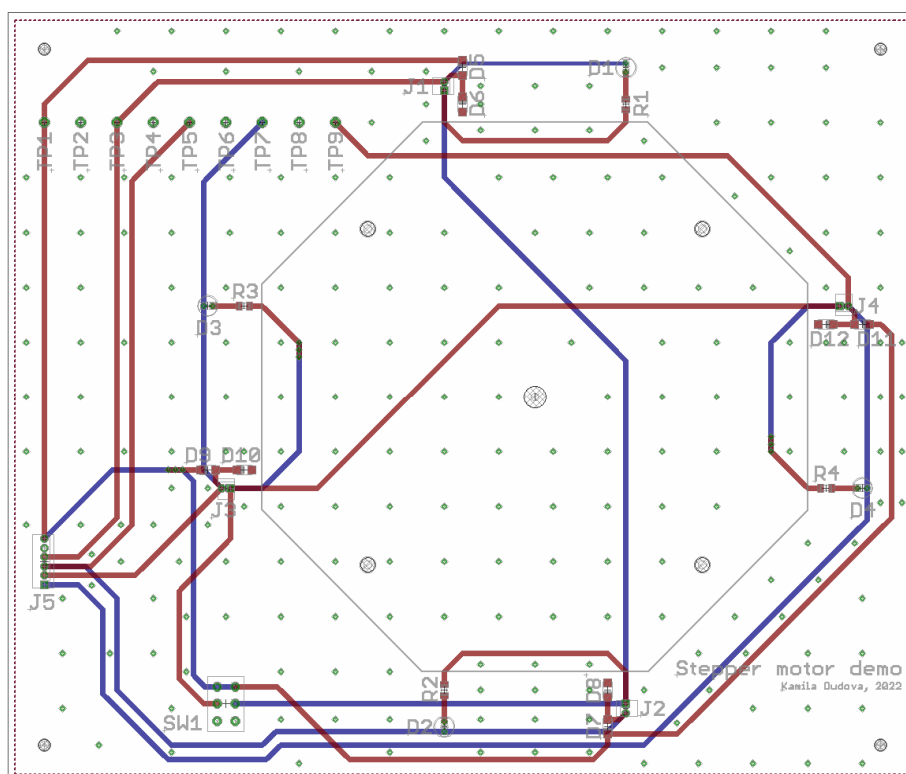
Cívka, která je právě buzená, je indikována rozsvícením příslušné LED diody u dané cívky. U každé cívky jsou použity antiparalelní LED diody (viz diody D1 - D4 v elektrickém schématu na obrázku 25), které indikují směr proudu protékající cívkou. Teče-li proud cívkou jedním směrem, rozsvítí se zelená LED dioda, teče-li proud danou cívkou opačným směrem, rozsvítí se červená LED dioda.

Každá fáze bipolárního zapojení motoru je tvořena 2 protilehlými cívkami zapojenými v sérii. Při bipolárním řízení jsou buzeny můstkem obě dvě cívky příslušné fáze pomocí příslušného H-můstku a proud tak může téct jedním vinutím (tvořeným oběmi cívkami zapojenými v sérii) oběmi směry. V případě unipolárního zapojení motoru je buzena vždy jen jedna ze dvou protilehlých cívek.

Úkolem práce bylo realizovat bipolární řízení krokového motorku. Navíc je zde realizováno i unipolární zapojení či konstrukce krokového motorku. Lze jej zapnout přepnutím tří-polohového přepínače na desce DPS\_STEPPER (viz polohy přepínače v elektrickém schématu na obrázku 25). U unipolárního zapojení jsou spojené vyvedené středy cívek a buzena je vždy jen jedna cívka příslušné fáze. Vyvedený společný střed cívek může být připojen na napájecí napětí motoru (VMOT), pak je zapojení označováno jako UNIPOLAR-TOP, nebo může být vyvedený společný střed cívek připojen na zemní potenciál (GND) a pak je zapojení označováno jako UNIPOLAR-BOT. Unipolární zapojení je zde navíc primárně hlavně pro demonstraci unipolární konstrukce. Jde tedy o demonstraci konstrukce, nikoli způsobu řízení, jelikož je zde použito řízení s Motor Shieldem s H-můstkou primárně používané pro bipolární řízení. Navíc se unipolární řízení používá pro pasivní rotor pracující na reluktančním principu, na němž nejsou magnetické póly, kdežto v navrženém stanovišti je co by rotor použit kompas, reprezentující aktivní rotor, jelikož jsou na něm vyjádřeny magnetické póly (zde severní a jižní pól stříelky kompasu). Jde tedy jen o ukázkou konstrukce unipolárního motoru, kdy se při řízení budí jen jedna cívka příslušné fáze, která je indikována opět rozsvícením příslušné LED diody u dané buzené cívky.

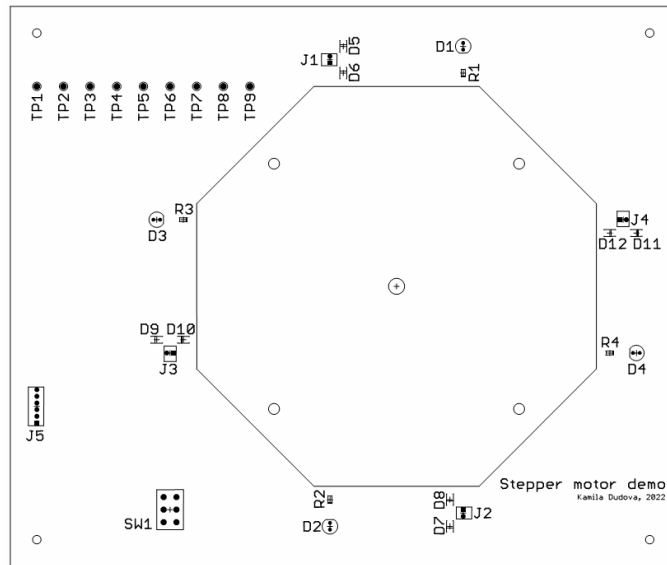


Obrázek 25 Elektrické schéma desky DPS\_STEPPER



Obrázek 26 Rentgenový pohled na spoje obou vrstev desky DPS\_STEPPER





Obrázek 27 Osazovací plán desky DPS\_STEPPER



Obrázek 28 Deska DPS\_STEPPER ve výsledném provedení stanoviště s cívkami a kompasem

### 3.3.2 Deska plošných spojů SHIELD

K realizaci bipolárního řízení na platformě Arduino byla navržena deska plošných spojů DPS\_SHIELD (viz příloha G a obrázek 29), na níž jsou umístěna tlačítka pro volbu režimů bipolárního (případně po přepnutí třípolohovým přepínačem také unipolárního) řízení:

- 1) plný krok s napájením jedné fáze (FULL STEP 1F)
- 2) plný krok s napájením 2 fází (FULL STEP 2F)
- 3) poloviční krok (HALF STEP)
- 4) mikrokrokování (MIKROSTEPPING).

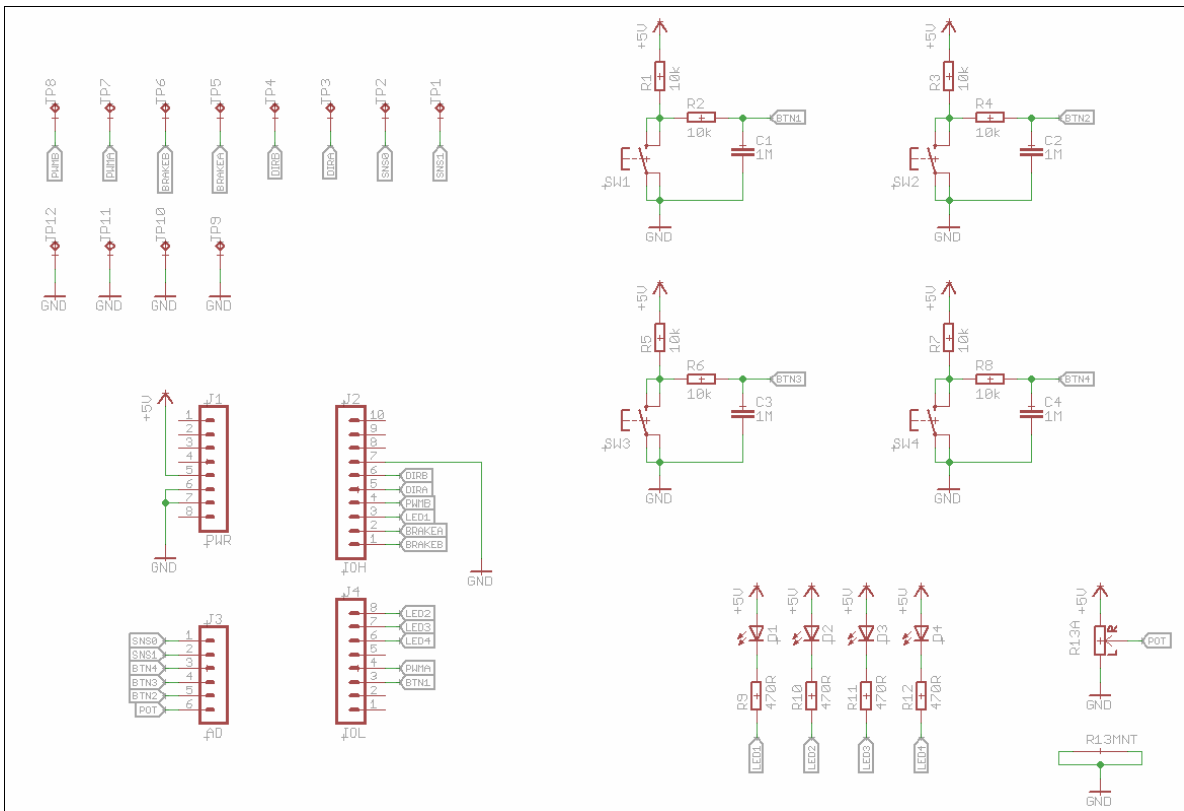
Na začátku a mezi změnami jednotlivých režimů je třeba zmáčknout tlačítko RESET na Motor Shieldu. Jednotlivé režimy řízení krokového motorku (KM) lze spouštět zmáčknutím tlačítek "SW1 - SW4" na desce DPS\_SHIELD, jimž jsou přiřazeny příslušné režimy a barevné LED diody indikující aktuálně zmáčknuté tlačítko a příslušný aktivní režim řízení, jak je uvedeno v tabulce 11.

Tabulka 11 Režimy řízení KM spouštěné pomocí tlačítek na DPS\_SHIELD

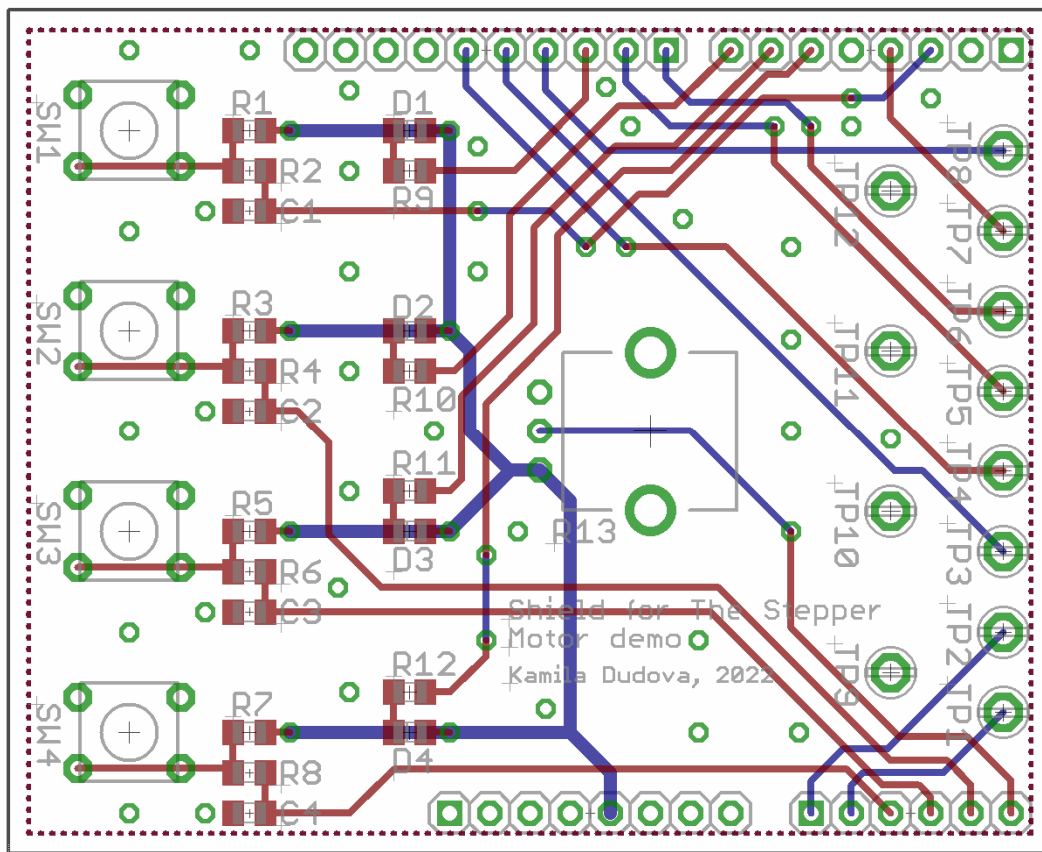
Označení tlačítka	LED dioda	Režim bipolárního řízení
SW1	zelená	FULL STEP 1F - plný krok s napájením 1 fáze
SW2	žlutá	FULL STEP 2F - plný krok s napájením 2 fází
SW3	oranžová	HALF STEP - poloviční krok
SW4	červená	MIKROSTEPPING - mikrokrokování

Dále je na desce DPS\_SHIELD umístěn potenciometr sloužící k regulaci rychlosti otáčení, pomocí něhož lze demonstrovat (při zvyšující se rychlosti otáčení) ztrátu kroku. Naopak při pomalé rychlosti je patrný průběh jednoho kroku a ustalování do výsledné polohy, které probíhá se záklitem.

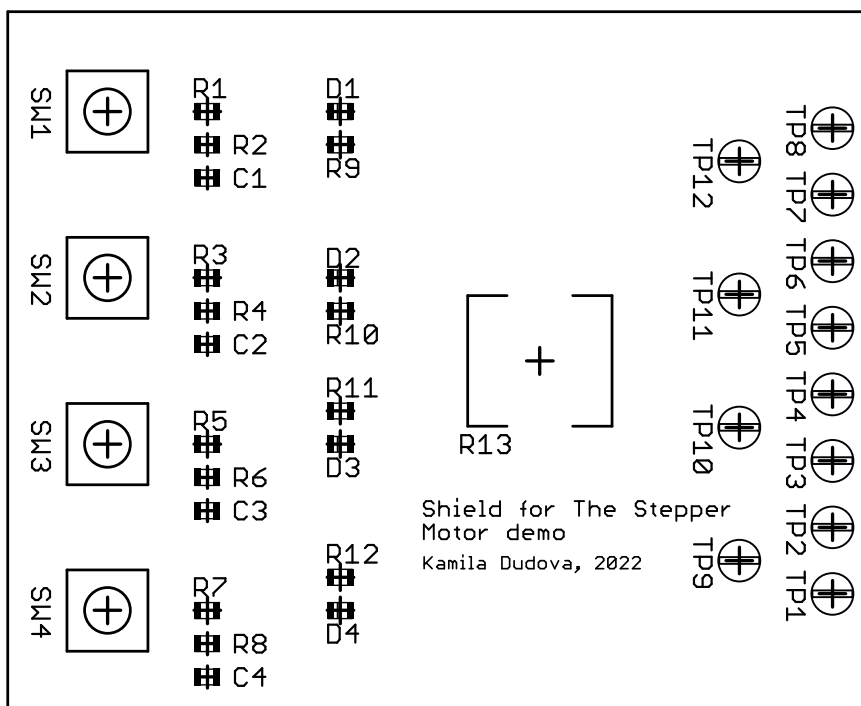
Celý program lze samozřejmě standardně řídit a dále upravovat dle potřeby po připojení k počítači přes klávesnici v SW Arduino IDE. Kód programu napsaný v SW Arduino IDE [15, 16], konkrétně ve verzi 1.8.19, je součástí elektronické přílohy této práce.



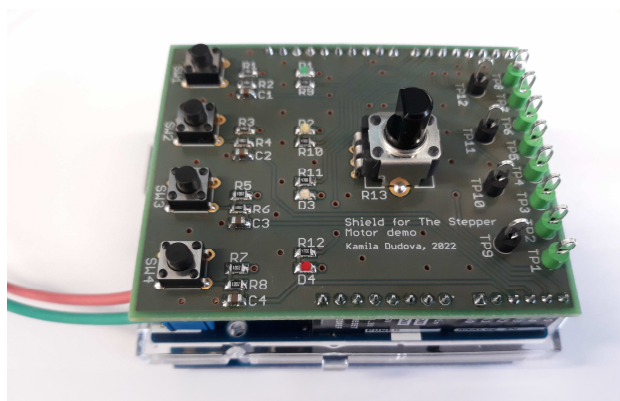
Obrázek 29 Elektrické schéma navržené desky DPS\_SHIELD



Obrázek 30 Deska plošných spojů DPS\_SHIELD v "rentgenovém pohledu" obou vrstev TOP i BOTTOM



Obrázek 31 Osazovací plán desky DPS\_SHIELD



Obrázek 32 Osazená deska DPS\_SHIELD

Na základní desce Arduino UNO R3 je shora nasazena deska Arduino Motor Shield REV3. Na Motor Shield je dále nasazena shora ještě navržená a vyrobená deska plošných spojů DPS\_SHIELD se čtyřmi tlačítky, která slouží pro spouštění jednotlivých režimů řízení krokového motorku (viz tabulka 11), a potenciometrem k regulaci rychlosti otáčení, jež je řešeno pomocí zpoždění (delay), jak je zachyceno na obrázku 32.

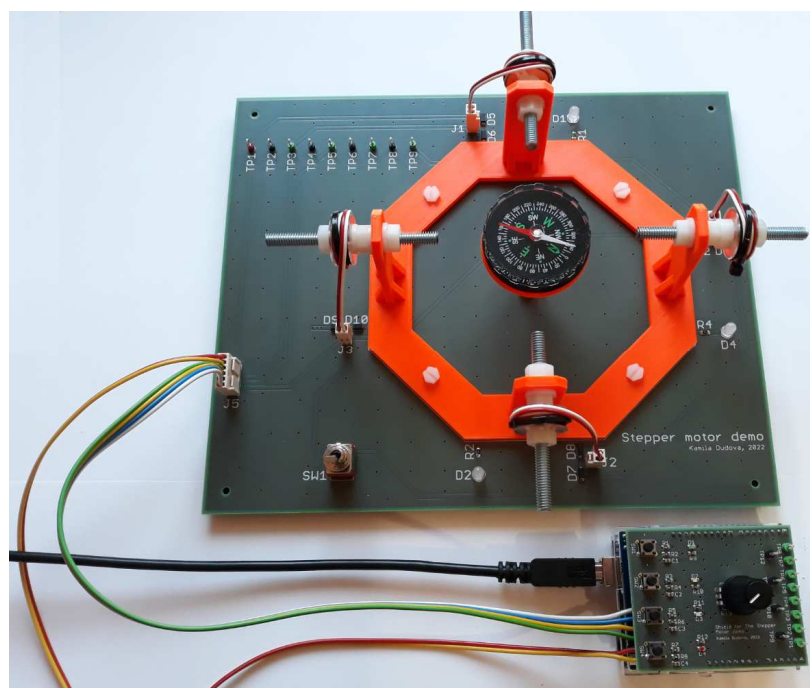
Potenciometr je připojen na analogový pin Arduino (konkrétně analogový pin A5 - viz obrázek 17 Rozložení a zapojení pinů Arduino R3 a napsaný programový kód Arduino, který je součástí elektronické přílohy).

Analogové vstupy Arduino mají rozlišení 10 bitů ( $2^{10} = 1024$ ). Natočením potenciometru lze nastavit hodnotu napětí v rozsahu 0 - 5 V. Pětivoltovou stupnicí lze tedy kvantizovat do 1024 ( $2^{10} = 1024$ ) úrovní (0 - 1023). [16]

Hodnota nastavená potenciometrem je čtena z analogového pinu pomocí funkce "analogRead(pin)". Tato hodnota je použita v napsaném programu jako hodnota zpoždění pomocí funkce "delay()". [15, 16] Maximální hodnota zpoždění je pak "delay(1023)" a odpovídá zpoždění 1023 ms, tedy 1,023 s, čímž je nastavena největší hodnota zpoždění a tedy nejmenší hodnota rychlosti otáčení motoru (resp. střelky kompasu).

Propojení obou navržených desek plošných spojů a zobrazení všech částí demonstračního stanoviště je zachyceno na obrázku 33. Černý USB kabel na obrázku 33 slouží pro připojení k počítači nebo notebooku a umožňuje nahrání programového kódu Arduina a čtyř-žilový kabel slouží k propojení DPS\_STEPPER a výstupů Out1 - Out4 z obou H-můstků L298 (viz obrázek 19) na Motor Shieldu (viz příloha B).

Dvou-žilový červeno-žlutý kabel, skládající se ze dvou částí, je společně ukončen konektorem typu JACK (pro připojení napájecího napětí 12 V) a slouží k připojení motoru, resp. DPS\_STEPPER a Motor Shieldu na napájecí napětí (VMOT) a k propojení země. K napájení motoru je možno použít laboratorní zdroj (12 V) nebo síťový napájecí zdroj na 12 V.



Obrázek 33 Propojení obou desek DPS\_SHIELD a DPS\_STEPPER

Soubor s programovým kódem napsaným v SW Arduino IDE (verze 1.8.19) pro demonstraci řízení krokového motorku, které bylo použito na navrženém demonstračním stanovišti s cívkami a kompasem, je součástí elektronické přílohy práce. Bylo vyzkoušeno použití standardní knihovny "Stepper.h" Arduina, ale na navrženém stanovišti použití příkazů knihovny bylo nefunkční. Vývojový diagram řízení chodu programu a vývojové diagramy pro jednotlivé režimy řízení (plný krok s napájením 1 fáze, plný krok s napájením 2 fází, poloviční krok a mikrokrokování) byly nakresleny v SW "draw.io" (verze 19.0.3) [22]. Jsou uvedeny v příloze J až N a jsou také součástí elektronické přílohy práce.

## 4 Výsledky měření a experimentování

Na výsledném stanovišti, jeho měřicích bodech obou navržených desek a cívkách byla provedena při všech režimech zapojení motoru (unipolární zapojení motoru - UNIPOLAR-TOP a UNIPOLAR-BOT, bipolární zapojení motoru) a všech režimech řízení (plný krok s magnetizací 1 fáze, plný krok s magnetizací 2 fází, poloviční krok a mikrokrokování) provedena řada měření. Dále jsou zde popsány výsledky experimentování při pokusech o uzavření magnetického obvodu "motoru" (resp. výsledné konstrukce demonstračního stanoviště).

Při měření a zobrazování průběhů veličin při různých režimech řízení krokového motorku byl ve většině měření použit osciloskop Agilent Technologies MSO6034A (Mixed Signal Oscilloscope), 300 MHz, 2 GSa/s.

K zobrazení většiny průběhů na osciloskopu MSO6034A byl primárně použit režim "High resolution", tedy režim vysokého rozlišení.

V režimu vysokého rozlišení se při nižších rychlostech rozmítání využívá zprůměrování vzorků, čímž je dosaženo snížení náhodného šumu, vytvoření hladší stopy na obrazovce a zvýšení vertikálního rozlišení. U režimu vysokého rozlišení dochází k zprůměrování sekvenčních vzorkovacích bodů v rámci stejné akvizice dohromady. Čím nižší je rychlost rozmítání, tím větší je počet vzorků, které jsou zprůměrovány společně pro každý bod zobrazení. [23]

V některých případech byl režim vysokého rozlišení vypnut a použit režim "Normal", tedy standardní normální režim. V případě použití normálního režimu, je toto výslovně uvedeno. Pokud použitý režim není uveden, je použit primárně režim vysokého rozlišení.

Rozdíl zobrazených výsledků při použití režimu vysokého rozlišení a při použití normálního režimu je demonstrován např. u polovičního kroku při bipolárním řízení na obrázcích 46-a) a 46-b) nebo u mikrokrokování při unipolárním řízení na obrázcích 51 a 52.

K zobrazování záporných hodnot/průběhů u bipolárního řízení při měření na osciloskopu MSO6034A byla použita diferenciální sonda Keysight N2790A (100 MHz).

U všech dále uvedených měření je použito napájecí napětí 12 V.

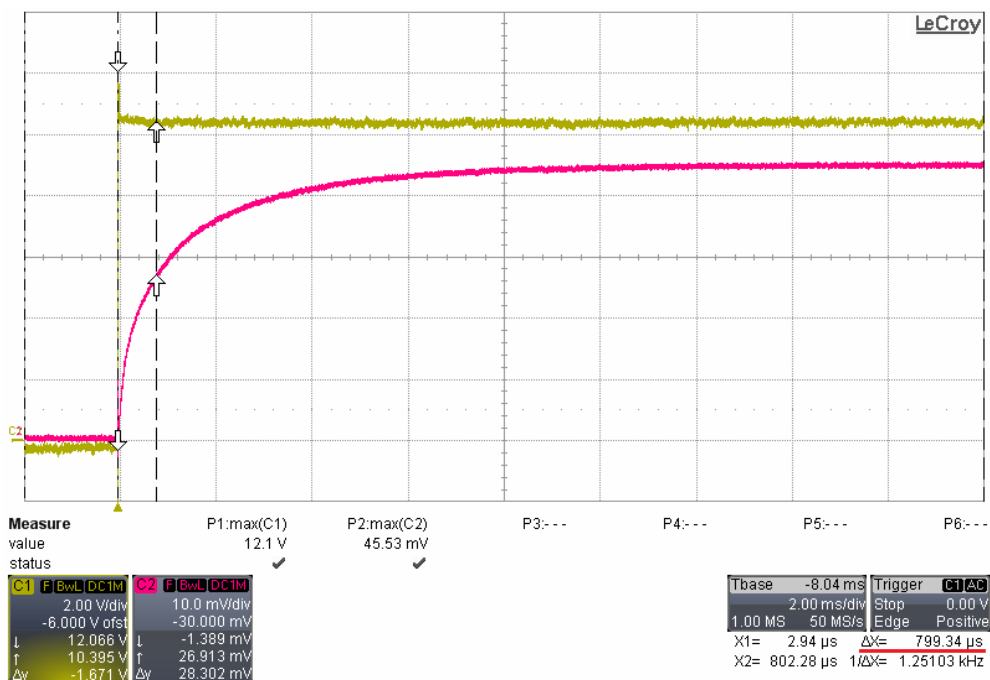
## 4.1 Průběh budicího pulzu cívky

Při měření a zobrazení průběhu budicího pulzu cívky byly použity tyto přístroje:

- osciloskop LeCroy MSO 44MXs-B (Mixed Signal Oscilloscope), 400 MHz, 5GS/s,
- odporová dekáda METREL MA 2115 S,
- zdroj DIAMETRAL L240R51D,
- multimetr SIGLENT SDM 3055 Digital Multimeter 5 1/2 Digits (sloužící zde ke kontrole měření).

### Bipolární zapojení motoru

Jelikož při měření průběhu proudu a zobrazení budicího pulzu cívky na měřicích bodech "SENSA" a "SENSB" nevedlo k úspěšnému zobrazení průběhu budicího pulzu cívky, bylo měření provedeno na externím odporu připojeném do série k měřené cívce. Konkrétně k cívce "VERT\_PLUS" (viz schéma DPS\_STEPPER v příloze F). K zobrazení a změření průběhu budicího pulzu, byla použita odporová dekáda a výsledný odpor nastavený odporovou dekádou o velikosti  $5 \Omega$ . Laboratorním zdrojem bylo nastaveno napájecí napětí 12 V.



Obrázek 34 Průběh budicího pulzu cívek při bipolárním zapojení motoru

Průběh budicího pulzu cívky (při bipolárním zapojení motoru) je uveden na obrázku 34, kde žlutou barvou (sondou) je zobrazeno napětí na a červenou barvou (sondou) je zobrazen "průběh proudu", resp. napětí reprezentující průběh proudu.

Stejnoseměrný odpor navinutých cívek ( $R_{DC}$ ) je  $120 \Omega$ . Jelikož bylo při měření použito zapojení cívek odpovídající v praxi používanému bipolárnímu vinutí motoru, kdy jsou obě protilehlé cívky příslušné fáze zapojeny v sérii, je celkový odpor cívek bipolárního vinutí  $240 \Omega$ . Celkový odpor vinutí obou cívek příslušné měřené fáze bipolárního zapojení motoru a externího odporu (z odporové dekády) je pak  $245 \Omega$ .

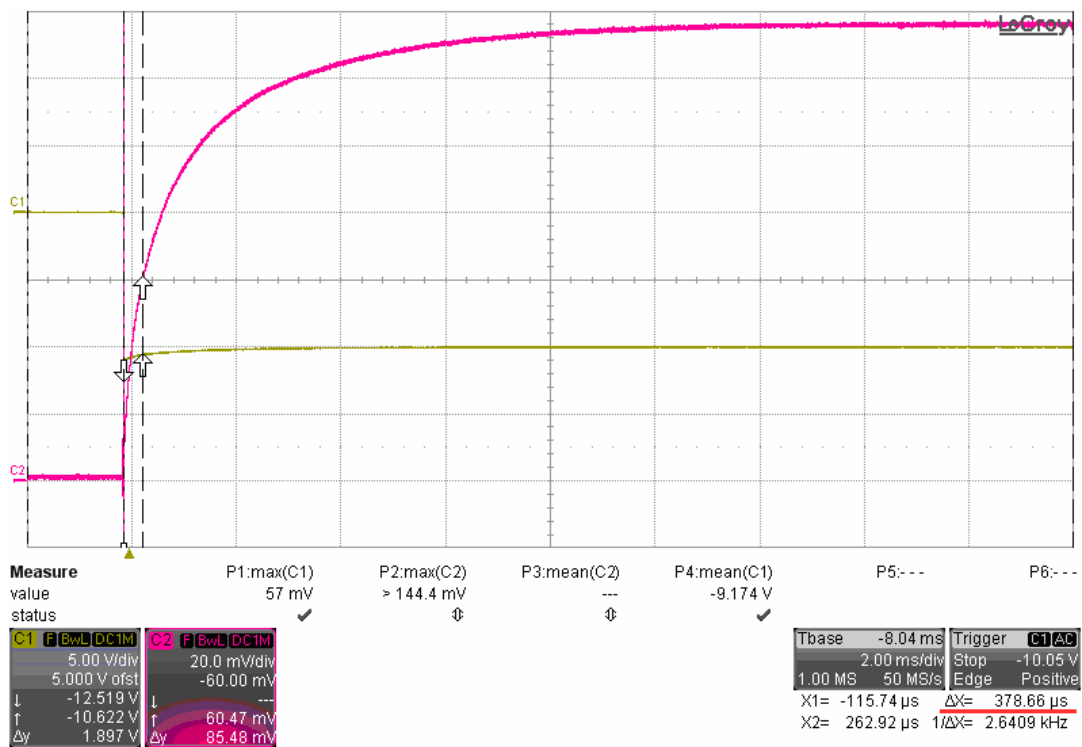
Měřením byla zjištěna ustálená hodnota "proudu", resp. napětí reprezentujícího průběh proudu 45,53 mV (viz obrázek 34).

### Unipolární zapojení motoru

Průběh budicího pulzu cívky při unipolárním zapojení motoru (konkrétně UNIPOLAR-TOP) je uveden na obrázku 35, kde žlutou barvou (sondou) je opět zobrazeno napětí na cívce a červenou barvou (sondou) je zobrazen "průběh proudu", resp. napětí reprezentující průběh proudu cívkou.

Stejnoseměrný odpor navinutých cívek ( $R_{DC}$ ) je 120  $\Omega$ . Při unipolárním zapojení motoru tvoří vinutí příslušné fáze jen 1 cívka. Celkový odpor vinutí jedné cívky příslušné měřené fáze unipolárního zapojení motoru a externího odporu 5  $\Omega$  (z odporové dekády) je pak 125  $\Omega$ .

Měřením byla zjištěna ustálená hodnota "proudu", resp. hodnota napětí reprezentujícího průběh a ustálenou hodnotu proudu, resp. napětí odpovídající proudu, o velikosti 136 mV (viz obrázek 35).



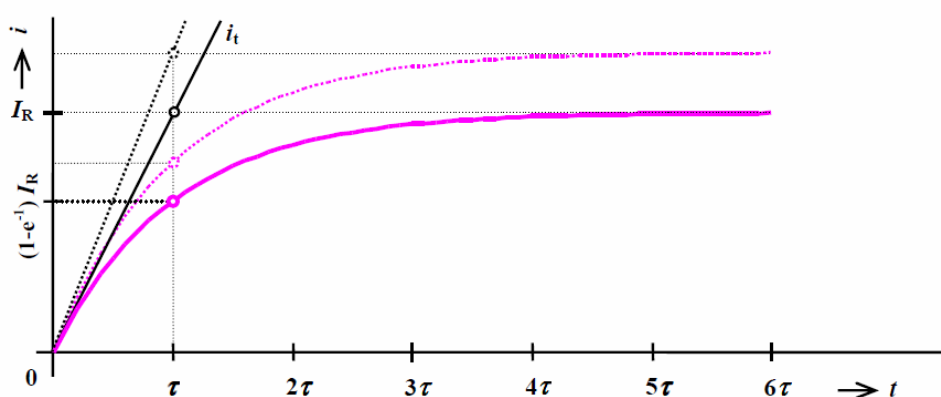
Obrázek 35 Průběh budicího pulzu cívky při unipolárním zapojení motoru



## 4.2 Velikost časové konstanty cívek

Na základě výsledků měření průběhu budicího pulzu (viz obrázek 34 a 35) lze odvodit velikost časové konstanty ( $\tau$ ) navinutých cívek. Na základě průběhu proudu přechodného děje LR obvodu probíhajícího po připojení stejnosměrného zdroje napětí při nulových počátečních podmínkách (viz obrázek 36), dosahuje proud induktoru v čase odpovídající časové konstantě ( $t = \tau$ ) asi 63,2% (resp.  $(1 - e^{-1})$ -tiny) ustálené hodnoty proudu ( $I_R$ ). Uvedená hodnota odpovídá hodnotě, kterou dostaneme, když do rovnice pro průběh proudu induktoru s nulovým počátečním proudem dosadíme čas odpovídající časové konstantě ( $t = \tau$ ). [24]

$$i = I_R (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = I_R \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{\tau}} \right) = I_R (1 - e^{-1}) = \underline{\underline{0,632 \cdot I_R}} \quad (6) \quad [24]$$



Obrázek 36 Průběh okamžité hodnoty proudu při přechodném ději LR obvodu [24]

### 4.2.1 Bipolární zapojení motoru

Při bipolárním zapojení motoru je vinutí tvořeno dvěma protilehlými cívkami zapojenými v sérii. Naměřená časová konstanta tohoto zapojení tedy odpovídá vinutí tvořeného 2 cívkami zapojenými v sérii, kde každá cívka má odpor 120  $\Omega$ . Celkový odpor, na němž je měřen úbytek napětí, včetně externího odporu 5  $\Omega$ , je tedy 245  $\Omega$ .

Naměřená ustálená hodnota "proudu", resp. napětí odpovídající průběhu proudu (viz obrázek 34):

$$U_{i-R} = 45,53 \text{ mV}$$

Hodnota "proudu" (resp. napětí odpovídající průběhu proudu) odpovídající časové konstantě:

$$u_{\tau} = 45,53 \cdot 0,632 = 28,365 \text{ mV}$$

Naměřená velikost časové konstanty odpovídající hodnotě "proudu" o velikosti 28,365 mV (viz obrázek x):

$$\tau = 800 \text{ } \mu\text{s}$$

Jelikož je známa hodnota časové konstanty i hodnota celkového odporu, je možné určit výpočtem indukčnost, která v případě bipolárního zapojení motoru odpovídá vinutí tvořeného 2 cívkami v sérii):

$$\tau = L/R \Rightarrow L = \tau \cdot R \quad (7) \quad [24]$$

$$L = 799,34 \cdot 10^{-6} \cdot 245 = 195\,835 \cdot 10^{-6} = 195,835 \cdot 10^{-3} \text{ H} = \underline{\underline{195,835 \text{ mH}}}$$

Indukčnost jedné fáze u bipolárního zapojení motoru je přibližně 196 mH.

## 4.2.2 Unipolární zapojení motoru

Naměřená ustálená hodnota "proudu", resp. napětí odpovídající průběhu proudu (viz obrázek 35):

$$U_{J-R} = 136 \text{ mV}$$

Hodnota "proudu" odpovídající časové konstantě:

$$u_{i-\tau} = 136 \cdot 0,632 = 85,95 \text{ mV}$$

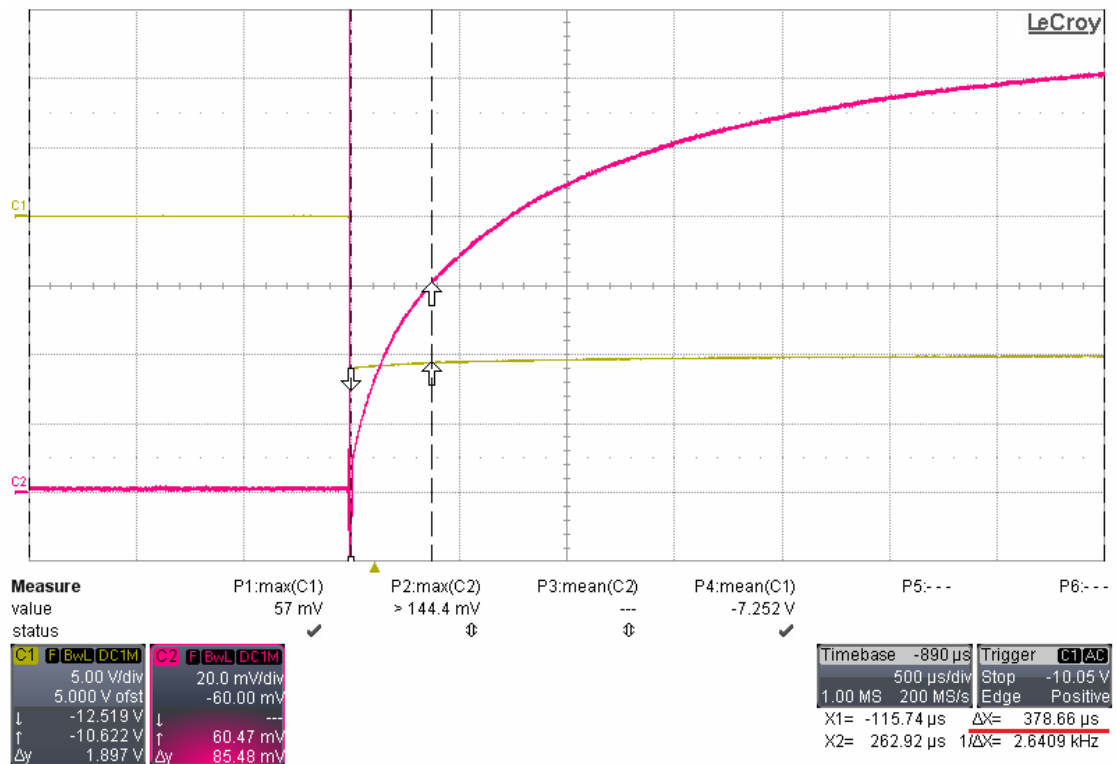
Naměřená velikost časové konstanty odpovídající hodnotě "proudu" o velikosti 85,95 mV (viz obrázek 37):

$$\tau = 379 \mu\text{s}$$

Z naměřené hodnoty časové konstanty unipolárního vinutí a známé hodnoty odporu cívky je možné určit indukčnost cívky:

$$L = \tau \cdot R = 378,66 \cdot 10^{-6} \cdot 125 = 47\,332,5 \cdot 10^{-6} = 47,332 \cdot 10^{-3} = \underline{47,332 \text{ mH}}$$

Indukčnost jedné fáze u unipolárního zapojení motoru je přibližně 47 mH.



Obrázek 37 Detail měření časové konstanty při unipolárním zapojení motoru

### 4.3 Závislost proudu a napětí

Měření probíhalo obdobně jako v případě měření průběhu budicího pulzu a měření časové konstanty a byly použity stejné přístroje:

- osciloskop LeCroy MSO 44MXs-B (Mixed Signal Oscilloscope), 400 MHz, 5GS/s,
- diferenciální sonda: LeCroy ADP305 High Voltage 1400 Vpk (mezi vstupy) 1000 Vrms CAT III (vůči zemi) DC - 100MHz
- odporová dekáda METREL MA 2115 S,
- zdroj DIAMETRAL L240R51D,
- multimetr SIGLENT SDM 3055 Digital Multimeter 5 1/2 Digits (sloužící zde ke kontrole měření).

Jelikož cívky se budí proudově, ale k napájení byl použit napájecí napěťový zdroj (12 V), bylo provedeno měření závislosti mezi proudem a napětím. Pokud by se prokázala nelineární závislost mezi napětím a proudem, musela by se provést korekce ve výpočtech v režimu mikrokrokování, kde se počítají velikosti proudů pro příslušné fáze a jednotlivé mikrokroky.

Vypočtené hodnoty jsou realizovány pomocí pulzně šířkové modulace (PWM), kdy dle vypočtených hodnot dle vztahů (4) a (5) měníme střidu napájecího napětí.

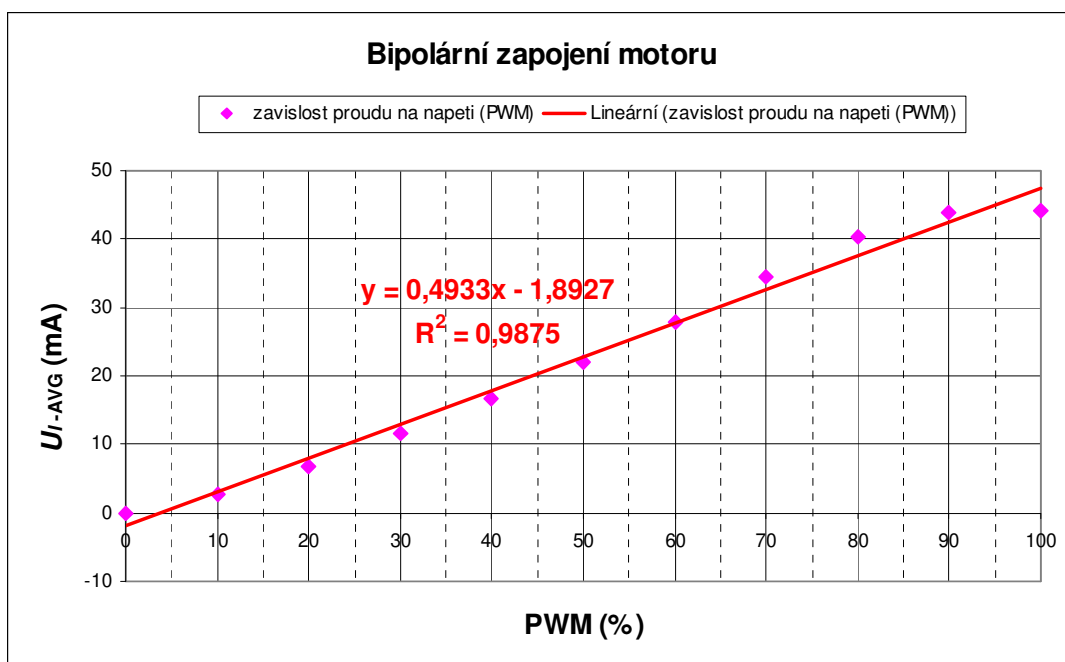
Měření závislosti bylo provedeno v režimu mikrokrokování s nastavením 10 mikrokroků na kvadrant ( $n = 10$ ), resp. 10 mikrokroků na základní krok, který je v našem případě  $90^\circ$ . Jelikož je mikrokrokování řešeno pomocí PWM, jsou odečítány střední hodnoty napětí ( $U_{PWM-AVG}$ ) a "proudů" (resp. napětí odpovídající proudu -  $U_{I-AVG}$ ) pro každou úroveň PWM (tedy 0 % až 100 % s krokem 10 %) napájecího napětí.

Naměřené střední hodnoty napětí a "proudů" (resp. napětí reprezentující proud) jednotlivých deseti mikrokroků v průběhu jednoho kvadrantu, jsou uvedeny v tabulce 12.

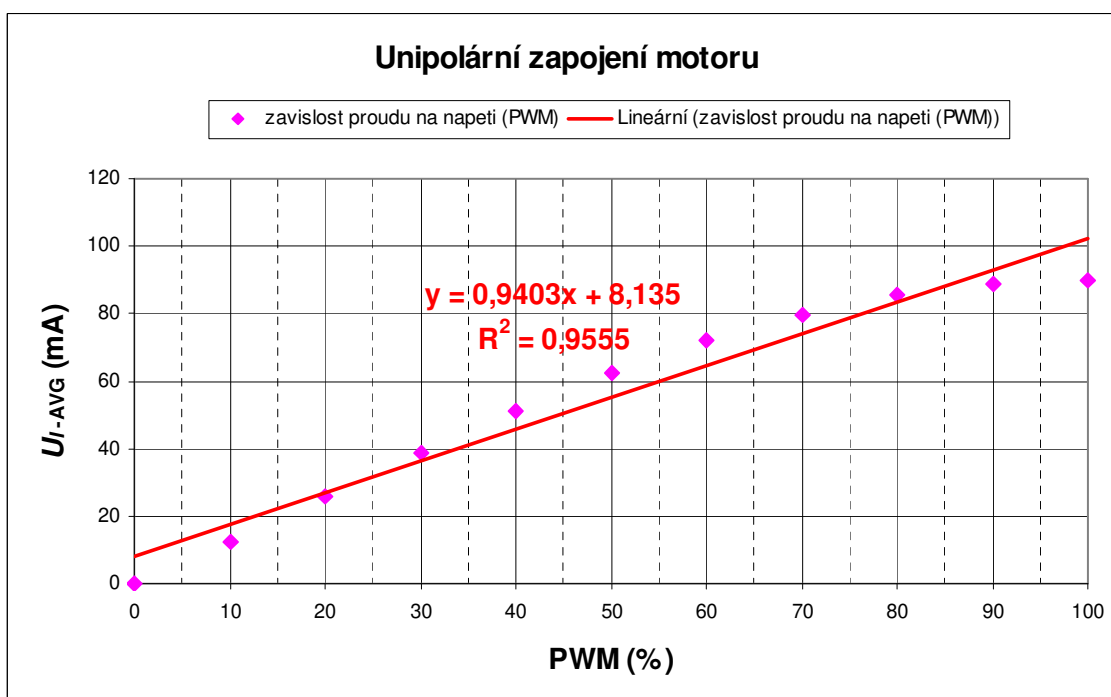
Tabulka 12 Naměřené střední hodnoty napětí a "proudu" při mikrokrokování

Zadávaná hodnota NAPĚTÍ pomocí PWM (%)	BIPOLÁRNÍ zapojení motoru		UNIPOLÁRNÍ zapojení motoru	
	NAPĚTÍ	"PROUD"	NAPĚTÍ	"PROUD"
	$U_{PWM-AVG}$ (V)	$U_{I-AVG}$ (mV)	$U_{PWM-AVG}$ (V)	$U_{I-AVG}$ (mV)
0	0	0	0	0
10	0,7	2,75	1,376	12,34
20	1,35	6,75	3,108	25,92
30	2,49	11,5	4,77	39,01
40	3,7	16,64	6,3	51,34
50	5	22,15	7,71	62,53
60	6,4	27,93	8,89	72,02
70	8	34,6	9,86	79,78
80	9,4	40,35	10,54	85,4
90	10,1	43,80	10,91	88,58
100	10,2	44,03	11,17	89,75

Grafické znázornění závislosti mezi napětím a "proudem" na základě výsledků měření uvedených v tabulce 12 je uvedeno v grafech na obrázku 38 pro bipolární zapojení motoru a v grafu na obrázku 39 pro unipolární zapojení motoru. Jsou zobrazeny také regresní rovnice pro lineární závislost a hodnoty koeficientu spolehlivosti ( $R^2$ ). Bylo vyzkoušeno proložení naměřených bodů rovněž křivkami pro polynomy 2. a 3. stupně, včetně hodnot spolehlivosti  $R^2$ . Vzhledem k tomu, že výsledky měření neprokázaly nelineární závislost mezi napětím a proudem, korekce ve výpočtech v režimu mikrokrokování nebyly provedeny.



Obrázek 38 Graf závislosti mezi napětím a "proudem" při bipolárním zapojení motoru



Obrázek 39 Graf závislosti mezi napětím a "proudem" při unipolárním zapojení motoru

## 4.4 Délka trvání smyčky programu jednotlivých režimů řízení

K měření délky trvání smyčky programu při napájecím napětí 12 V, byl použit osciloskop Agilent MSO6034A v režimu vysokého rozlišení. Měření bylo provedeno při bipolárním zapojení motoru, ale způsob zapojení motoru na výsledek měření nemá vliv, jelikož programový kód je pro všechny případy zapojení motoru stejný.

Měření bylo provedeno na digitálním pinu 4 Arduina, jež byl před začátkem smyčky programu nastaven do hodnoty HIGH a na konci smyčky programu byl tento pin nastaven na hodnotu LOW. Odečtením délky obdélníkového průběhu napětí z osciloskopu byla určena doba trvání smyčky programu.

V napsaném kódu programu Arduina (viz elektronická příloha) je k tomu definovaná symbolická konstanta na digitálním pinu 4 Arduina:

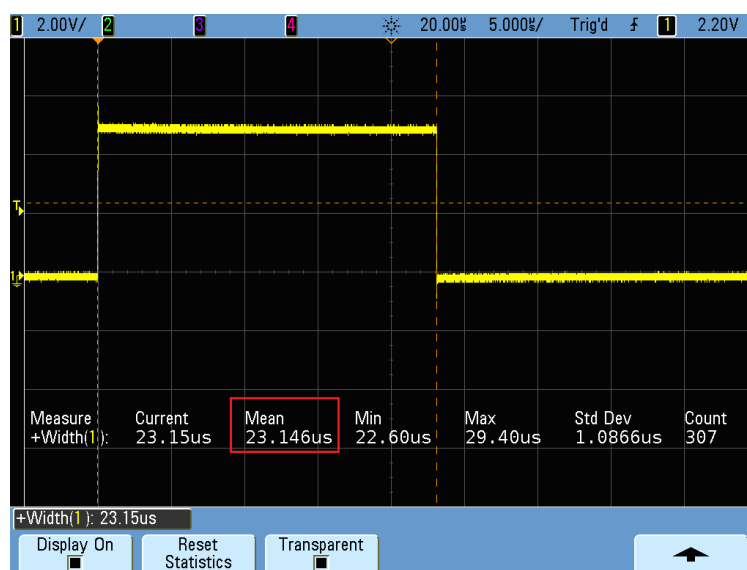
```
#define PRIZNAK 4.
```

Při práci s digitálními vstupy a výstupy rozlišujeme jen dva stavy napětí: HIGH a LOW. K nastavování hodnoty na digitálním pinu ve výstupním režimu se používá funkce "digitalWrite()". V našem případě tedy:

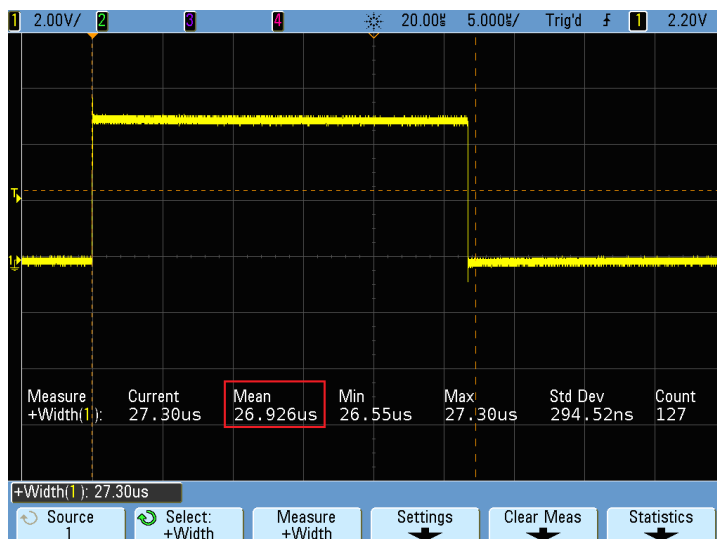
```
digitalWrite(PRIZNAK, HIGH);  
digitalWrite(PRIZNAK, LOW).
```

Při nastavování stavu napětí na úroveň HIGH je mezi zemí (GND) a výstupem hodnota napětí 5 V. Při nastavování stavu napětí na úroveň LOW je mezi zemí (GND) a výstupem hodnota napětí 0 V. [16]

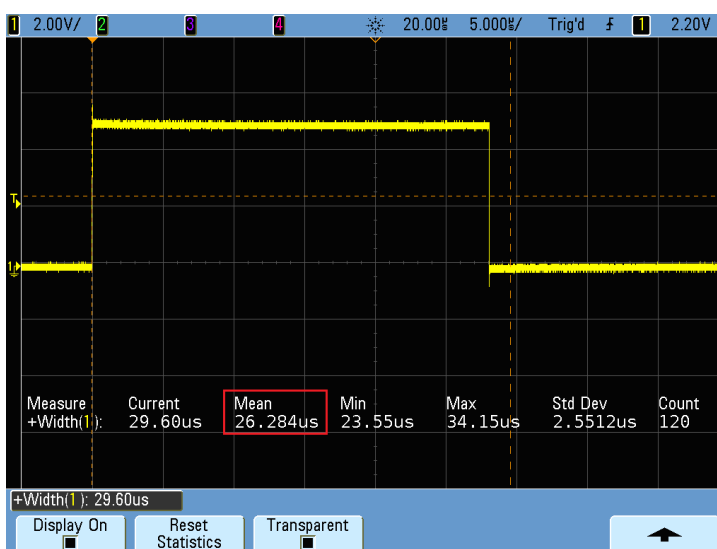
K vyhodnocení délky trvání smyčky programu bylo při měření na osciloskopu použito statistických metod - konkrétně střední hodnota z několika měření. Například na obrázku 40 byla doba trvání smyčky programu stanovena statisticky 23,146  $\mu$ s jako střední hodnota z 307 vzorků, resp. měření.



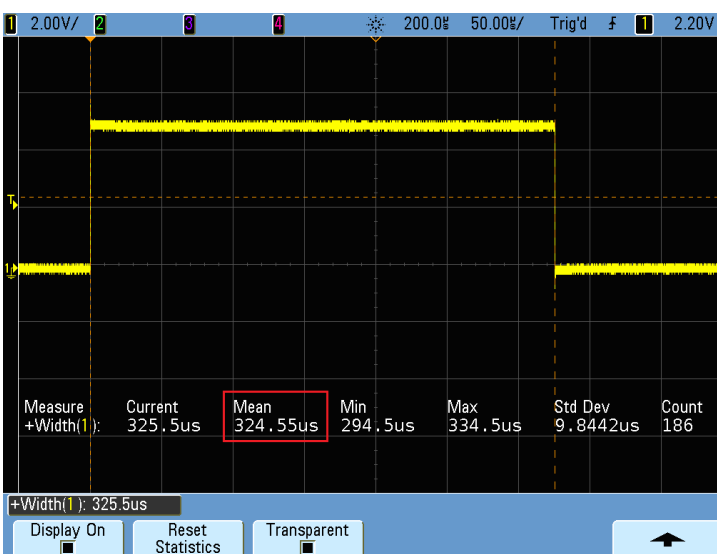
Obrázek 40 Délka trvání smyčky programu pro plný krok s napájením jedné fáze



Obrázek 41 Délka trvání smyčky programu pro plný krok s napájením dvou fází



Obrázek 42 Délka trvání smyčky programu pro poloviční krok



Obrázek 43 Délka trvání smyčky programu u mikrokování

Nejdelší doba trvání smyčky programu byla dle očekávání naměřena u režimu mikrokrokování, v němž jsou obsaženy výpočty s použitím goniometrických funkcí. Střední hodnota doby trvání smyčky programu u mikrokrokování byla stanovena ze 186 měření o velikosti cca 325  $\mu$ s.

Doby trvání rutin programu u ostatních režimů (plný krok s napájením jedné fáze, plný krok s napájením dvou fází, poloviční krok) jsou mnohem menší a trvají přibližně 25  $\mu$ s.

Výsledky měření pro jednotlivé režimy řízení krokového motoru jsou uvedeny v tabulce 13.

Tabulka 13 Výsledky měření doby trvání smyčky programu

Režim řízení krokového motoru	Doba trvání 1 smyčky programu ( $\mu$ s)	Maximální rychlost (frekvence) (kroků/s)
FULL STEP-1F	23,146	43 204
FULL STEP-2F	26,926	37 138
HALFSTEP	26,284	38 045
MICROSTEPPING	324,55	3 081

Měřením jsme zjistili dobu, kterou mikroprocesoru trvá zpracování 1 smyčky programu, tedy nejkratší čas, kdy může dojít k přepnutí další cívky, což odpovídá nejkratší době trvání 1 kroku, je-li zpoždění (delay) nulové. Z doby trvání 1 smyčky programu je vypočtena maximální rychlost či frekvence v počtu kroků za sekundu, která je umožněna či limitována mikroprocesorem. Při praktické realizaci těchto rychlostí nedosáhneme, jelikož dříve dojde při provozu ke ztrátě kroku.

Pokud by naměřené časy byly příliš dlouhé, zejména v případě délky smyčky programu u režimu mikrokrokování, kde jsou obsaženy náročnější výpočty goniometrických funkcí, bylo by třeba upravit program a místo složitějších výpočtů provést zadání hodnot pomocí tabulky (s využitím polí), čímž by se zkrátila délka trvání smyčky.

Naměřené časy jsou stran délky trvání smyček programu jednotlivých režimů, včetně režimu mikrokrokování, plně dostačující a není potřeba provádět úpravy.

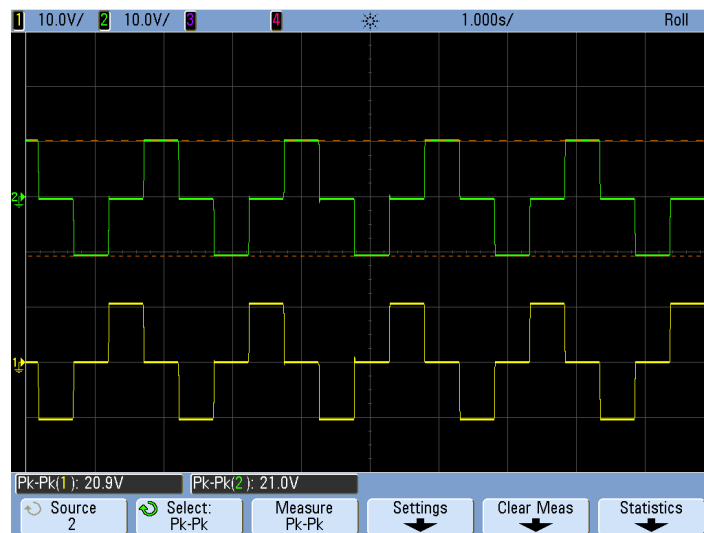
## 4.5 Výsledky měření na desce plošných spojů DPS\_STEPPER

K měření na desce plošných spojů DPS\_STEPPER byl použit osciloskop Agilent Technologies MSO6034A primárně v režimu vysokého rozlišení (High Resolution).

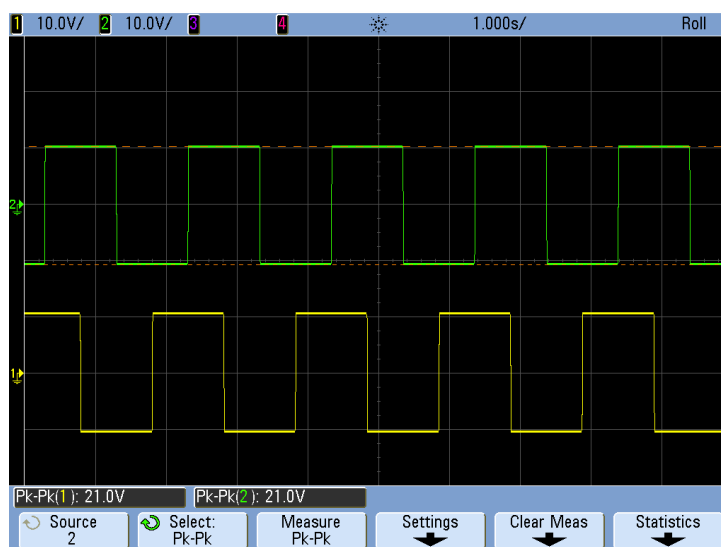
### 4.5.1 Bipolární zapojení motoru

Při měření průběhů bipolárního zapojení motoru na desce plošných spojů DPS\_STEPPER byla pro zobrazení průběhů záporných hodnot použita diferenciální sonda Keysight N2790A (100 MHz).

Žlutá sonda osciloskopu na obrázcích 44 až 47 odpovídá průběhu napětí měřeného mezi měřicími body TP3 (VERT\_PLUS) a TP5 (VERT\_MINUS). Představuje průběh napětí na vertikálních cívkách - tedy průběh napětí na "vinutí fáze A". Zelená sonda osciloskopu na obrázcích 44 až 47 odpovídá průběhu napětí měřeného mezi měřicími body TP7 (HOR\_PLUS) a TP9 (HOR\_MINUS). Představuje průběh napětí na horizontálních cívkách - tedy průběh napětí na "vinutí fáze B".



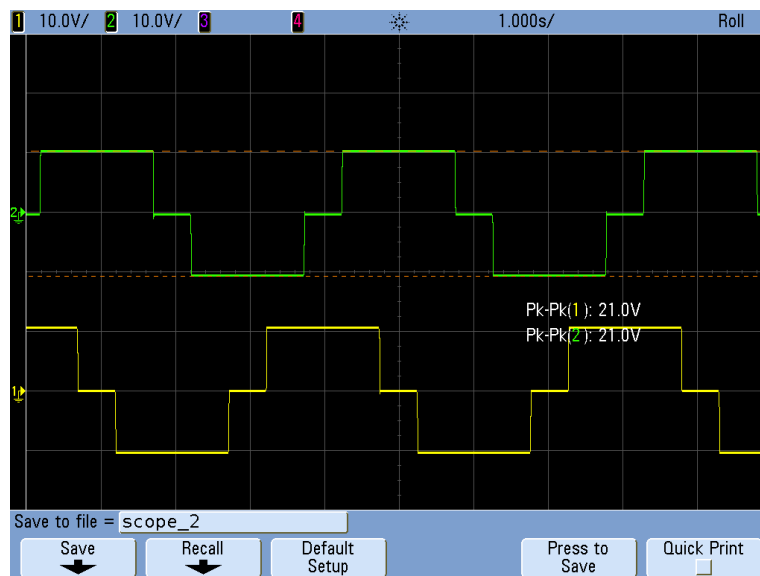
Obrázek 44 Bipolární zapojení motoru - plný krok s napájením 1 fáze



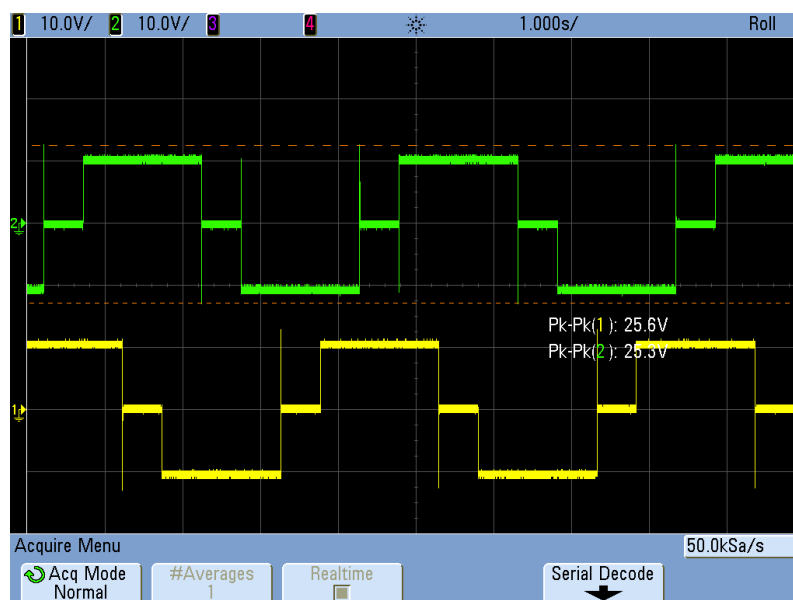
Obrázek 45 Bipolární zapojení motoru - plný krok s napájením 2 fází



Na obrázcích 46-a, 46-b je ilustrován rozdíl v zobrazení téhož měřeného průběhu při použití režimu vysokého rozlišení (viz obrázek 46-a) a normálního režimu osciloskopu (viz obrázek 46-b). Na obrázku 46-a je dále naměřeno napětí špička-špička o velikosti 21 V. Vzhledem k tomu, že napájecí napětí je 12 V, očekávali bychom napětí špička-špička u bipolárního průběhu v rozsahu kladné a záporné polarity 24 V. Vzhledem k tomu, že v každé polaritě průběhu vznikají úbytky na dvou polovodičových prvcích, resp. na dvou PN přechodech, je celkový úbytek pro obě polarity 3 V a výsledné napětí špička-špička tedy 21 V.



Obrázek 46-a Bipolární zapojení motoru - poloviční krok



Obrázek 46-b Bipolární zapojení motoru - poloviční krok (normální režimu osciloskopu)

Na obrázku 47 jsou zobrazeny průběhy napětí při mikrokrokování pro  $n = 4$ , tedy pro 4 mikrokroky na základní krok, který je v našem případě  $90^\circ$ .



Obrázek 47 Bipolární zapojení motoru - mikrozkokování

#### 4.5.2 Unipolární zapojení motoru - UNIPOLAR TOP

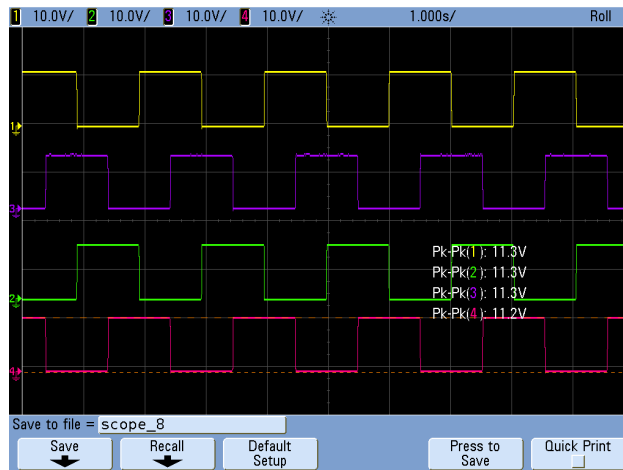
Při tomto unipolárním zapojení jsou vyvedené středy cívek připojeny na napájecí napětí motoru. Zobrazené průběhy napětí na jednotlivých cívkách jsou měřeny na uvedených měřicích bodech běžnou sondou (typ sondy "single ended") vůči zemnímu potenciálu.

Žlutá sonda zobrazuje průběh napětí na cívce VERT\_PLUS měřeného na měřicím bodu TP3 vůči zemi. Modrá (fialová) sonda zobrazuje průběh napětí na cívce HOR\_PLUS měřeného na měřicím bodu TP7 vůči zemi. Zelená sonda zobrazuje průběh napětí na cívce VERT\_MINUS měřeného na měřicím bodu TP5 vůči zemi. Červená sonda zobrazuje průběh napětí na cívce HOR\_MINUS měřeného na měřicím bodu TP9 vůči zemi (viz příloha F - schéma DPS\_STEPPER).

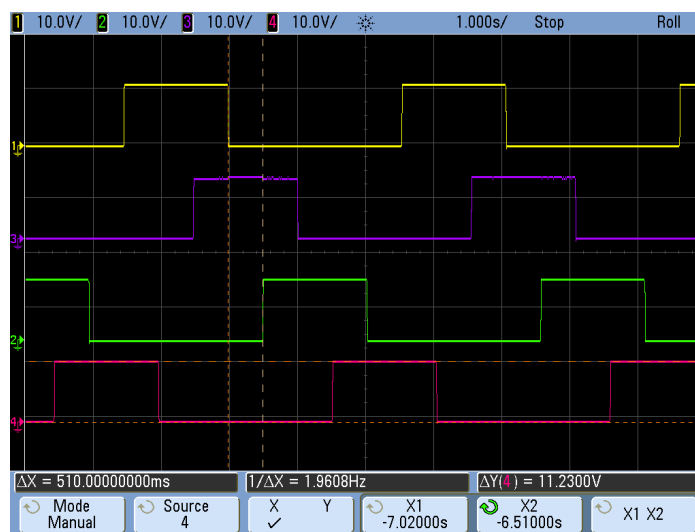
Rozdíl v zobrazení průběhů při použití režimu vysokého rozlišení a normálního režimu osciloskopu je zde ilustrován mezi průběhy napětí na obrázcích 51 a 52 při režimu mikrozkokování, kde je na žlutém a modrém (fialovém) průběhu patrné použití pulzně šířkové modulace.



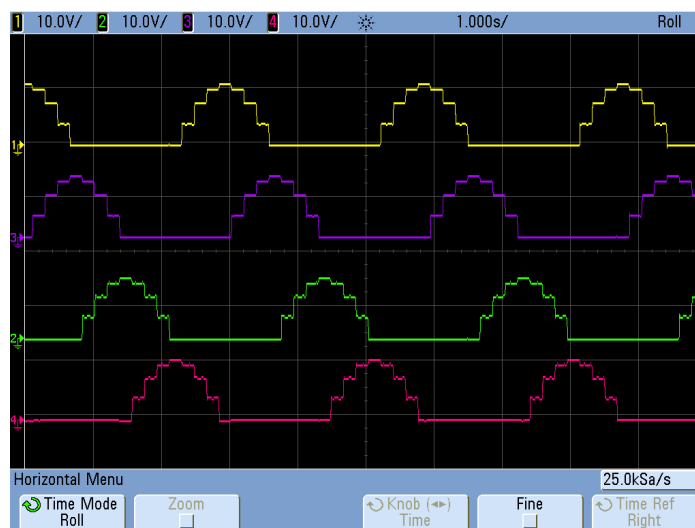
Obrázek 48 Unipolární zapojení motoru (UNIPOLAR-TOP) - plný krok s napájením 1 fáze



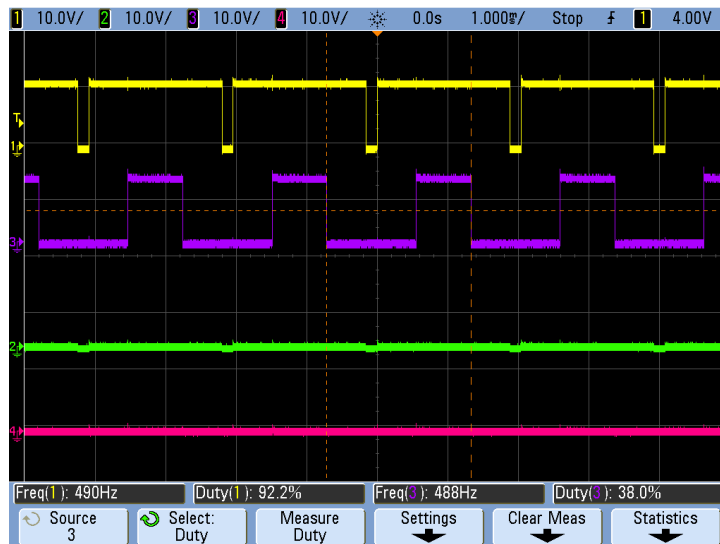
Obrázek 49 Unipolární zapojení motoru (UNIPOLAR-TOP) - plný krok s napájením 2 fází



Obrázek 50 Unipolární zapojení motoru (UNIPOLAR-TOP) - poloviční krok



Obrázek 51 Unipolární zapojení motoru (UNIPOLAR-TOP) - mikrokování ( $n = 4$  mikrokroky)



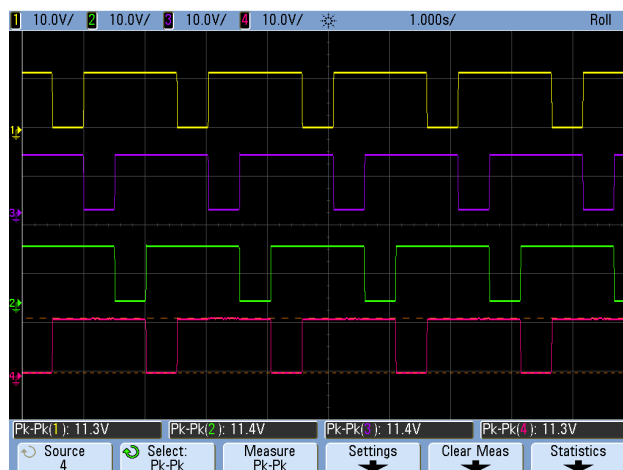
Obrázek 52 Unipolární zapojení motoru (UNIPOLAR-TOP) - mikrokrokování (normální režim)

### 4.5.3 Unipolární zapojení motoru - UNIPOLAR BOT

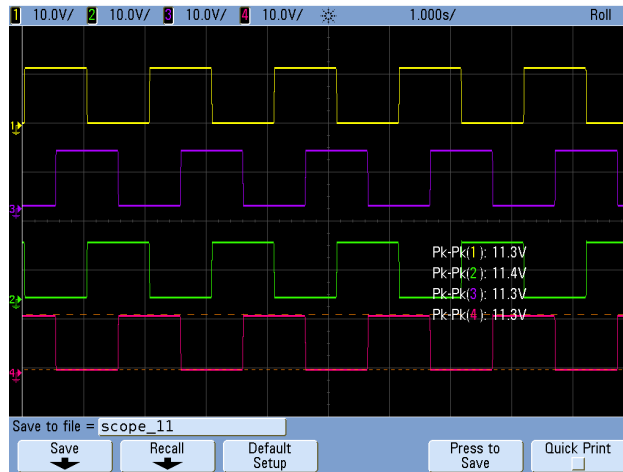
Při tomto unipolárním zapojení jsou vyvedené středy cívek připojeny na zem. Zobrazené průběhy napětí na jednotlivých cívkách jsou měřeny na uvedených měřicích bodech běžnou sondou ("single ended") vůči zemnímu potenciálu.

Žlutá sonda zobrazuje průběh napětí na cívce VERT\_PLUS měřeného na měřicím bodu TP3 vůči zemi. Modrá (fialová) sonda zobrazuje průběh napětí na cívce HOR\_PLUS měřeného na měřicím bodu TP7 vůči zemi. Zelená sonda zobrazuje průběh napětí na cívce VERT\_MINUS měřeného na měřicím bodu TP5 vůči zemi. Červená sonda zobrazuje průběh napětí na cívce HOR\_MINUS měřeného na měřicím bodu TP9 vůči zemi (viz příloha F - schéma DPS\_STEPPER).

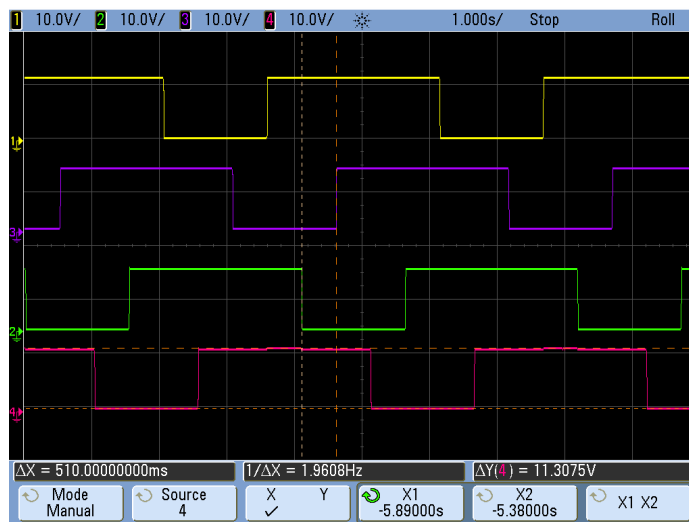
Rozdíl v zobrazení průběhů při použití režimu vysokého rozlišení a normálního režimu osciloskopu je zde opět ilustrován mezi průběhy napětí na obrázcích 56 a 57 při režimu mikrokrokování, kde je na modrém (fialovém) a zeleném průběhu patrné použití pulzně-šířkové modulace.



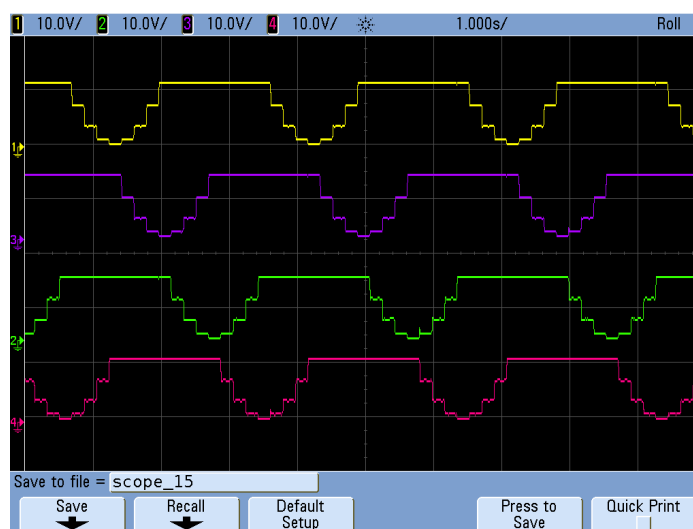
Obrázek 53 Unipolární zapojení motoru (UNIPOLAR-BOT) - plný krok s napájením 1 fáze



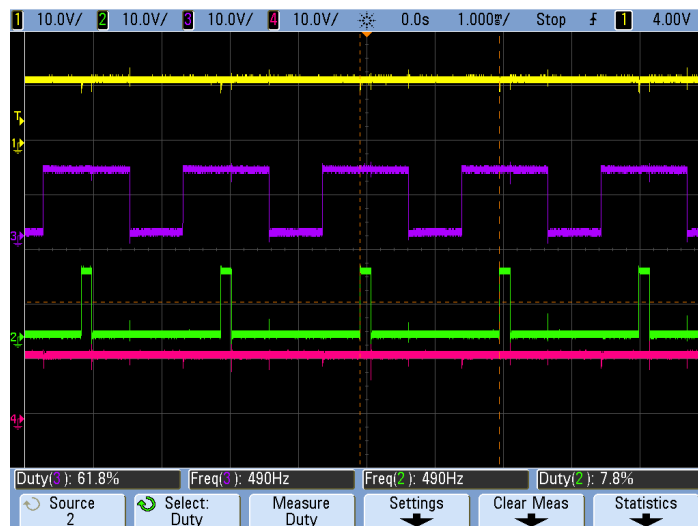
Obrázek 54 Unipolární zapojení motoru (UNIPOLAR-BOT) - plný krok s napájením 2 fází



Obrázek 55 Unipolární zapojení motoru (UNIPOLAR-BOT) - poloviční krok



Obrázek 56 Unipolární zapojení motoru (UNIPOLAR-BOT) - mikrokrokování (n = 4)



Obrázek 57 Unipolární zapojení motoru (UNIPOLAR-BOT) - mikrokrokování ( $n = 4$ ) - normální režim

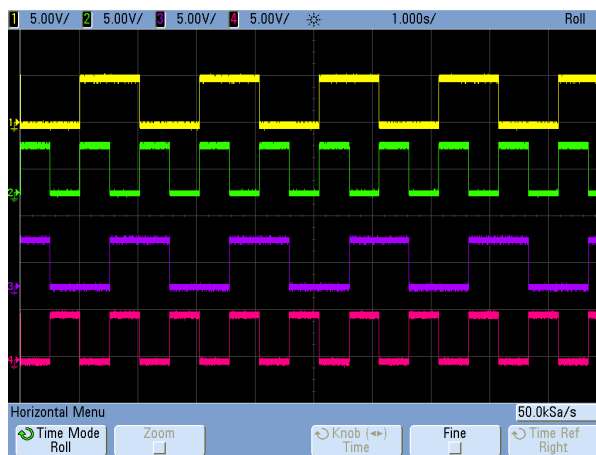
## 4.6 Výsledky měření na desce plošných spojů DPS\_SHIELD

K měření na desce plošných spojů DPS\_SHIELD byl použit osciloskop Agilent Technologies MSO6034A primárně v režimu vysokého rozlišení (High Resolution).

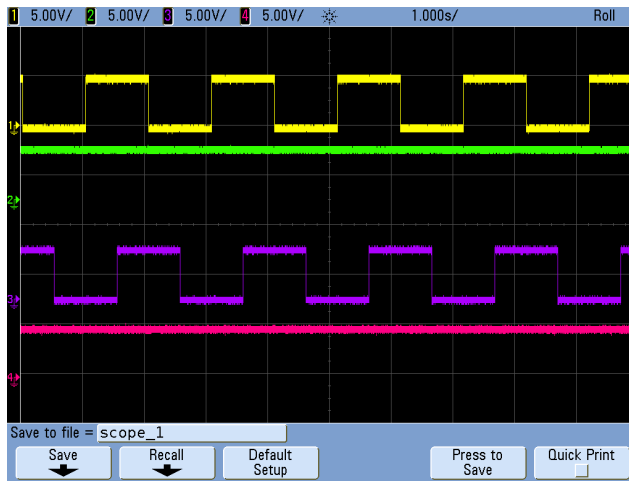
Při měření průběhů na desce plošných spojů DPS\_SHIELD byla použita běžná ("single ended") měřicí potenciály vůči zemi, jelikož jsou zde měřeny a zobrazovány průběhy signálů představující logické hodnoty (typu Boolean: 0, 1), jež dosahují buď nulových nebo kladných hodnot napětí. Na obrázcích 58 až 72 jsou zobrazeny průběhy těchto signálů:

DIRA (TP3) - žlutá sonda, PWMA (TP7) - zelená sonda,  
 DIRB (TP4) - modrá (fialová) sonda, PWMB (TP8) - červená sonda.

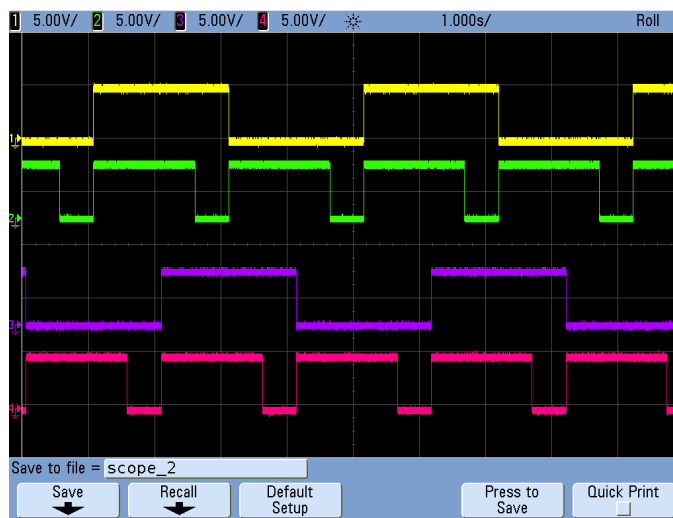
### 4.6.1 Bipolární zapojení motoru



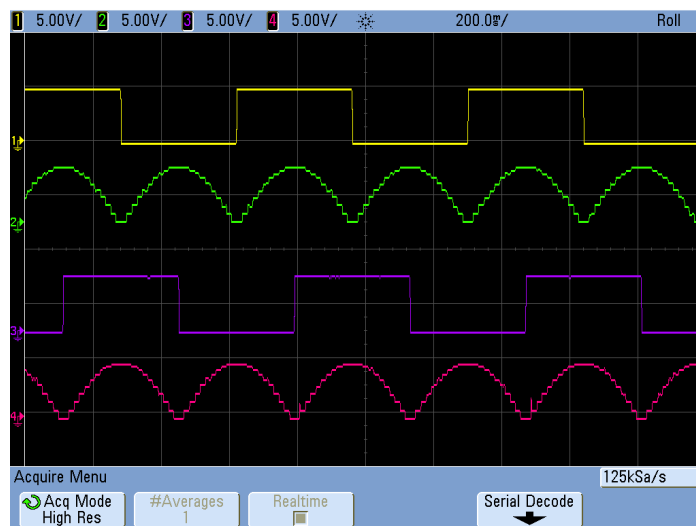
Obrázek 58 Bipolární zapojení motoru - plný krok s magnetizací 1 fáze



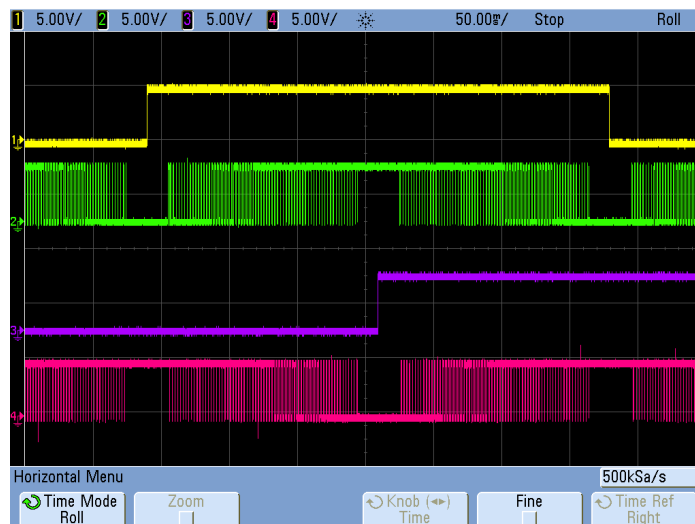
Obrázek 59 Bipolární zapojení motoru - plný krok s magnetizací 2 fází



Obrázek 60 Bipolární zapojení motoru - poloviční krok

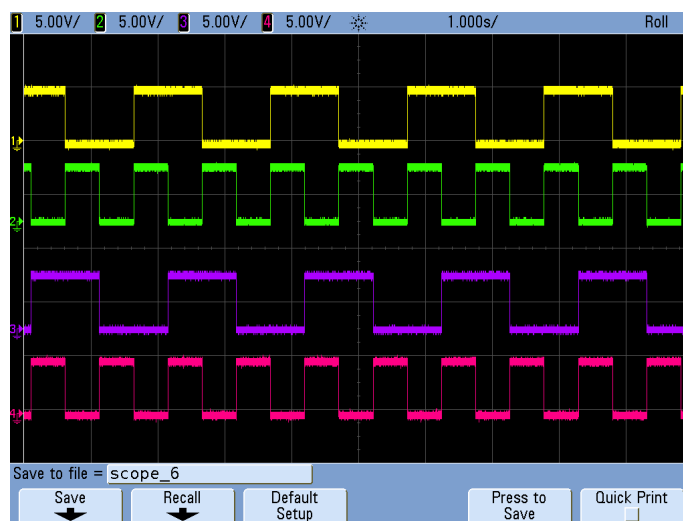


Obrázek 61 Bipolární zapojení motoru- mikrokrokování (n = 10)



Obrázek 62 Bipolární zapojení motoru - mikrokrokování ( $n = 10$ ) - normální režim osciloskopu

#### 4.6.2 Unipolární zapojení motoru - Unipolar-TOP

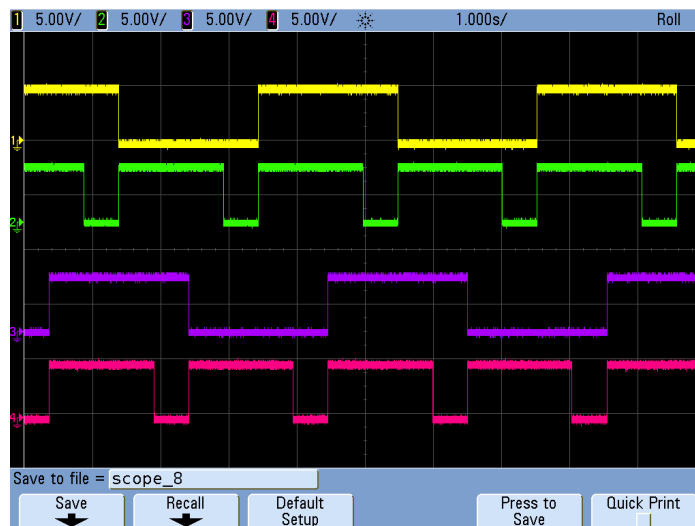


Obrázek 63 Unipolární zapojení motoru (Unipolar-TOP) - plný krok s magnetizací 1 fáze

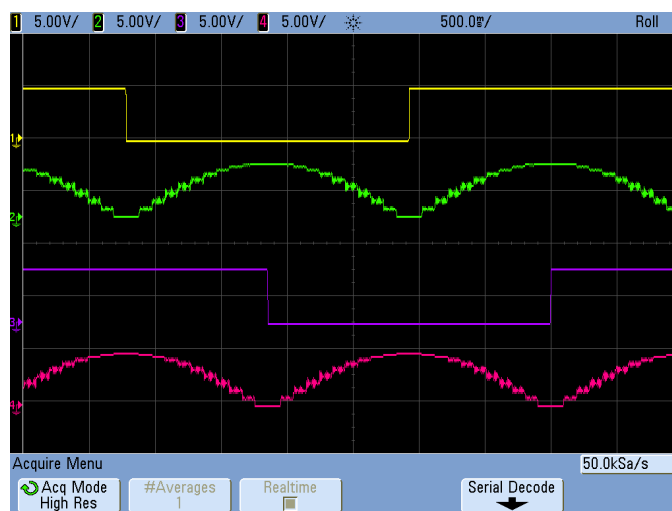


Obrázek 64 Unipolární zapojení motoru (Unipolar-TOP) - plný krok s magnetizací 2 fází





Obrázek 65 Unipolární zapojení motoru (Unipolar-TOP) - poloviční krok

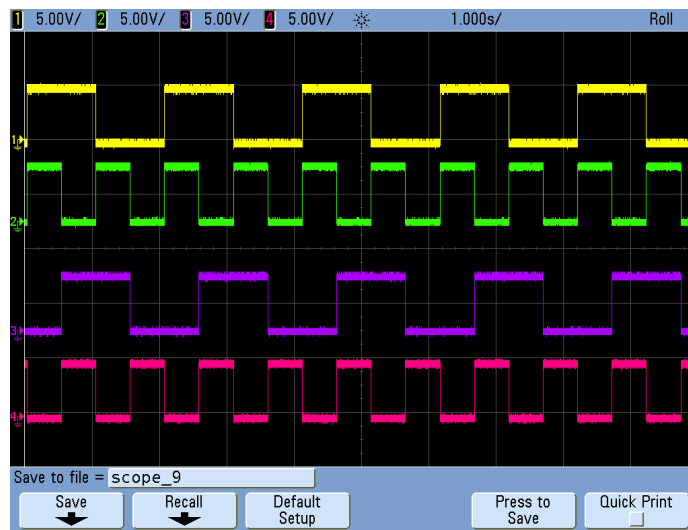


Obrázek 66 Unipolární zapojení motoru (Unipolar-TOP) - mikrokrokování (n = 10)

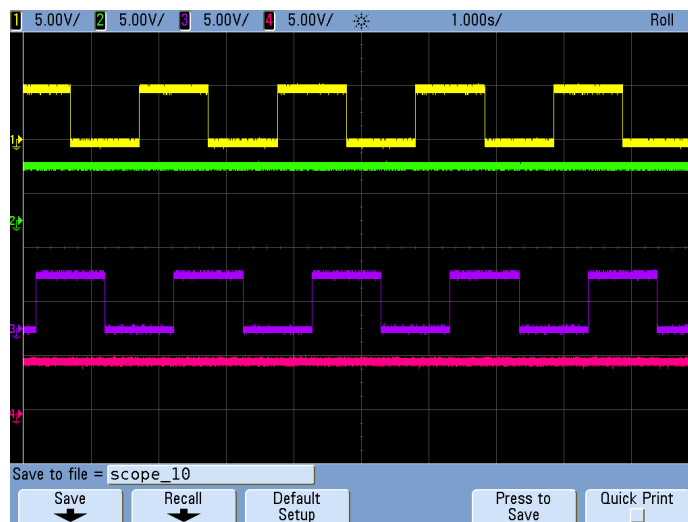


Obrázek 67 Unipolární zapojení motoru (Unipolar-TOP) - mikrokrokování (n = 10) - normální režim

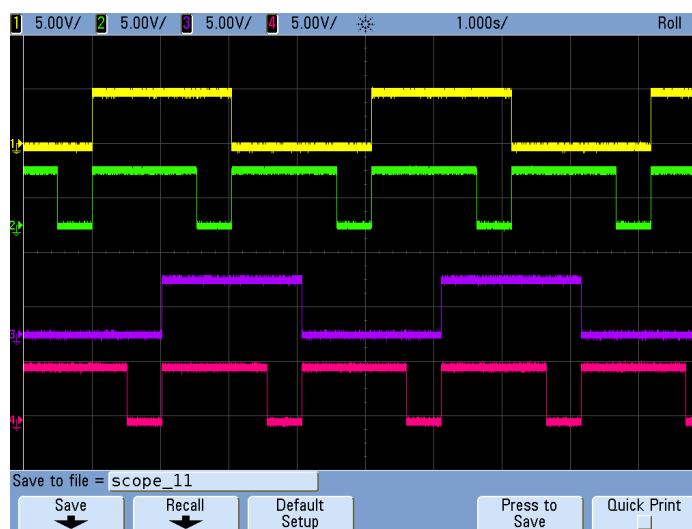
### 4.6.3 Unipolární zapojení motoru - Unipolar-BOT



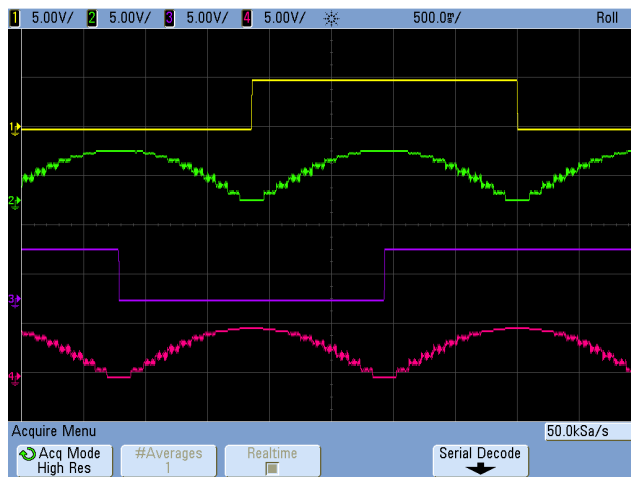
Obrázek 68 Unipolární zapojení motoru (Unipolar-BOT) - plný krok s magnetizací 1 fáze



Obrázek 69 Unipolární zapojení motoru (Unipolar-BOT)- plný krok s magnetizací 2 fází



Obrázek 70 Unipolární zapojení motoru (Unipolar-BOT) - poloviční krok

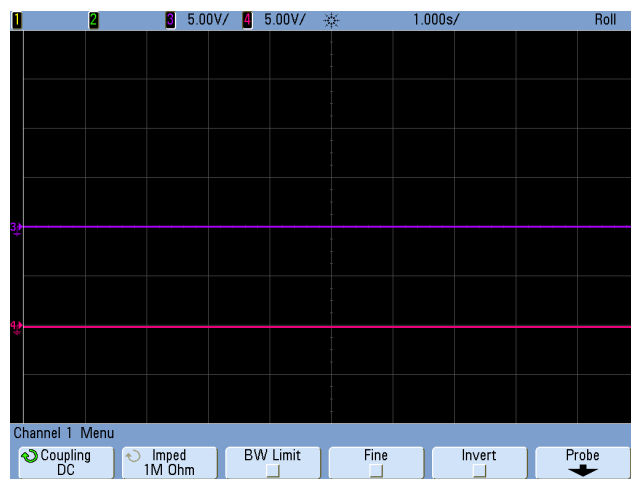


Obrázek 71 Unipolární zapojení motoru (Unipolar-BOT) - mikrokrokování (n = 10)



Obrázek 72 Unipolární zapojení motoru (Unipolar-BOT) - mikrokrokování (n = 10) - normální režim

Na obrázku 73 jsou ověřeny nulové hodnoty signálů BRAKEA (modrá sonda), BRAKEB (červená sonda) na Motor Shieldu (viz příloha B), které jsou trvale nulové bez ohledu na způsob zapojení či řízení, jak bylo ověřeno měřením. Na ukázkou byly na obrázku 73 měřeny průběhy při unipolárním zapojení motoru a plném kroku s napájením jedné fáze.



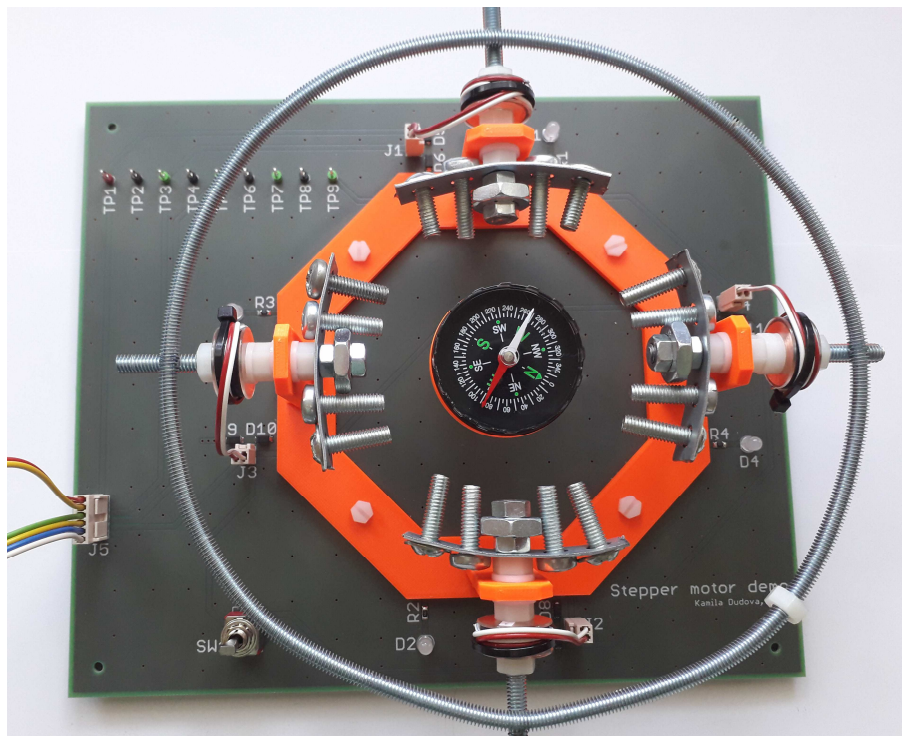
Obrázek 73 Unipolárním zapojení motoru (Unipolar-BOT) - signály BRAKEA, BRAKEB

## 4.7 Uzavření magnetického obvodu

Bylo provedeno několik pokusů o uzavření magnetického obvodu magneticky vodivým materiálem (s ohledem na nosnost konstrukce stanoviště), aby nedocházelo k úniku rozptylového magnetického toku do okolí.

Nejprve byl proveden pokus o uzavření magnetického obvodu pomocí závitové tyče stočené a spojené do kruhu (plastovou matičkou), resp. toroidu (viz obrázek 74). Použita byla stejná závitová tyč (o průměru 6 mm), která byla použita na jádra cívek, na nichž jsou cívky nasazeny a upevněny v konstrukci. Ve čtyřech místech, kde se kruh dotýká "závitových tyčí cívek", byly na spodní straně kruhu ze závitové tyče vyrobeny (pomocí pilníku) 4 prohlubně, aby došlo k "usazení kruhu" na konstrukci.

Kruh ze závitové tyče byl vyroben v různých velikostech (včetně menšího "vnitřního kruhu" umístěného na vnitřních stranách cívek), resp. s různým průměrem. Na obrázku 74 je zachycen pro ilustraci jeden z příkladů. K významnějšímu zlepšení průběhu v případě mikrokrokování však nedošlo.

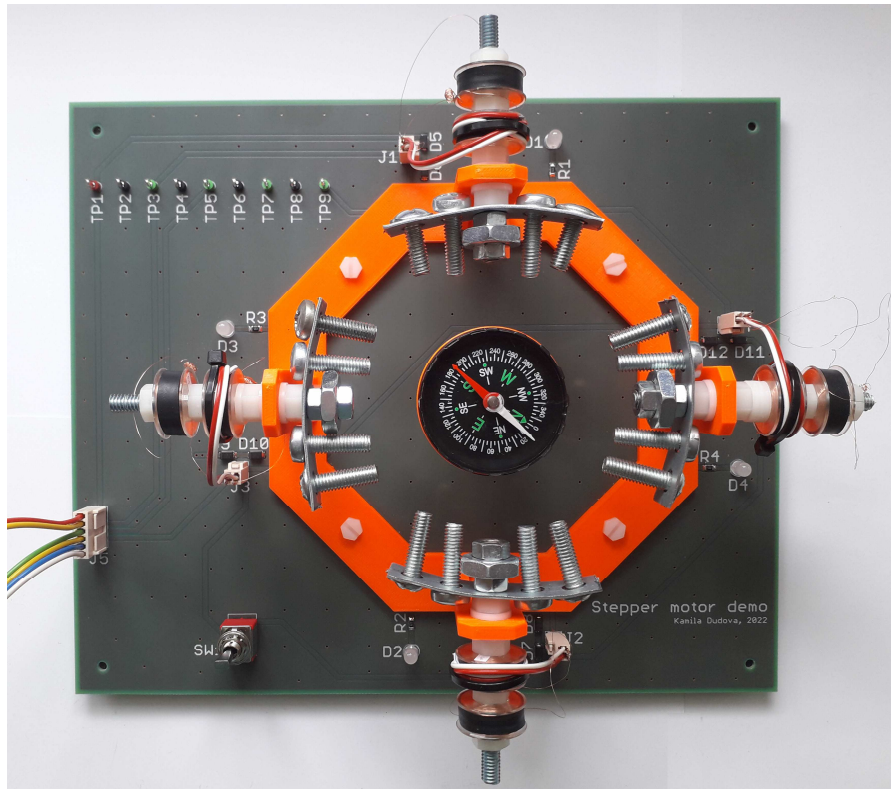


Obrázek 74 Uzavření magnetického obvodu magneticky vodivým materiálem ze závitové tyče

V dalších pokusech o uzavření magnetického obvodu byl použit kovový děrovaný pásek. Nejprve byl opět stočen do kruhu a oba konce spojeny kovovou matičkou a šroubkem skrze otvor v kovové pásce. Rovněž byl vyzkoušen jak menší "vnitřní kruh" umístěný na vnitřních stranách cívek uvnitř konstrukce, tak větší "vnější kruh" na vnějších stranách konstrukce. K znatelnému zlepšení opět nedošlo.

Nakonec byly nůžkami na plech ustřiženy 4 kratší části děrovaného kovového pásku (v délce přibližně 6 cm) sloužící jako pólové nástavce, které byly uchyceny na vnitřních koncích závitových tyčí

procházejících cívkami, pomocí kovové maticky, jak je vidět na obrázku 75. K zdatnému zlepšení opět nedošlo, a tak byly přidány na konce pólů kovové maticky a do otvorů v kovovém děrovaném pásku byly umístěny šroubky, co by pomocné póly. Byly zkoušeny různé varianty a kombinace umístění šroubků a maticek, ale k podstatnému zlepšení opět nedošlo.



Obrázek 75 Paralelní zapojení cívek na pólech

Jediného významnějšího zlepšení bylo dosaženo zesílením magnetického pole "zdvojením cívek" na pólech. Na každý pól konstrukce byla paralelně připojena ještě jedna cívka (viz obrázek 75). Každá z navinutých cívek (jak již bylo uvedeno výše) má stejnosměrný odpor 120  $\Omega$ . Při paralelním zapojení dvou cívek na každém pólu se také zmenšil celkový odpor dvou paralelně zapojených cívek na 60  $\Omega$  a došlo k nárůstu proudu. Výsledkem bylo zlepšení průběhu mikrokrokování u unipolárního zapojení vinutí (motoru). V případě bipolárního zapojení vinutí (motoru) však k významnějšímu zlepšení nedošlo.

## ZÁVĚR

Cílem práce bylo navržení stanoviště demonstrujícího princip fungování a řízení krokového motorku, konkrétně pro bipolární řízení na platformě Arduino.

V první části byla popsána teorie krokových motorků a systémů jejich řízení.

V praktické části bylo navrženo demonstrační stanoviště skládající se z nosné konstrukce vytištěné pomocí 3D tisku, navinutých cívek a kompasu sloužícího jako aktivní rotor s magnetickými póly. K řízení bylo použito platformy Arduino (Arduino UNO REV3 a Motor Shield REV3) a byly navrženy a vyrobeny dvě desky plošných spojů - deska pro krokový motor DPS\_STEPPER a deska s tlačítky pro spouštění jednotlivých režimů řízení a s potenciometrem pro regulaci rychlosti otáčení DPS\_SHIELD.

Vzhledem k charakteru navinutých cívek bylo třeba nosnou konstrukci sloužící k upevnění cívek a kompasu navrhnout a vytisknout na 3D tiskárně ještě před zahájením prvních praktických pokusů. Konstrukce proto byla navržena větší, ať je zde prostor pro experimentování a možnosti úprav výsledného provedení demonstračního stanoviště. Ve výsledku se ukázalo, že by stačily menší rozměry nosné konstrukce a následně také menší rozměry desky plošných spojů nesoucí tuto konstrukci.

Při realizaci praktické části se vyskytly problémy při sestavování stanoviště. Stěžejní bylo přesné nastavení vzájemné polohy cívek, závitových tyčí a kompasu. Při současném napájení 2 fází docházelo k nestandardnímu chování, kdy střelka kompasu nebyla v poloze uprostřed mezi oběma napájenými póly, ale jen kousek od jednoho z napájených pólů. Rozhodující roli zde hrál zřejmě magnetismus závitových tyčí a velká vzdálenost mezi sousedními póly, které mezi sebou svírají úhel 90°. Tento jev se podařilo částečně kompenzovat právě správným nastavením polohy a vzdáleností kompasu, cívek a zejména délky a vzdálenosti závitových tyčí od kompasu. Umístění cívek na vnější či vnitřní stranu nosné konstrukce nemělo na výsledek podstatný vliv, a proto byly cívky ponechány na vnější straně nosné konstrukce, jelikož tato pozice byla vhodnější pro připojení konců cívek do konektorů na desce, které jsou rovněž na vnější straně nosné konstrukce.

Byla provedena měření průběhů napětí jednotlivých fází na měřicích bodech desky plošných spojů DPS\_STEPPER při všech režimech řízení (plný krok s napájením 1 fáze, plný krok s napájením 2 fází, poloviční krok, mikrokrokování) a všech režimech zapojení motoru (unipolární - UNIPOLAR-TOP, UNIPOLAR-BOT, bipolární). Výsledky měření jsou uvedeny na obrázcích 44 až 57 a odpovídají teoretickým průběhům.

Při všech režimech řízení a zapojení motoru byly také proměřeny průběhy napětí na měřicích bodech navržené desky DPS\_SHIELD, na nichž jsou patrné průběhy logických signálů DIRA (IN1), DIRB (IN3), PWMA (EnA), PWMB (EnB) sloužící k ovládání H-můstků integrovaného obvodu L298 a Motor Shieldu (viz průběhy na obrázcích 58 až 72).

Na externím odporu byly změřeny průběhy budících pulzů při bipolárním a unipolárním zapojení motoru a změřeny velikosti časových konstant. Měřením byla zjištěna časová konstanta cívek při bipolárním zapojení motoru (vinutí tvoří 2 protilehlé cívky v sérii) o velikosti 800  $\mu$ s a při unipolárním zapojení motoru o velikosti 379  $\mu$ s.

Měřeními byly zjištěny doby trvání 1 smyčky programu pro jednotlivé režimy řízení. Dle očekávání byla naměřena nejdelší doba trvání 1 smyčky programu u režimu mikrokrokování, kde kód programu obsahuje výpočty goniometrických funkcí, a to o velikosti 325  $\mu$ s. Doby trvání u ostatních režimů řízení byly kolem 25  $\mu$ s.

Při realizaci, resp. při praktickém provozu a chodu "motoru", se vyskytly problémy v režimu mikrokrokování, kdy jednotlivé kroky nebyly rovnoměrné a neodpovídaly teoretickým předpokladům. Problémy nastávaly zejména v polohách přímo naproti pólům, kde byly mezi jednotlivými kroky jen nepatrné rozdíly.

Bylo provedeno několik variant pokusů o uzavření magnetického obvodu motoru, pomocí magneticky vodivého materiálu, avšak nevedly k významnějšímu zlepšení uvedeného nerovnoměrného průběhu při mikrokrokování.

Přínosné bylo zesílení magnetického pole zdvojením cívek na pólech při paralelním zapojení dvou cívek na každém pólu. Výsledkem bylo jisté zlepšení průběhu mikrokrokování, ale jen v případě unipolárního zapojení motoru. V případě bipolárního zapojení motoru byl efekt opět zanedbatelný.

Další možností kompenzace nerovnoměrného průběhu při mikrokrokování by mohlo být "zadávaní hodnot tabulkou", kdy by standardně vypočtené hodnoty goniometrických funkcí pro mikrokrokování byly na základě experimentování upraveny.

Problémy u mikrokrokování při aktuálním provedení stanoviště jsou zřejmě způsobeny velkou vzdáleností mezi sousedními póly ( $90^\circ$ ) a zejména také velkou vzdáleností mezi cívkami, resp. póly motoru a kompasem (reprezentujícím aktivní rotor). Vzdálenost je příliš velká a dochází tak k velkému rozptýlení magnetického toku. K nápravě by bylo zapotřebí zřejmě více fází nebo pólů vinutí, silnější cívky a zejména zmenšení vzdálenosti mezi póly motoru a kompasem. Zajímavostí ale bylo, že při přepnutí na unipolární zapojení vinutí, byl tento problém u mikrokrokování mnohem menší.

Další možností pokračování v této práci a rozvíjení tématu je zobrazení výsledků na monitoru Arduina nebo použití ESP32 s možností ovládní pomocí WiFi a Bluetooth. Další možností pro zpracování je také provedení a demonstrace unipolárního řízení krokových motorků, kde by bylo možno použít např. budič krokových motorků s tranzistorovým polem ULN2003. K unipolárnímu řízení by byl zapotřebí pasivní rotor pracující na reluktančním principu.

## Použité zdroje

- [1] WEIDAUER, Jens a Richard MESSER. *Electrical drives: principles, planning, applications, solutions*. Erlangen: Publicis Publishing, [2014]. ISBN 978-3-89578-434-7.
- [2] TAN, Kok Kiong a Andi Sudjana PUTRA. *Drives and control for industrial automation*. 1st edition. New York: Springer Verlag, c2011. Advances in industrial control. ISBN 978-1-84882-425-6.
- [3] PISKAČ, Luděk. *Elektrické pohony: principy a funkce*. 2., upr. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008. ISBN 978-80-7043-688-2.
- [4] Flajtingr, Jiří. Kule Lumír. *Elektrické pohony se střídavými motory a polovodičovými měniči*. 2., upr. vyd.. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2005. 142 s. ISBN 80-7043-354-X (brož.)
- [5] BARTOŠ, Václav. *Teorie elektrických strojů*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 80-7043-509-7.
- [6] Neborák, I. *Servopohony malých výkonů: Učební texty pro kombinované a distanční studium*. VŠB-TU Ostrava. MIKROKROKOVÁNÍ x HYBRIDNÍ MOTOR
- [7] ŘEZAČ, Kamil. *robotika.cz* [online]. 2002, [cit. 10. března 2022]. Dostupne na WWW: <<http://robotika.cz/articles/steppers/cs>>
- [8] NOVÁK, Petr. *Experimentální metody v mechatronice* [online]. Ostrava: VŠB – TUO, 2007 [cit. 2022-02-08]. ISBN 978-80-248-1631-9.
- [9] KŮS, Václav. *Elektrické pohony a výkonová elektronika*. Druhé vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2016. ISBN 978-80-261-0639-5.
- [9] MAROSCZYK, Marek. *Úlohy snímání a řízení otáčení pomocí PLC*. Ostrava, 2014. [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/handle/10084/104647>. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí bakalářské práce: Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Ivo Špička, Ph.D.
- [10] ŘEHÁK, Jakub. *Návrh a realizace vybraných pohonů s krokovými motorky* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2020-02-12]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/92976>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Václav Sládeček, Ph.D.
- [11] BURIAN T. *Kalibrační přípravek pro spirometr*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 44s. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Vyroubal, Ph.D
- [12] BÁRTA, František. *Řízení krokového motorku injekčního dávkovače*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 55 s. Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Milan Chmelař, CSc.
- [13] JAVŮREK, Jiří. *Regulace moderních elektrických pohonů*. Praha: Grada Publishing, 2003. ISBN 80-247-0507-9.
- [14] HÄBERLE, Heinz O. *Průmyslová elektronika a informační technologie*. Přeložil Jiří HANDLÍŘ. Praha: Europa-Sobotáles, 2003. ISBN 80-86706-04-4.

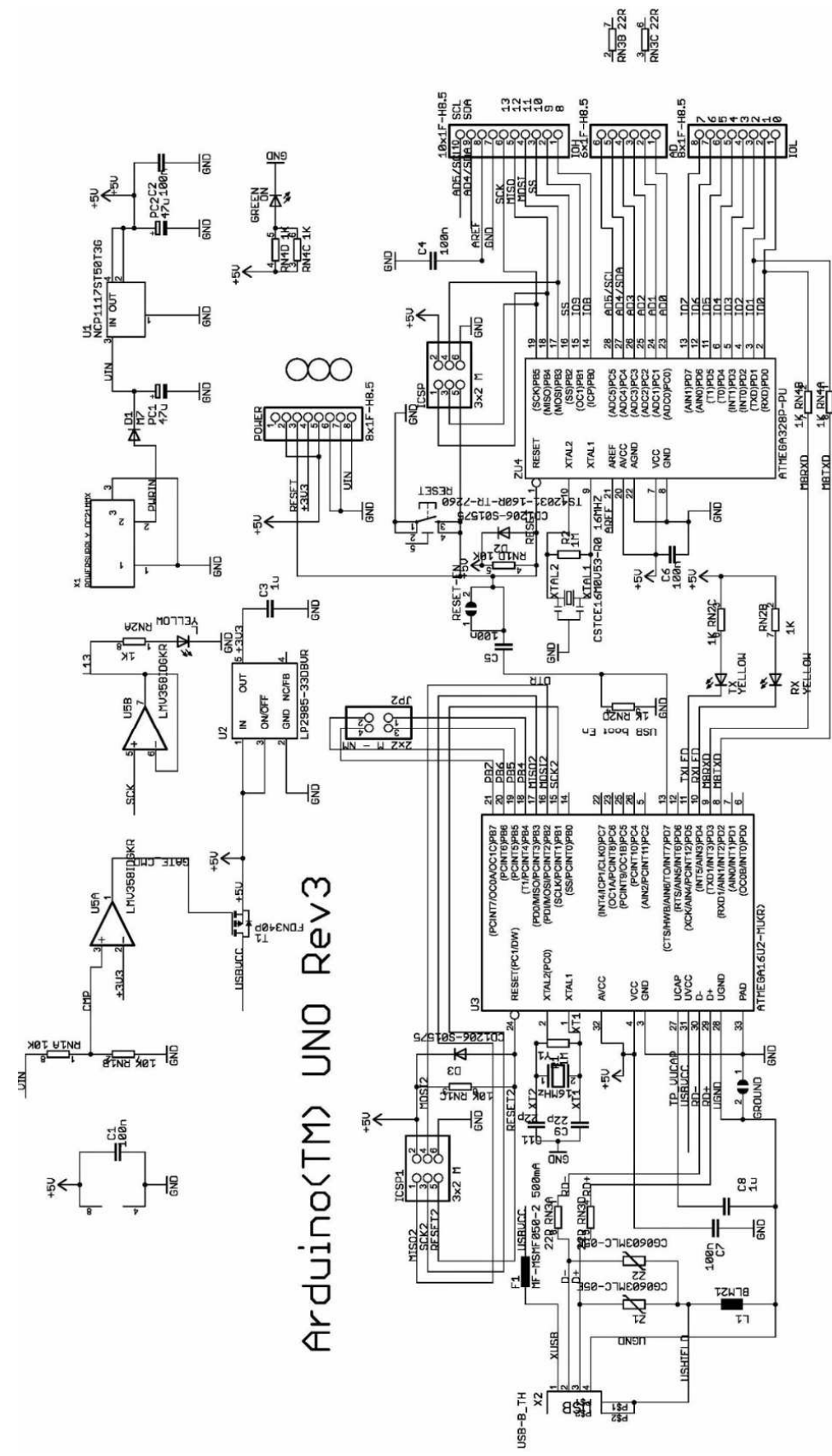


- [15] Internetový portál ARDUINO [online] [cit. 2022-04-20] Dostupné z: <<http://arduino.cc>>
- [16] VODA, Zbyšek. Průvodce světem Arduina. Bučovice: Martin Stříž, 2015. ISBN 978-80-87106-90-7.
- [17] Arduino Uno - dokumentace. [online] [cit. 2022-04-24] Dostupné z:  
< <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno> >
- [18] Motor Shield Rev 3. [online] [cit. 2022-04-28] Dostupné z:  
< <https://docs.arduino.cc/hardware/motor-shield-rev3> >
- [19] Integrovaný obvod L298. [online] [cit. 2022-04-24] Dostupné z:  
< <https://www.st.com/en/motor-drivers/l298.html> >
- [20] Palacký, P., Prauzek, M.: Číslicová a mikroprocesorová technika. Učební texty pro kombinované a distanční studium. VŠB-TU Ostrava, 2013.
- [21] 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S+ [online] [cit. 2022-04-20] Dostupné z: <[www.prusa3d.com](http://www.prusa3d.com)>
- [22] Vývojové diagramy - SW draw.io - verze 19.0.3. [software] [cit. 2022-06-20] Dostupné z:  
< <https://draw.io> > Dostupné také z: < <https://app.diagrams.net/> >
- [23] Osciloskop Agilent Technologies MSO6034A - Manuál. [online] [cit. 2022-07-04] Dostupné z:  
< <https://www.manualslib.com/manual/1339816/Agilent-Technologies-Mso6012a.html?page=261#manual> >
- [24] Kijonka, J. a kol.: Studijní opory předmětu Teorie obvodů II. VŠB TU Ostrava, 2006.
- [25] Elektrické schéma Arduino UNO Rev3. [online] [cit. 2022-07-04] Dostupné z:  
< <https://electrosome.com/wp-content/uploads/2014/07/Arduino-Uno-R3-Schematic-Diagram.jpg> >
- [26] Elektrické schéma Motor Shieldu Rev3. [online] [cit. 2022-07-04] Dostupné z:  
< <https://docs.arduino.cc/static/8a72fae47a56558ca26308105253350e/schematics.pdf> >

# PŘÍLOHY

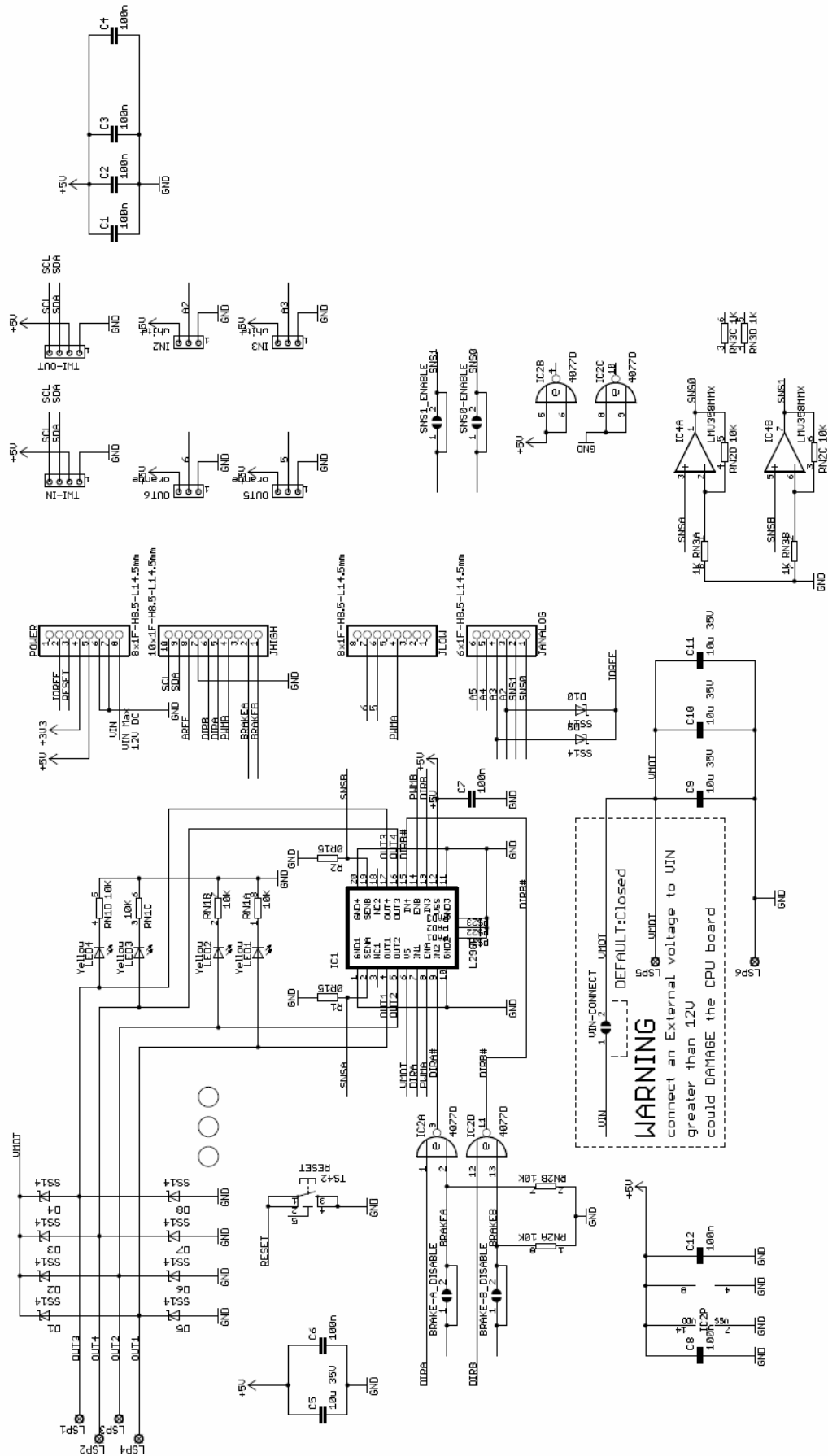
Příloha A Elektrické schéma Arduino UNO Rev3 .....	I
Příloha B Schéma Motor shieldu REV3 .....	II
Příloha C Výkres součásti Compass_support v programu Inventor.....	III
Příloha D Výkres součásti Compass_support_plug v programu Inventor.....	IV
Příloha E Výkres součásti Coil_hinge v programu Inventor.....	V
Příloha F Elektrické schéma navržené desky DPS_STEPPER v programu Eagle.....	VI
Příloha G Elektrické schéma navržené desky DPS_SHIELD v programu Eagle.....	VII
Příloha H Seznam součástek desky DPS_STEPPER.....	VIII
Příloha I Seznam součástek desky DPS_SHIELD.....	IX
Příloha J Vývojový diagram řízení chodu programu .....	X
Příloha K Vývojový diagram pro plný krok s napájením 1 fáze .....	XI
Příloha L Vývojový diagram pro plný krok s napájením 2 fází.....	XII
Příloha M Vývojový diagram pro poloviční krok .....	XIII
Příloha N Vývojový diagram pro mikrokrokování.....	XIV

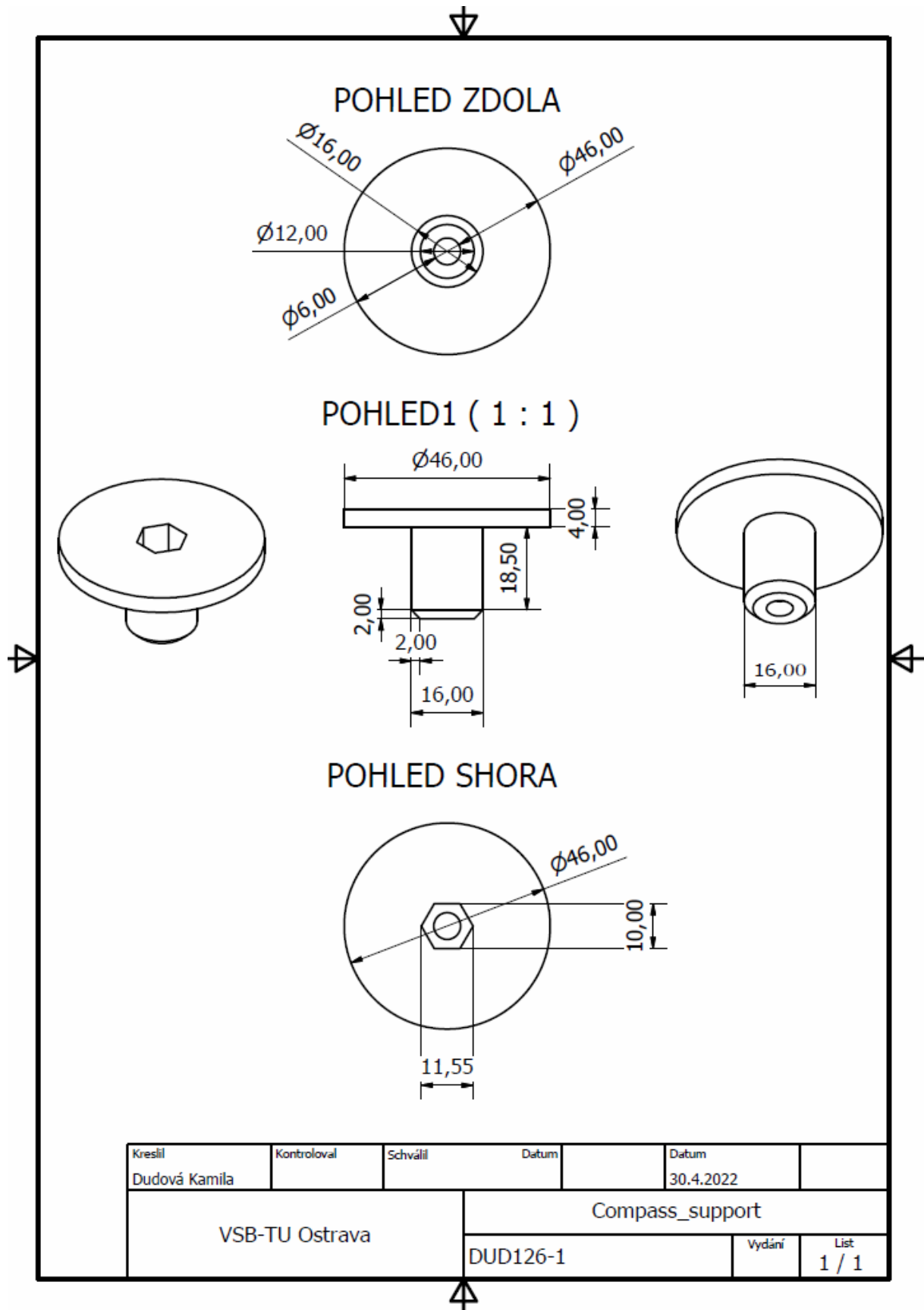
Příloha A Elektrické schéma Arduino UNO Rev3 [25]



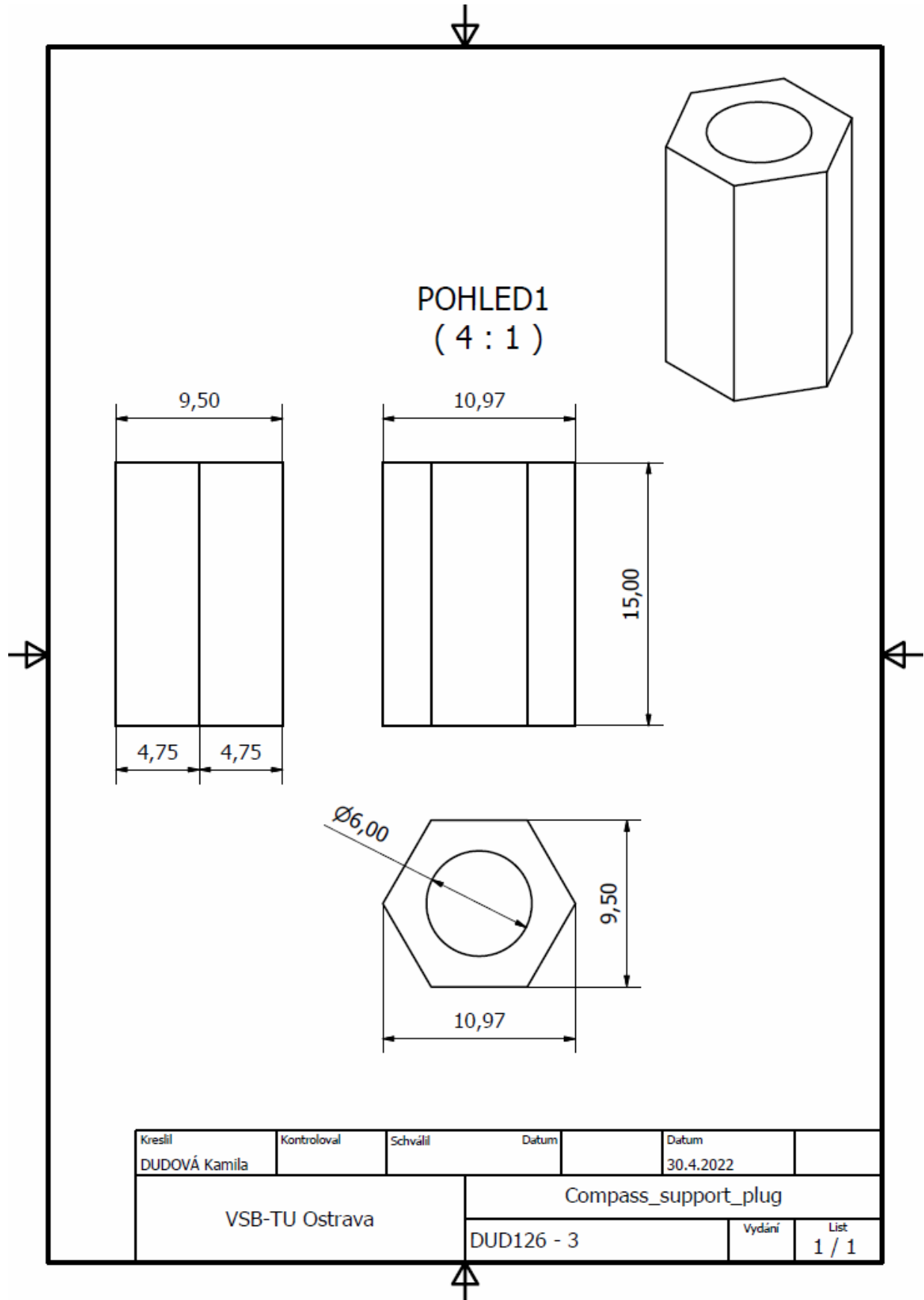
7  
 RN3B 22R  
 3  
 RN3C 22R

# Příloha B Schéma Motor shieldu REV3 [26]

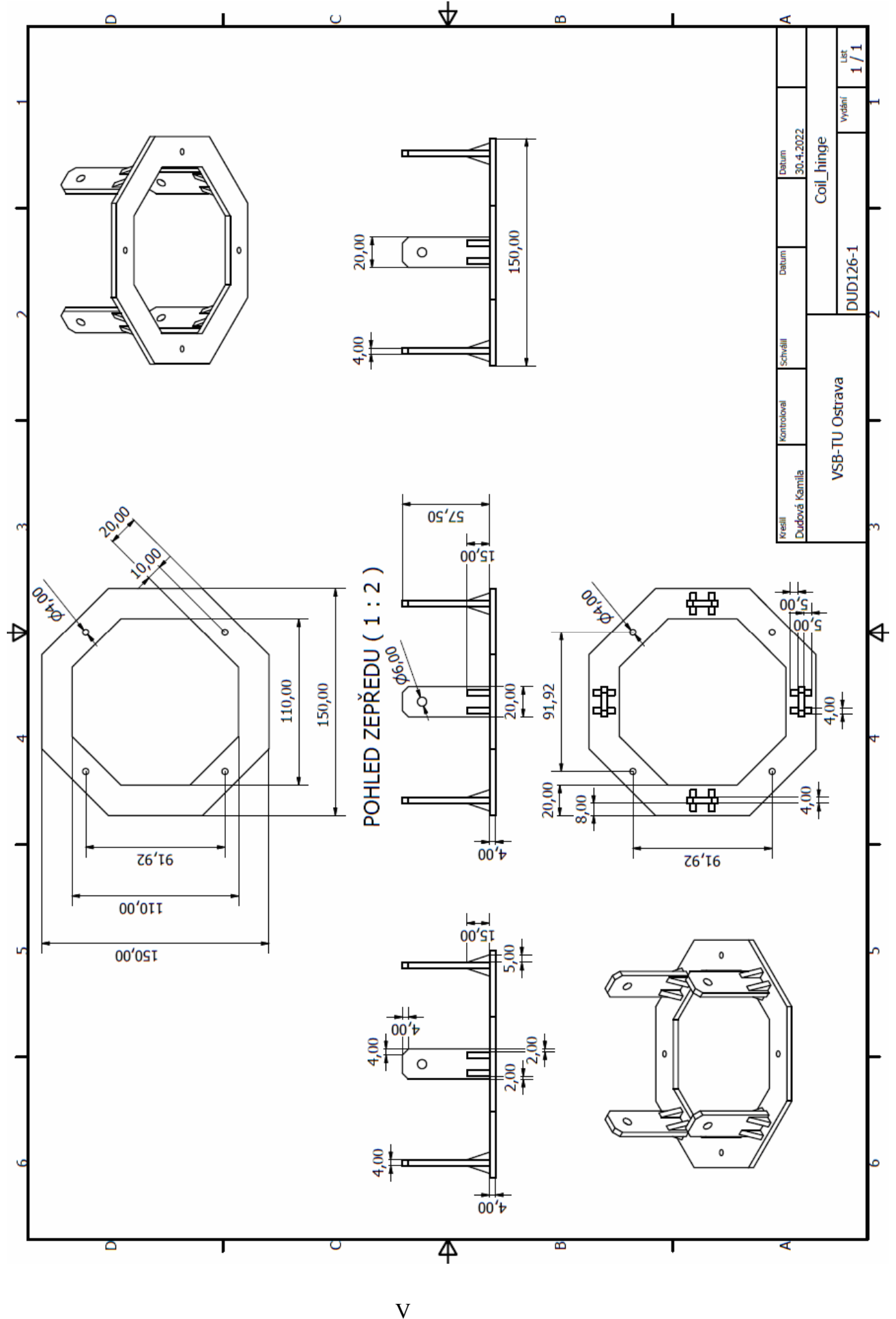




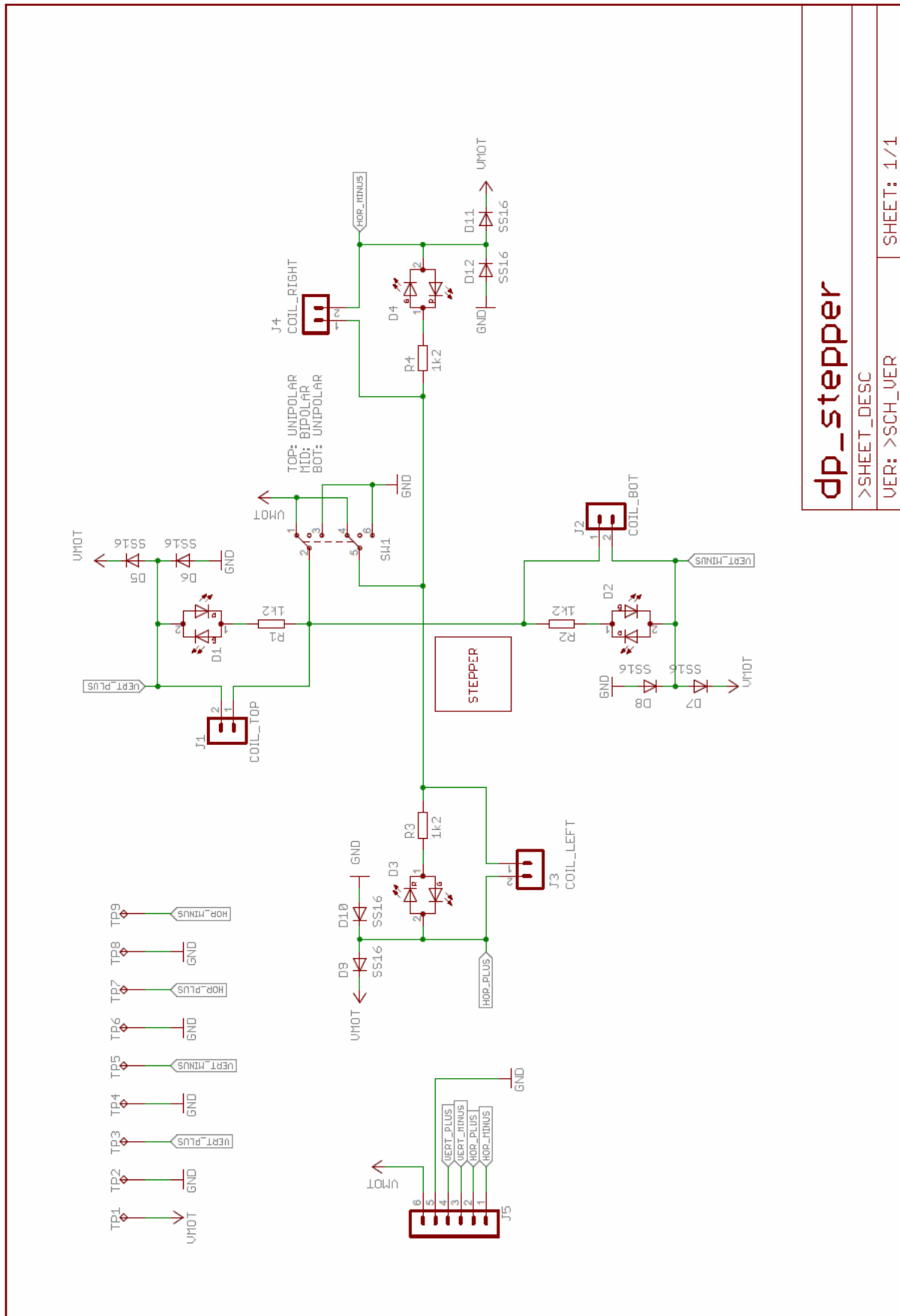
Příloha D Výkres součásti Compass\_support\_plug (vytvořeno v SW Inventor)



Příloha E Výkres součásti Coil\_hinge (vytvořeno v SW Inventor)



Příloha F Schéma navržené desky DPS\_STEPPER (vytvořeno v SW Eagle)



dp\_stepper

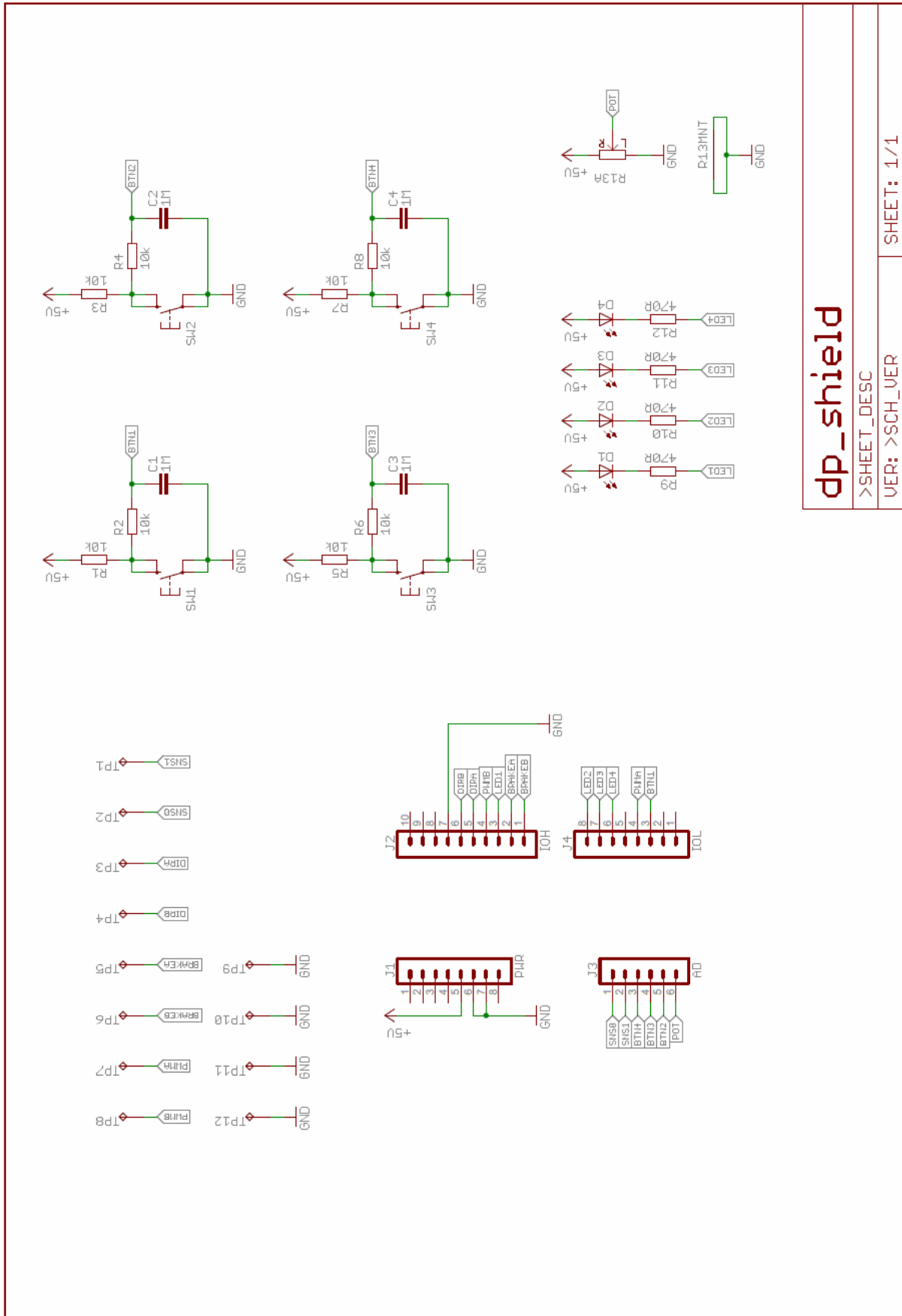
>SHEET\_DESC

VER: >SCH\_VER

SHEET: 1/1



**Příloha G Schéma navržené desky DPS\_SHIELD (vytvořeno v SW Eagle)**



**dps\_shield**

>SHEET\_DESC

VER: >SCH\_VER

SHEET: 1/1

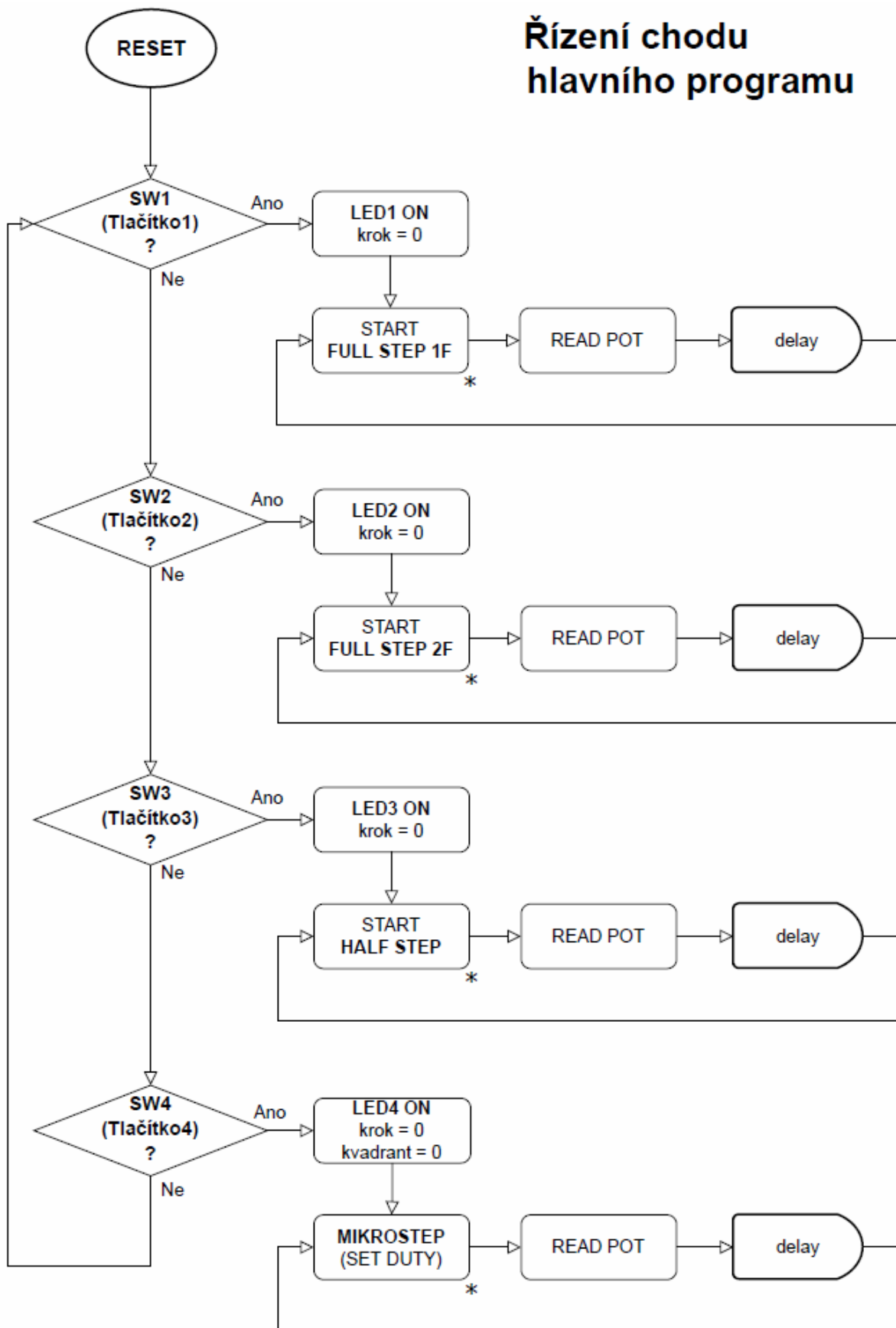
## Příloha H Seznam součástek desky DPS\_STEPPER (vytvoreno v SW Eagle)

<u>Součástka</u>	<u>Hodnota</u>	<u>Pouzdro</u>
D1		WP57EGW
D2		WP57EGW
D3		WP57EGW
D4		WP57EGW
D5	SS16	SMA_DIODE
D6	SS16	SMA_DIODE
D7	SS16	SMA_DIODE
D8	SS16	SMA_DIODE
D9	SS16	SMA_DIODE
D10	SS16	SMA_DIODE
D11	SS16	SMA_DIODE
D12	SS16	SMA_DIODE
J1	COIL_TOP	
J2	COIL_BOT	
J3	COIL_LEFT	
J4	COIL_RIGHT	
R1	1k2	1206
R2	1k2	1206
R3	1k2	1206
R4	1k2	1206
SW1		1MD3T6B11M2QES
TP1		TESTPOINT
TP2		TESTPOINT
TP3		TESTPOINT
TP4		TESTPOINT
TP5		TESTPOINT
TP6		TESTPOINT
TP7		TESTPOINT
TP8		TESTPOINT
TP9		TESTPOINT

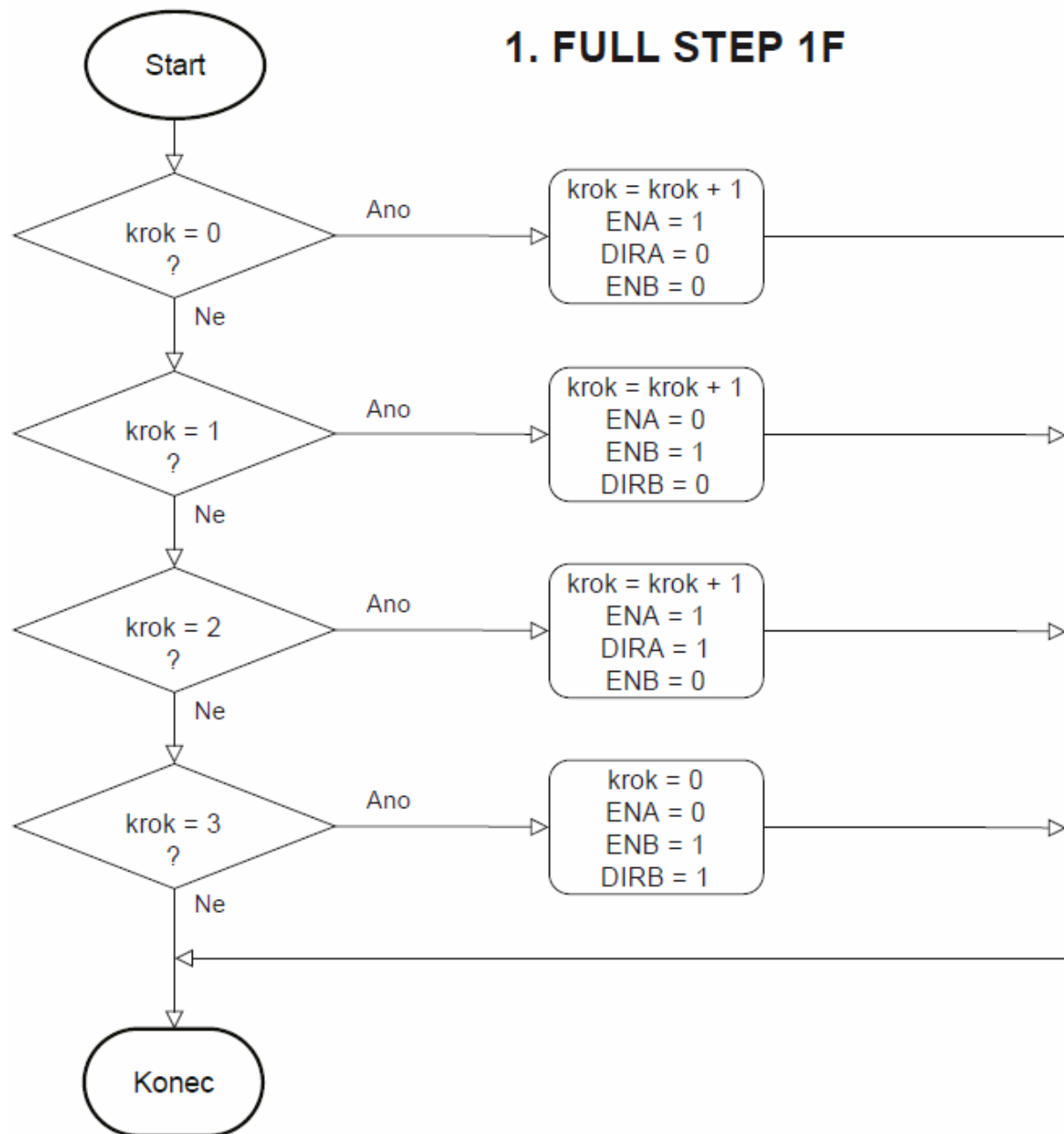
## Příloha I Seznam součástek desky DPS\_SHIELD (vytvořeno v SW Eagle)

<b>Součást</b>	<b>Hodnota</b>	<b>Pouzdro</b>
C1	1M	0805
C2	1M	0805
C3	1M	0805
C4	1M	C-0805
D1	LED	LED0805
D2	LED	LED0805
D3	LED	LED0805
D4	LED	LED0805
J1	PWR	PINHD1X08
J2	IOH	PINHD1X10
J3	AD	PINHD1X06
J4	IOL	PINHD1X08
R1	10k	0805
R2	10k	0805
R3	10k	0805
R4	10k	0805
R5	10k	0805
R6	10k	0805
R7	10k	0805
R8	10k	0805
R9	470R	0805
R10	470R	0805
R11	470R	0805
R12	470R	0805
R13	RK9K	RK09K
SW1		BUTTON
SW2		BUTTON
SW3		BUTTON
SW4		BUTTON
TP1		TESTPOINT
TP2		TESTPOINT
TP3		TESTPOINT
TP4		TESTPOINT
TP5		TESTPOINT
TP6		TESTPOINT
TP7		TESTPOINT
TP8		TESTPOINT
TP9		TESTPOINT
TP10		TESTPOINT
TP11		TESTPOINT
TP12		TESTPOINT

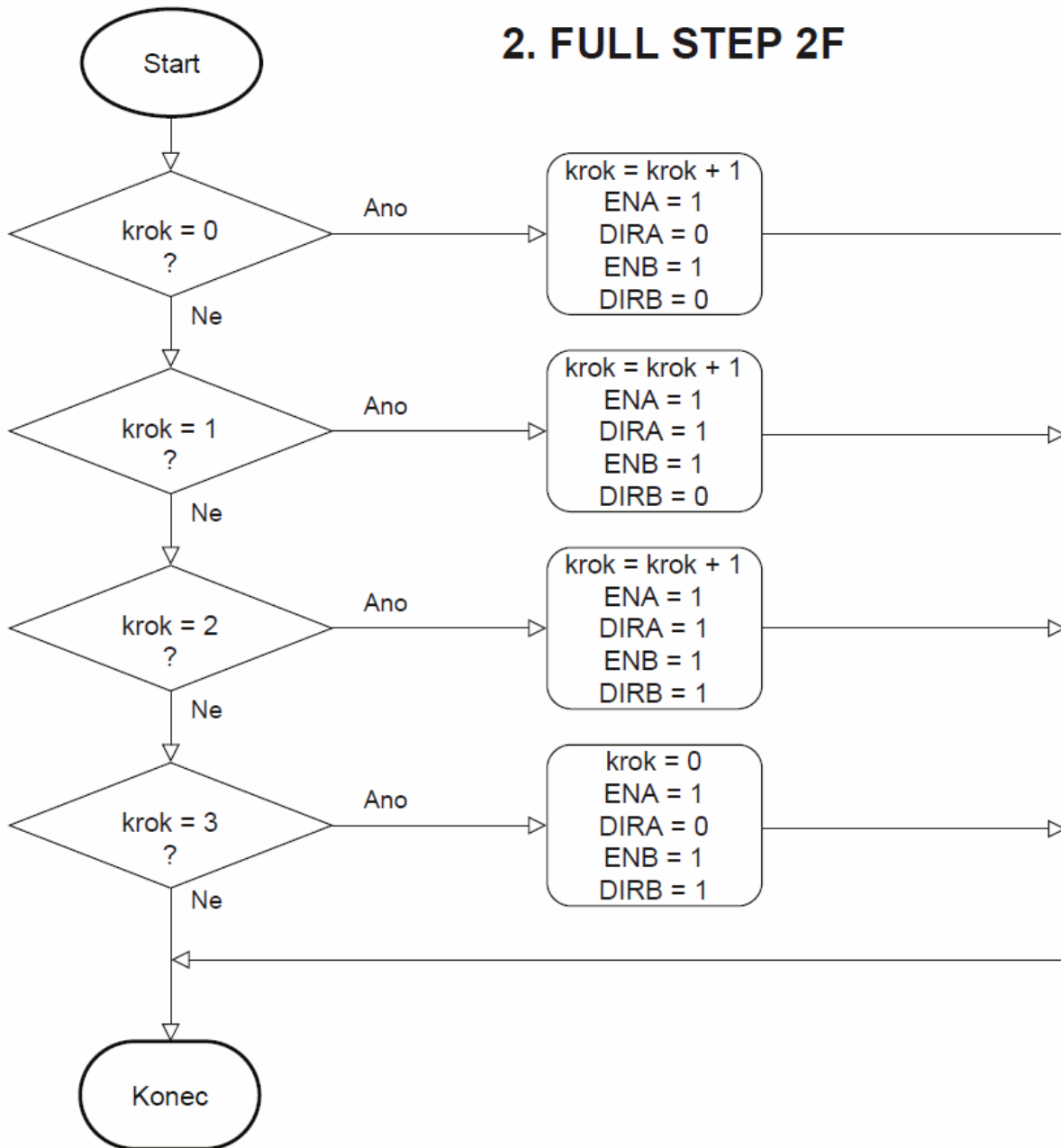
## Řízení chodu hlavního programu

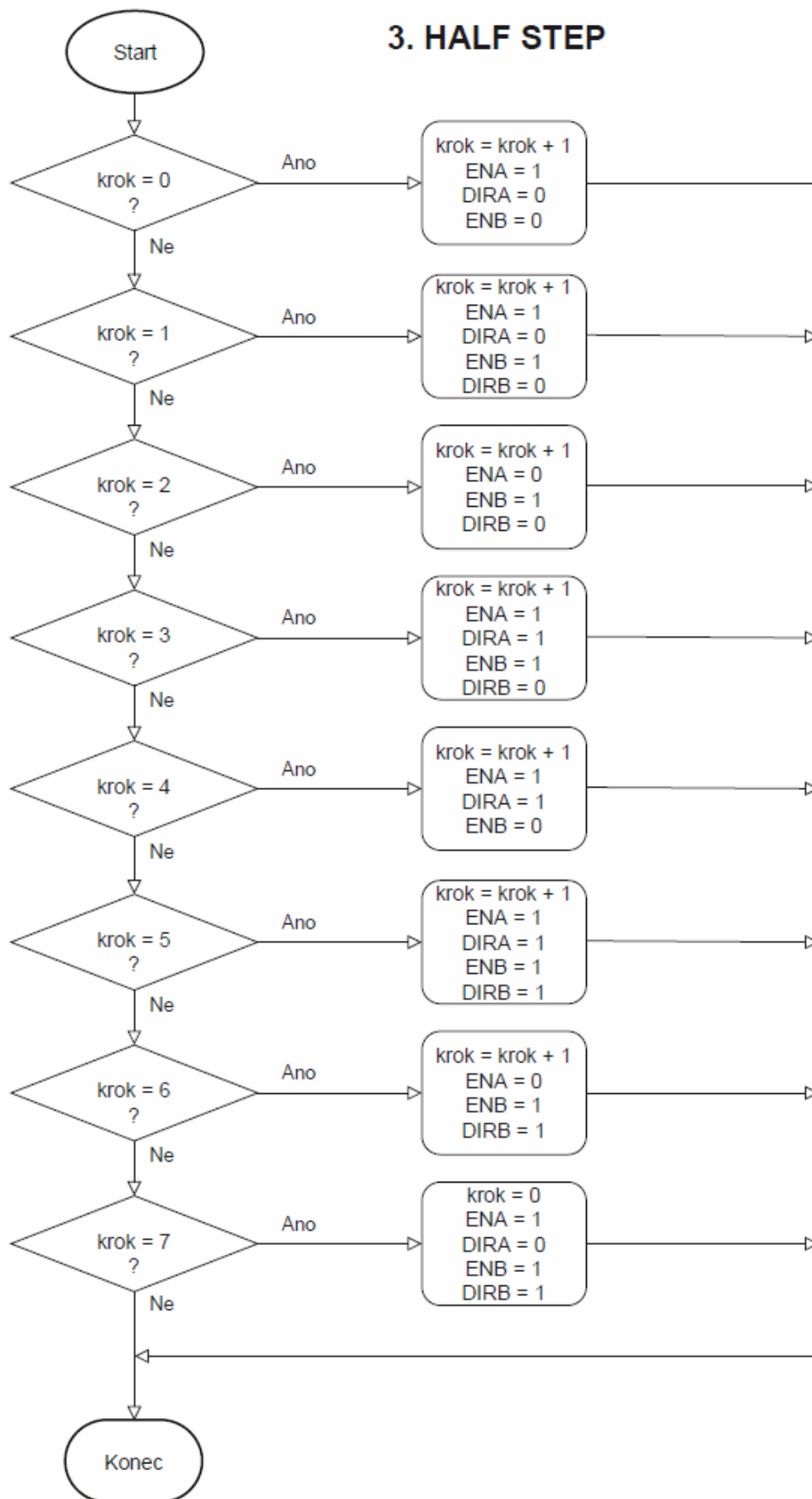


\* ZMĚNA POZICE MOTORU



## 2. FULL STEP 2F





### 4. MIKROSTEP

