

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrických pohonů a trakce

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Řízení krokového motoru pomocí platformy TI

Autor práce: Daniel Madara

Vedoucí práce: Ing. Jan Bauer, Ph.D.

2016/2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Madara** Jméno: **Daniel** Osobní číslo: **434941**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Řízení krokového motoru pomocí platformy TI

Název bakalářské práce anglicky:

Control of Stepper Motor by TI Microprocessor

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popište stavbu krokových motorů
- 2) Prostudujte a popište způsoby řízení krokových motorů
- 3) Navrhněte strukturu měniče pro realizaci zvolené řídicí strategie krokových motorů
- 4) Ověřte funkčnost návrhu pomocí mikroprocesoru od firmy TI

Seznam doporučené literatury:

- [1] Lettl J., Cerovsky Z., Pavelka J. ? Vykonova elektronika, skripta CVUT FEL
- [2] Javurek J. ? Regulace moderních elektrických pohonů, Grada
- [3] Pavelka, J., Zdenek, J., - Elektrické pohony a jejich řízení. 1. vyd., Praha, CVUT, 2010.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Bauer Ph.D., katedra elektrických pohonů a trakce FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **09.05.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.06.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

18.5
Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotace:

Tato bakalářská se zabývá krokovými motory, jejich druhy, principem fungování a především řízením těchto motorů. Způsoby řízení jsou podrobně popsány z několika hledisek včetně grafického znázornění buzení fází během unipolárního a bipolárního řízení. Uvedeny jsou také základní řídicí obvody pro různé druhy motorů. Úkolem práce bylo také navrhnout jednoduchý driver na řízení krokového motoru, sestavit ho a následně ověřit jeho funkčnost pomocí mikroprocesoru od firmy Texas Instruments.

Annotation:

This bachelor thesis deals with stepper motors, their types, working principle and primarily with control of these motors. Methods of driving are described in detail with graphical illustration of phase switching during unipolar and bipolar control. Basic control circuits for control of various types of stepper motors are mentioned as well. The aim of this thesis was also to design a simple driver for stepper motor control, build it and verify its functionality using a microprocessor by Texas Instruments.

Klíčová slova:

krokový motor, unipolární řízení, bipolární řízení, mikrokrokování, moment, h-můstek

Keywords:

stepper motor, unipolar control, bipolar control, microstepping, torque, h-bridge

Prohlášení o samostatném zpracování práce

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne:

Podpis:

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Bauerovi, Ph.D. za účinnou odbornou pomoc a cenné rady a připomínky k bakalářské práci.

Obsah

Úvod.....	8
1. Stavba krokových motorů.....	9
1.1. Krokový motor s permanentním magnetem.....	9
1.2. Krokový motor s proměnnou reluktancí.....	10
1.3. Hybridní krokový motor.....	11
2. Způsoby řízení krokových motorů.....	14
2.1. Způsoby řízení z hlediska způsobu zapojení.....	14
2.1.1. Motor se 4 vodiči.....	14
2.1.2. Motor s 5 vodiči.....	15
2.1.3. Motor se 6 vodiči.....	15
2.1.4. Motor s 8 vodiči.....	15
2.2. Způsoby řízení z hlediska způsobu omezení proudu.....	16
2.2.1. Řízení L/R.....	16
2.2.2. Řízení L/nR.....	17
2.2.3. Řízení s PWM.....	17
2.3. Způsoby řízení z hlediska buzení fází.....	18
2.3.1. Řízení unipolárních krokových motorů.....	18
2.3.1.1. Řízení s celým krokem a buzením jedné fáze.....	18
2.3.1.2. Řízení s celým krokem a buzením dvou fází.....	19
2.3.1.3. Řízení s polovičním krokem.....	19
2.3.1.4. Mikrokrokování.....	20
2.3.2. Řízení bipolárních krokových motorů.....	21
2.3.2.1. Řízení s celým krokem a buzením jedné fáze.....	21
2.3.2.2. Řízení s celým krokem a buzením dvou fází.....	21
2.3.2.3. Řízení s polovičním krokem.....	22
2.3.2.4. Mikrokrokování.....	22
2.4. Řídicí obvody krokových motorů.....	23
2.4.1. Obvod pro unipolární řízení.....	23
2.4.2. Obvod pro bipolární řízení.....	24
2.4.3. Obvod pro řízení motoru s proměnnou reluktancí.....	25
3. Použité vybavení.....	26
3.1. Krokový motor.....	26

3.2.	Mikrokontrolér a vývojová deska	27
3.3.	Nepájivé kontaktní pole	27
4.	Zapojení pro provoz použitého krokového motoru	28
4.1.	Obvod	28
4.2.	Princip fungování obvodu.....	29
4.3.	Způsob omezení proudu.....	30
4.4.	Použité součástky	32
5.	Program.....	33
5.1.	Použité prostředky mikrokontroléru	33
5.1.1.	Vstupy a výstupy.....	33
5.1.2.	Časovače	34
5.1.3.	AD převodník	34
5.2.	Režimy programu	34
5.2.1.	Řízení s celým krokem	34
5.2.2.	Řízení s polovičním krokem	35
5.2.3.	Řízení mikrokrokováním	35
5.2.4.	Režim otočení	35
5.3.	Vývojový diagram	36
5.3.1.	Spuštění programu	36
5.3.2.	Běh programu.....	37
6.	Ověření funkčnosti návrhu	39
6.1.	Řízení s celým krokem	39
6.2.	Řízení s polovičním krokem	41
6.3.	Řízení mikrokrokováním	42
6.4.	Fotografie sestrojeného obvodu	43
	Závěr	44
	Seznam použité literatury	45
	Seznam symbolů a zkratk	46
	Seznam obrázků	47
	Seznam tabulek.....	48
	Příloha: zdrojový kód řídicího programu	49

Úvod

Krokový motor je bezkartáčový synchronní elektrický motor, který se otáčí po diskretních úsecích, které se nazývají kroky. Po každé změně buzení fází se krokový motor otočí právě o jeden krok, který má určitou velikost. Z tohoto důvodu lze dosáhnout otočení motoru o daný úhel, a proto se používají v aplikacích, kde je potřeba přesně nastavovat polohu nebo rychlost otáčení. Krokové motory nalezneme např. ve starších pevných discích, tiskárnách, skenerech, CD mechanikách a CNC strojích, tedy číslicově řízených strojích. Obecně se jedná o motory malých výkonů.

Mezi výhody krokových motorů patří velký moment při rozběhu a malých otáčkách, nízká cena, jednoduchá konstrukce, velká životnost a malé nároky na údržbu. Poslední dvě výhody jsou dány tím, že k mechanickému kontaktu nedochází jinde než v ložisku. Naopak nevýhody tohoto druhu motoru jsou nízká účinnost, velký proud naprázdno, špatný poměr výkonu vůči své hmotnosti, pokles momentu při vyšších rychlostech a s tím související riziko ztráty kroku.

Krokové motory ke své činnosti potřebují řídicí obvod. Návrh takového obvodu obsahuje kapitola 4.1. Je to obvod pro bipolární řízení tvořen dvěma h-můstkami. Tento obvod bude řízen pomocí mikrokontroléru F28027 a vývojové desky LaunchPad od Texas Instruments. Úkolem práce je navrhnout, sestavit a ověřit funkčnost řídicího obvodu na motoru od firmy Microcon SX17-1005.

1. Stavba krokových motorů

Rozlišujeme tři druhy krokových motorů: motor s permanentním magnetem, motor s proměnnou reluktancí, nebo také reluktanční, a hybridní motor, který je kombinací dvou předchozích druhů.

Krokové motory se po každé změně buzení fází otočí o úsek zvaný krok. Velikost jednoho kroku vypočítáme jako:

$$\Delta\Phi = \frac{360^\circ}{m \cdot N} [^\circ] \quad (1)$$

kde $\Delta\Phi$ je velikost kroku jako úhel, o který se motor otočí, m je počet fází statoru a N je počet zubů (pólů) rotoru.

Počet kroků na otáčku n se pohybuje v rozmezí 4 až 400. Běžně používané jsou motory s rozlišením 200 kroků na otáčku. Rozlišení n se často vyjadřuje jako velikost jednoho kroku $\Delta\Phi$. Vztah mezi těmito dvěma veličinami je následující:

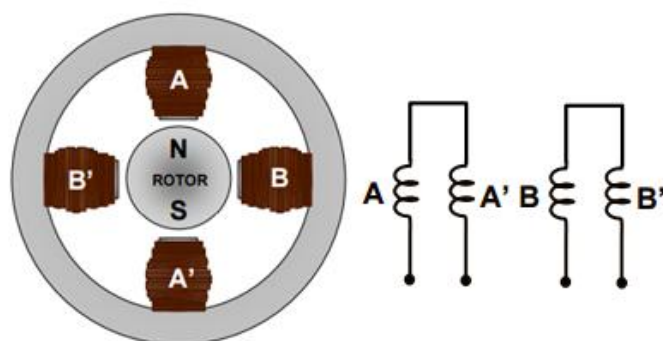
$$n = \frac{360^\circ}{\Delta\Phi} = m \cdot N [-] \quad (2)$$

Větší rozlišení motoru má za následek menší rychlost nebo moment. Motory s vysokým rozlišením začnou ztrácet moment při nižších rychlostech než motory srovnatelné velikosti s nižším rozlišením. Tento pokles je způsoben konečnou rychlostí nárůstu proudu vinutím. Podrobněji je tato problematika popsána v kapitole 2.2.

1.1. Krokový motor s permanentním magnetem

Tento druh krokového motoru je také označován jako motor s aktivním rotorem. Jak již název napovídá, rotor tohoto druhu motoru je tvořen permanentním magnetem a na rozdíl od motoru s proměnnou reluktancí nemá zuby. To znamená, že rotor má pouze dva póly – severní a jižní pól permanentního magnetu – z čehož plyne malé rozlišení motoru. Použití permanentního magnetu v rotoru znamená vyšší intenzitu magnetického toku, což má za následek lepší momentové charakteristiky než u motoru s proměnnou reluktancí.

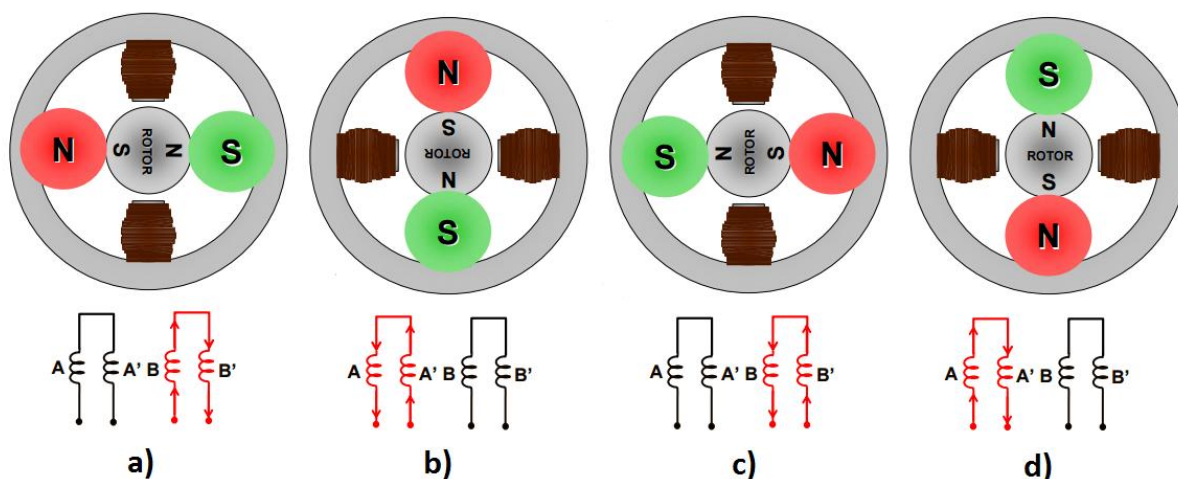
Na Obr. 1 je jednoduché schéma dvoufázového motoru s permanentním magnetem. Obě vinutí jsou rozdělena na dvě části, označené A, A' a B, B'. Na každém pólu motoru je navinuta jedna z těchto dvou částí.



Obr. 1: Krokový motor s permanentním magnetem [1]

Po dosažení do výše uvedených vztahů dostaneme velikost kroku $\Delta\Phi = 90^\circ$ a počet kroků na otáčku $n = 4$.

Princip otáčení tohoto motoru je vidět na Obr. 2. V části a) obrázku je buzena pouze fáze B, směr proudu je takový, že severní pól je na obrázku vlevo a jižní pól vpravo. Permanentní magnet se natočí tak, aby vzdálenost mezi opačnými póly rotoru a statoru byla co nejmenší. V části b) je aktivní pouze fáze A. Rotor se otočí po směru hodinových ručiček o 90° . V části c) je buzena stejná fáze jako v část a), ale směr proudu je opačný, takže i magnetické pole bude mít opačnou polaritu a rotor se opět pootočí o 90° . To samé platí i o části d) vzhledem k b). Vzhledem k tomu, že při otáčení tohoto motoru se střídají oba směry proudu, jedná se o bipolární řízení. Buzena je vždy jedna fáze, tudíž je použito řízení s celým krokem a buzením jedné fáze, popsané v kapitole 2.3.2.1.

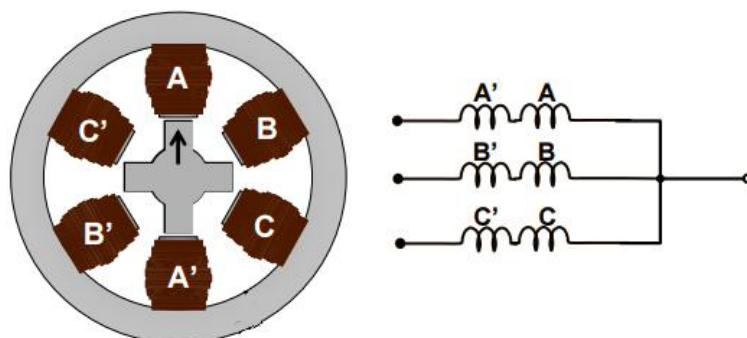


Obr. 2: Princip motoru s permanentním magnetem [1]

1.2. Krokový motor s proměnnou reluktancí

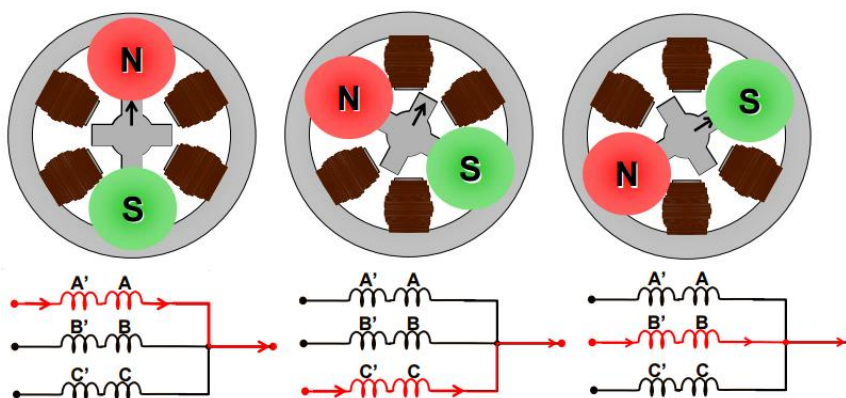
Tento druh je také označován jako krokový motor s pasivním rotorem nebo reluktanční krokový motor. Jeho rotor je vytvořen z magneticky měkkého materiálu a má vyniklé póly, které jsou často označovány jako zuby. Stator se skládá ze svazků ocelových plechů s několika pólovými nástavci, na kterých jsou vinutí jednotlivých fází. Počet pólů rotoru a statoru se musí lišit, aby se motor točil. Mezi pólovými nástavci statoru a zuby rotoru je velmi malá vzduchová mezera.

Stavba reluktančního krokového motoru je na Obr. 3. Tento typ motoru má tři fáze na statoru a čtyři póly, neboli zuby, na rotoru. Vinutí jsou stejně jako u motoru s permanentním magnetem rozdělena na dvě části. Jeden konec všech vinutí je spojen a připojen k jednomu pólu napájecího zdroje. Druhý konec každého vinutí je připojen ke spínači, kterým je nejčastěji výkonový tranzistor. U tohoto motoru je velikost kroku $\Delta\Phi = 30^\circ$ a počet kroků na otáčku $n = 12$.



Obr. 3: Krokový motor s proměnnou reluktancí [1]

Princip tohoto motoru je vysvětlen podle Obr. 4. V levé části obrázku teče proud fází A. Po vypnutí fáze A a současném sepnutí fáze C se rotor natočí o 30° po směru hodinových ručiček. Natočení rotoru je způsobeno tím, že motor se snaží dosáhnout stavu, ve kterém je odpor magnetického obvodu co nejmenší. To znamená, že se natočí tak, aby vzduchová mezera mezi rotorem a aktivním pólem statoru byla co nejmenší. Tento stav nastane tehdy, když je zub rotoru natočen přímo naproti pólu statoru. Reluktanční krokové motory nepotřebují změnu toku proudu a polarity magnetického pole. Směr otáčení motoru je dán pořadím, ve kterém jsou spínány jednotlivé fáze.



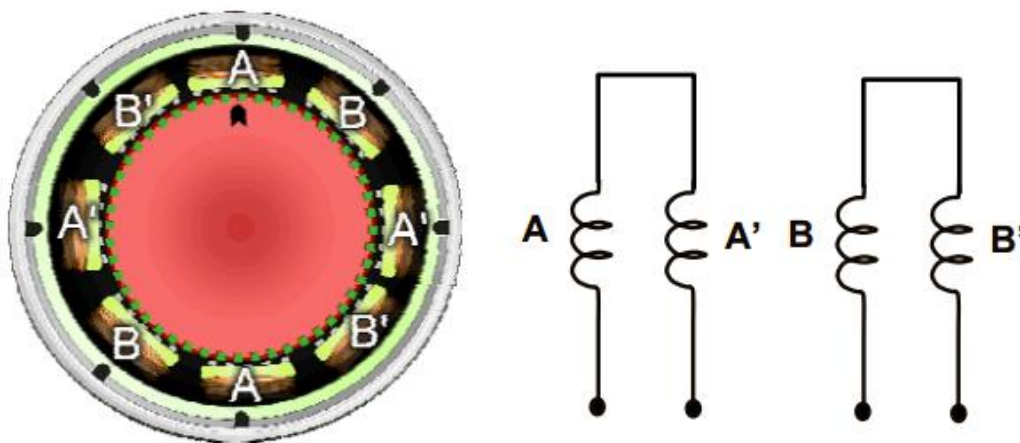
Obr. 4: Princip motoru s proměnnou reluktancí [1]

1.3. Hybridní krokový motor

Hybridní krokový motor je kombinací motorů s permanentním magnetem a proměnnou reluktancí. Jejich rotor je axiálně uložený permanentní magnet, na jehož koncích (severním a jižním pólu) jsou připevněny feromagnetické pólové nástavce s vyniklými póly (zuby). Tyto zuby jsou na každém nástavci uspořádány tak, aby se při pohledu zepředu střídaly zuby na severním pólu a na jižním pólu.

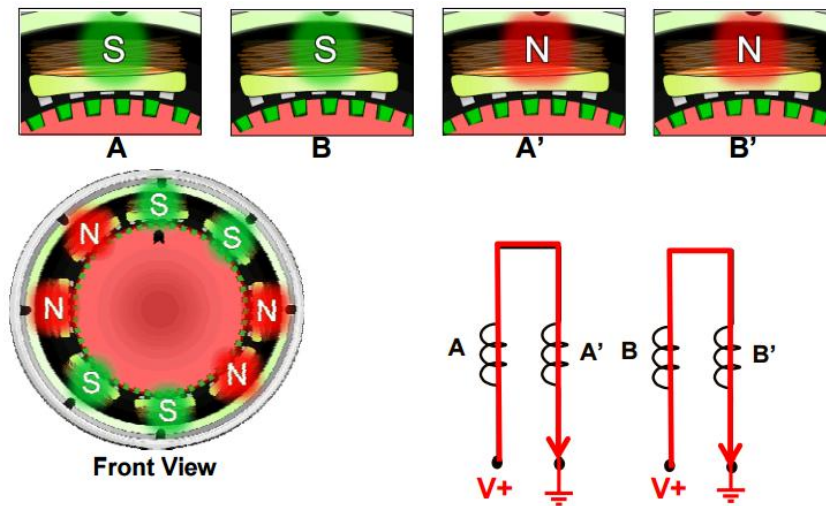
Hybridní motory mají v porovnání s předchozími dvěma typy nejlepší vlastnosti, jako například malá velikost kroku a nejlepší statické a dynamické momentové charakteristiky, ale jsou také nejdražší a konstrukčně nejsložitější. V současné době jsou nejpoužívanějším druhem krokových motorů.

Na Obr. 5 vidíme stavbu hybridního krokového motoru. Tento dvoufázový motor má na statoru osm pólů, takže na jednu fázi připadají čtyři póly. Sousední póly jsou vždy z opačné fáze. Vinutí na jednotlivých pólech jsou navinuta tak, že protější póly mají vždy stejný magnetický pól. Na rotoru jsou zuby připevněné k jižnímu pólu permanentního magnetu zelené, zuby připevněné k severnímu pólu jsou červené, ale nejsou vidět, protože na obrázku jejich barva splývá s barvou rotoru.



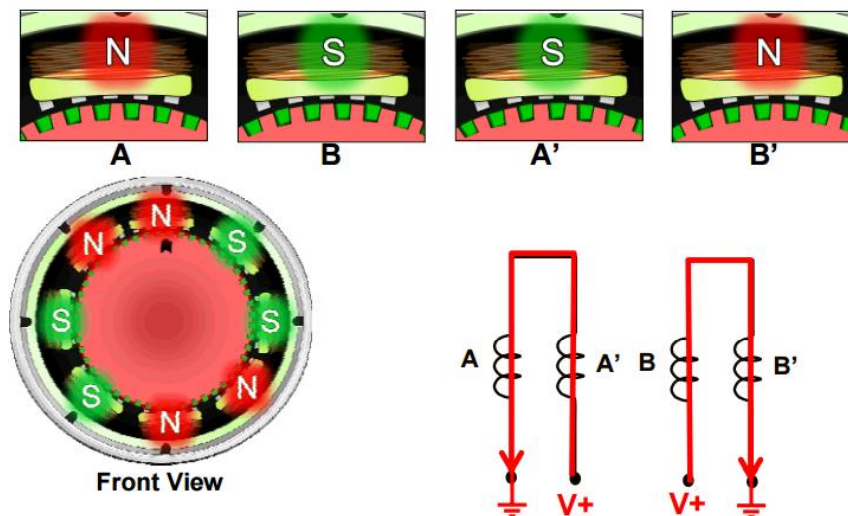
Obr. 5: Hybridní krokový motor [1]

Princip fungování hybridního krokového motoru bude vysvětlen na následujících obrázcích. Na Obr. 6 jsou aktivní obě fáze. V levé části obrázku je označena magnetická polarita všech pólů a v pravé části směr toku proudu v obou fázích. V horní části obrázku je vidět vzájemná poloha zubů rotoru a statoru. Zatímco u pólů patřících k fázi A jsou zuby přesně naproti sobě. U pólů fáze B jsou natočeny zuby o polovinu šířky zubu vedle, tudíž pól statoru odpuzuje zuby na jednom pólovém nastavci, zatímco zuby na druhém pólovém nastavci přitahuje a tím se snaží otočit rotorem ve směru hodinových ručiček.



Obr. 6: Princip hybridního krokového motoru 1 [1]

Na dalším obrázku se změnil stav motoru tím, že byla obrácena polarita napětí fáze A, následkem toho se změnil směr proudu v této fázi a z tohoto důvodu došlo k obrácení polarity čtyř pólů připojených k této fázi. Fáze B zůstala ve stejném stavu jako na předchozím obrázku. Motor se otočil ve směru hodinových ručiček o jeden krok a vzájemná poloha zubů rotoru a statoru je opačná. To znamená, že zuby u pólů na fázi B jsou proti sobě, zatímco zuby u pólů na fázi A jsou pootočený.



Obr. 7: Princip hybridního krokového motoru 2 [1]

Pro další otáčení motoru je třeba obrátit polaritu fáze B, následně fáze A a potom opět polaritu fáze B. Tento způsob řízení, kdy jsou v jednom okamžiku aktivní vždy obě fáze a proud teče celou fází v různých směrech, je bipolární řízení s celým krokem a buzením dvou fází. Pořadí spínání fází tohoto způsobu řízení je graficky znázorněno v kapitole 2.3.2.2.

2. Způsoby řízení krokových motorů

Řízení krokových motorů můžeme dělit podle různých hledisek. Podle směru toku proudu vinutím rozeznáváme motory unipolární a bipolární. Většinu motorů lze použít oběma způsoby, záleží na způsobu zapojení. Dalším hlediskem je omezení proudu vinutím, jednotlivé způsoby se liší rychlostí ustálení proudu a účinností. Jak v případě unipolárního, tak i bipolárního způsobu řízení jsou různé způsoby buzení fází, které se liší rozlišením motoru, momentem a složitostí řídicího obvodu.

2.1. Způsoby řízení z hlediska způsobu zapojení

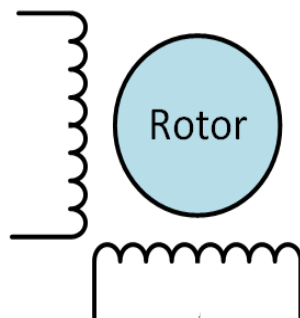
Z hlediska směru toku proudu a polarity magnetického pole rozeznáváme dva základní druhy dvoufázových krokových motorů: unipolární a bipolární

Unipolární motory mají pro každou fázi jedno vinutí s vyvedeným středem, který rozděluje vinutí na dvě poloviny. Tento střed je připojený k jednomu pólu napájecího zdroje. Rozdělení vinutí nám umožňuje určit, kterou částí poteče proud a jakou polaritu bude mít magnetické pole. Každou polovinou vinutí teče proud vždy jen jedním směrem a v jednom okamžiku může téct proud vždy jen polovinou vinutí. Z tohoto důvodu mají unipolární motory menší moment. Jejich řízení je jednodušší v porovnání s bipolárními motory.

Bipolární motory mají pro každou fázi jedno vinutí bez vyvedeného středu. Proud teče na rozdíl od unipolárních motorů celým vinutím a motor má tím pádem větší moment. Pro změnu polarity magnetického pole je třeba obrátit směr toku proudu, z tohoto důvodu je jejich řízení a řídicí obvod komplikovanější, protože je třeba použít můstkové zapojení.

2.1.1. Motor se 4 vodiči

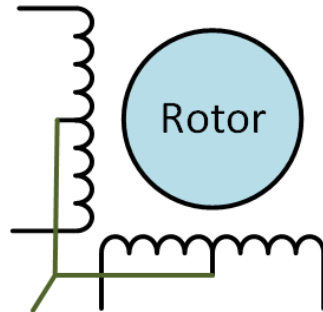
V případě tohoto zapojení lze motor použít pouze jako bipolární, protože nejsou vyvedeny středy vinutí.



Obr. 8: Motor se 4 vodiči [2]

2.1.2. Motor s 5 vodiči

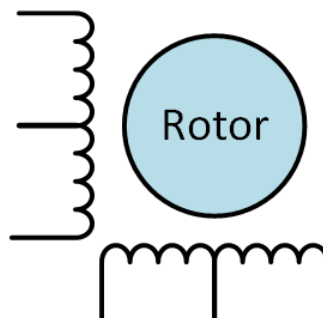
Toto zapojení je běžné v menších motorech. Střední vinutí jsou uvnitř motoru spojeny v jeden vodič a ten je vyvedený ven. Celkový počet vodičů je tedy 5. Tento motor lze řídit pouze jako unipolární.



Obr. 9: Motor s 5 vodiči [2]

2.1.3. Motor se 6 vodiči

V tomto zapojení lze motor řídit jako unipolární a bipolární. Pokud spojíme střední vinutí, získáme motor s 5 vodiči a můžeme ho řídit unipolárně. Když střední vodiče nepoužijeme, můžeme motor řídit bipolárně.

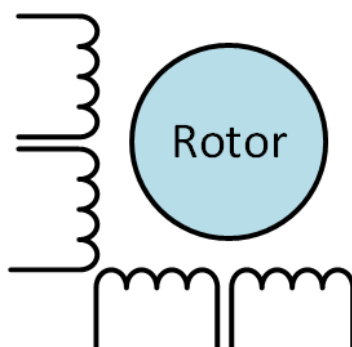


Obr. 10: Motor se 6 vodiči [2]

2.1.4. Motor s 8 vodiči

Toto zapojení je nejuniverzálnější, ale nepoužívá se příliš často. Motor může být použit následujícími způsoby:

- unipolární
- bipolární zapojený sériově, fáze mají větší indukčnost a odpor
- bipolární zapojený paralelně, indukčnost a odpor fází jsou poloviční



Obr. 11: Motor s 8 vodiči [2]

2.2. Způsoby řízení z hlediska způsobu omezení proudu

Okamžitá hodnota proudu protékající vinutím je dána několika faktory. Závisí na napájecím napětí, odporu vinutí, indukčnosti vinutí, době, po kterou je na vinutí přivedeno napětí a případně na odporu přídavného rezistoru, je-li použit.

Ustálenou hodnotu proudu vinutím získáme ze vztahu:

$$I_v = \frac{U}{R_c} \text{ [A]} \quad (3)$$

kde I_v je proud protékající vinutím, U je napájecí napětí a R_c je celkový odpor obvodu vinutí.

2.2.1. Řízení L/R

Nejjednodušším způsobem řízení krokového motoru je použití tak vysokého napětí, aby se ustálená hodnota proudu rovnala jmenovité hodnotě proudu bez použití přídavného rezistoru. Potom platí:

$$R_c = R_v \text{ [}\Omega\text{]} \quad (4)$$

kde R_v je odpor vinutí, který jediný omezuje proud vinutím. Tento způsob řízení, který označujeme jako řízení L/R, má velkou nevýhodu v poklesu momentu, projevující se především při vyšších otáčkách. Rychlost nárůstu proudu je omezena velikostí indukčnosti vinutí L_v a je charakterizována časovou konstantou vinutí τ_v , pro kterou platí vztah:

$$\tau_v = \frac{L_v}{R_v} \text{ [ms]} \quad (5)$$

Proud dosáhne své ustálené hodnoty později než při použití níže popsaných způsobů řízení. Při vyšších otáčkách motoru proud dokonce ani nestihne dosáhnout své ustálené hodnoty před skončením doby, po kterou je přivedeno napětí na fázi během daného kroku. Již zmíněný pokles momentu M nastává z důvodu jeho lineární závislosti na proudu:

$$M = k \cdot \phi \cdot I_v \text{ [Nm]} \quad (6)$$

2.2.2. Řízení L/nR

Abychom zabránili poklesu momentu, je třeba zmenšit časovou konstantu τ_v . Toho lze dosáhnout zařazením přídavného rezistoru o odporu R_p . Celkový odpor obvodu vinutí se potom změní na:

$$R_c = R_v + R_p [\Omega] \quad (7)$$

a časová konstanta se zvětší na:

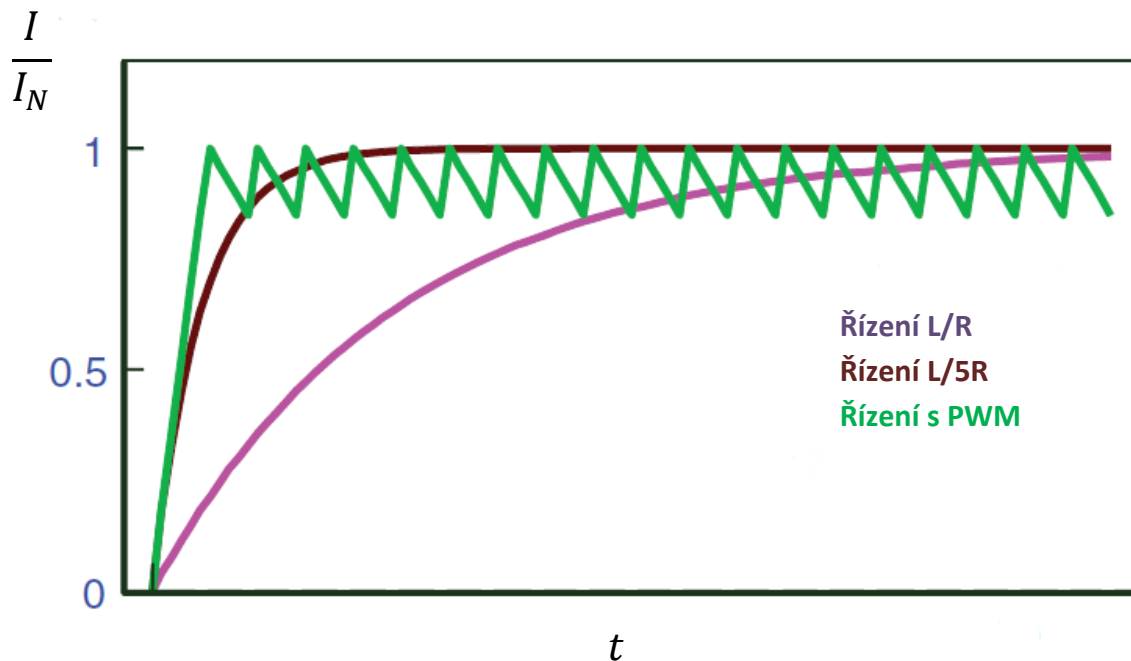
$$\tau_v = \frac{L_v}{R_v + R_p} [\text{ms}] \quad (8)$$

Zároveň je třeba zvýšit napájecí napětí U , aby bylo dosaženo v ustáleném stavu jmenovitého proudu. Zařazením přídavného rezistoru se zkrátí doba nárůstu proudu, ale nevýhoda tohoto způsobu, označovaného jako řízení L/nR, spočívá ve vyšších ztrátách motoru a tím pádem v jeho nižší účinnosti.

2.2.3. Řízení s PWM

Pro dosažení ideálního způsobu řízení potřebujeme malou časovou konstantu a zároveň malé ztráty. Toho můžeme dosáhnout spínáním a odepínáním napětí během jednoho kroku tak, aby se proud pohyboval kolem své jmenovité hodnoty. K tomu je třeba do obvodu vinutí zařadit měřicí rezistor, změřit úbytek napětí na něm a pomocí tohoto úbytku určit okamžitou hodnotu proudu. Pokud je tato hodnota menší než jmenovitá, vinutí je připojeno k napětí. V opačném případě je odpojeno. Napájecí napětí je větší než jmenovité, takže ustálená hodnota proudu při trvale připojeném napětí je větší než jmenovitá hodnota proudu. Stejně jako při druhém způsobu řízení je do obvodu vinutí připojen rezistor, jeho odpor je nicméně výrazně menší, a tím pádem jsou menší i ztráty a celková účinnost motoru je naopak mnohem větší. Použitím tohoto způsobu řízení dosáhneme malých ztrát, podobně jako při prvním způsobu, a zároveň malé časové konstanty, jako v předchozím případě.

Na Obr. 12 jsou znázorněny průběhy proudu pro všechny tři popsané způsoby řízení. Řízení L/R používá jmenovité napětí. Řízení L/5R používá pětinasobek jmenovitého napětí a přídavný rezistor, jehož odpor je čtyřnásobek odporu vinutí, takže celkový odpor je pětinasobek odporu vinutí a řízení s PWM používá pětinasobek jmenovitého napětí. Pomocí všech tří způsobů dosáhneme jmenovitého proudu, ale jak již z Obr. 12 vyplývá, s PWM ho dosáhneme výrazně rychleji v porovnání s řízením L/R.



Obr. 12: Porovnání řízení L/R, L/5R a PWM [3]

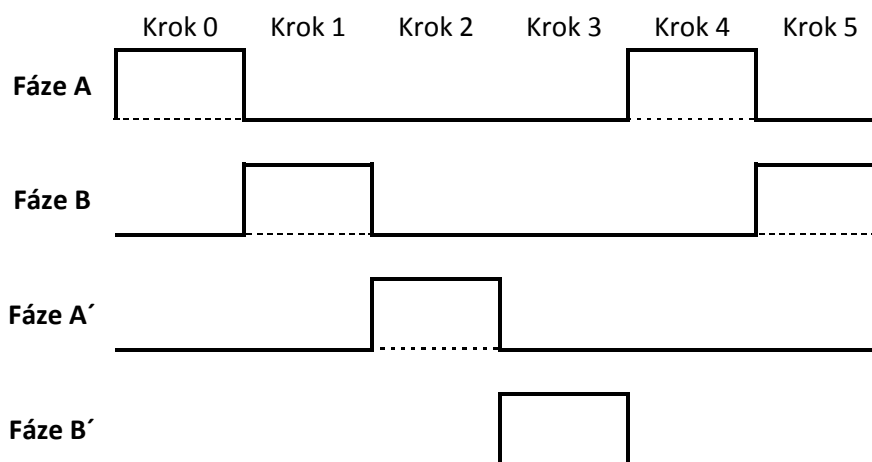
2.3. Způsoby řízení z hlediska buzení fází

Pro otáčení krokových motorů je třeba na jejich fáze přivádět impulzy v určitých pořadích. Tato kapitola podrobně rozebírá tato pořadí jak pro bipolární, tak i unipolární motory. Bipolárně i unipolárně řízené motory lze řídit čtyřmi způsoby buzení fází: řízení s celým krokem a buzením jedné fáze, řízení s celým krokem a buzením dvou fází a řízení s polovičním krokem. Jestliže potřebujeme dosáhnout menšího kroku než polovičního, lze použít způsob řízení zvaný mikrokrokování.

2.3.1. Řízení unipolárních krokových motorů

2.3.1.1. Řízení s celým krokem a buzením jedné fáze

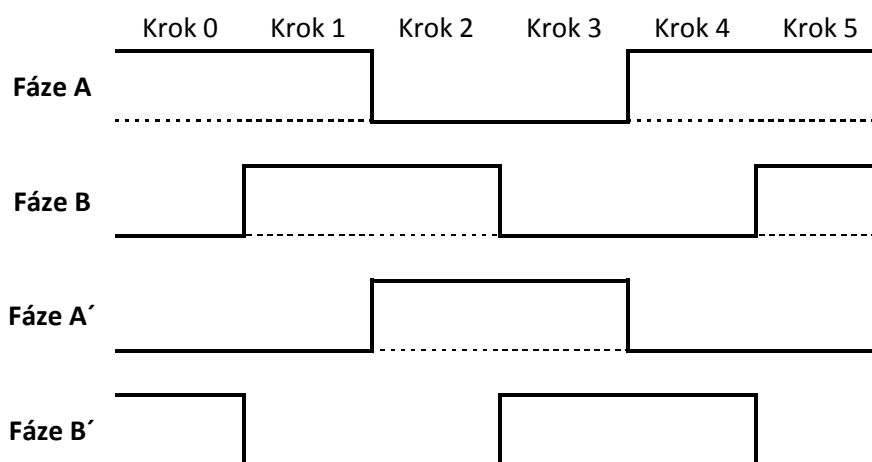
Při tomto způsobu řízení teče proud v každém okamžiku pouze jednou fází. Je to nejjednodušší, ale zřídka používaný způsob řízení. Motor se vždy natočí tak, aby vzdálenost příslušného zubu od buzené fáze byla nejmenší. Počet kroků na jednu otáčku je stejný jako v případě řízení s magnetizací dvou fází, ale nevýhoda je v menším momentu. Na Obr. 13 je zobrazeno pořadí spínání jednotlivých fází pro dvoufázový motor. Při jejich spínání v pořadí A, B, A', B', A... se bude motor točit na jednu stranu, při opačném pořadí, B', A', B, A, B'... se bude točit na druhou stranu.



Obr. 13: Řízení s celým krokem a buzením jedné fáze

2.3.1.2. Řízení s celým krokem a buzením dvou fází

Jde o způsob řízení, při kterém jsou vždy buzeny dvě sousední fáze. Je to nejčastěji používaný způsob řízení. Když je jedna fáze vypnuta, další je okamžitě zapnuta. V porovnání s předchozím způsobem má motor stejný počet kroků na otáčku, ale tyto kroky jsou posunuty, protože rovnovážná poloha rotoru je vždy natočena mezi dva sousední póly. Výhodou tohoto způsobu řízení je dosažení největšího možného momentu z unipolárních způsobů řízení. Na Obr. 14 vidíme pořadí spínání fází. V jednom směru je toto pořadí B'A, AB, BA', A'B', B'A... a pro druhý směr je pořadí AB', B'A', A'B, BA, AB'...

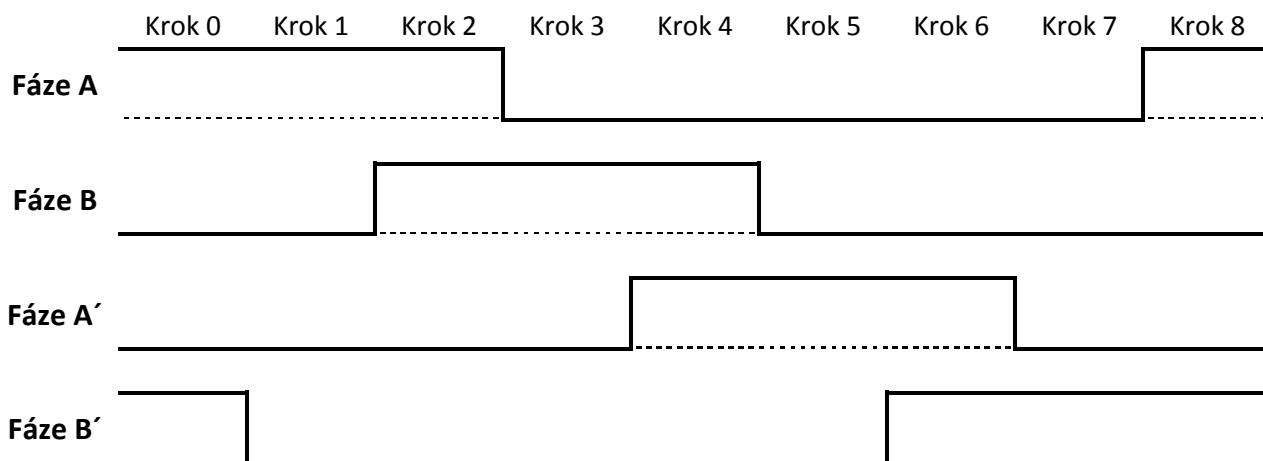


Obr. 14: Řízení s celým krokem a buzením dvou fází

2.3.1.3. Řízení s polovičním krokem

V případě tohoto způsobu řízení stator přechází mezi dvěma stavy, kdy jsou buzeny dvě sousední fáze a pouze jedna fáze. Tímto způsobem dosáhneme dvojnásobného rozlišení motoru, tedy poloviční velikosti kroku. Nevýhodou tohoto způsobu ovšem je, že moment motoru se liší podle toho, jestli je buzena jedna fáze nebo dvě. To lze kompenzovat tím, že když je napájena pouze jedna

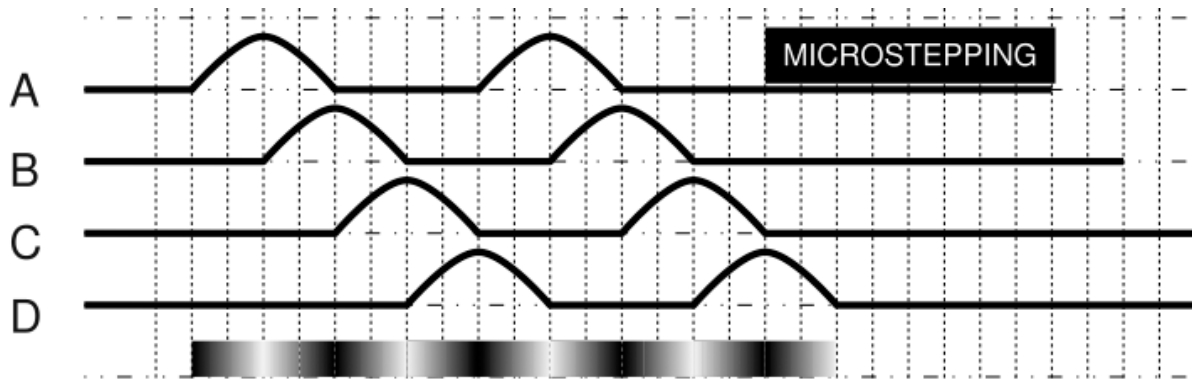
fáze, zvýší se její proud, což ale vyžaduje složitější budicí obvod. Podrobněji je problematika poklesu momentu popsána v kapitole o bipolárním řízení s polovičním krokem. Pořadí spínání fází je znázorněno na Obr. 15. V jednom směru je pořadí AB', A, AB, B, BA', A', A'B', B', AB'... Ve druhém směru je pořadí B'A, B', A'B', A', BA', B, AB, A, B'A...



Obr. 15: Řízení s polovičním krokem

2.3.1.4. Mikrokrokování

Nejmenší běžná velikost kroku krokového motoru je $1,8^\circ$. Pokud potřebujeme dosáhnout menších kroků, a tím pádem většímu rozlišení motoru, můžeme použít způsob řízení zvaný mikrokrokování. Na rozdíl od předchozích dvou způsobů nemá každá fáze pouze dva stavy (tedy vypnutá a zapnutá), ale jejich budicí proud se postupně mění, aby bylo možno nastavit polohu mezi dvěma kroky. Každý celý krok je rozdělen na několik mikrokroků. Obvykle je budicí proud podobný sinusovému průběhu.

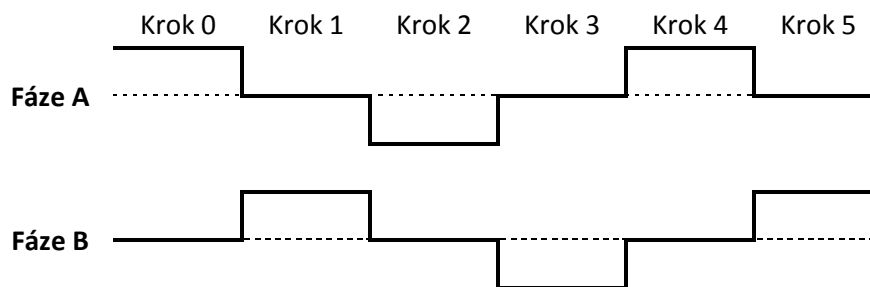


Obr. 16: Unipolární mikrokrokování [9]

2.3.2. Řízení bipolárních krokových motorů

2.3.2.1. Řízení s celým krokem a buzením jedné fáze

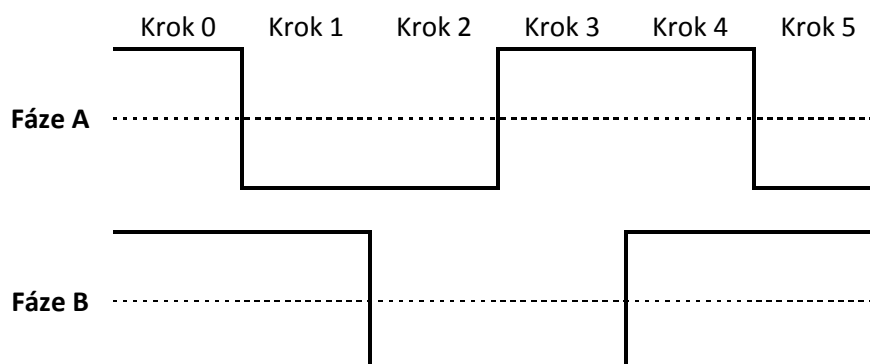
Podobně jako při řízení unipolárních motorů můžeme řídit motor tak, že v jednom okamžiku je vždy buzena právě jedna fáze. Nevýhoda tohoto způsobu je opět v menším momentu.



Obr. 17: Řízení s celým krokem a buzením jedné fáze

2.3.2.2. Řízení s celým krokem a buzením dvou fází

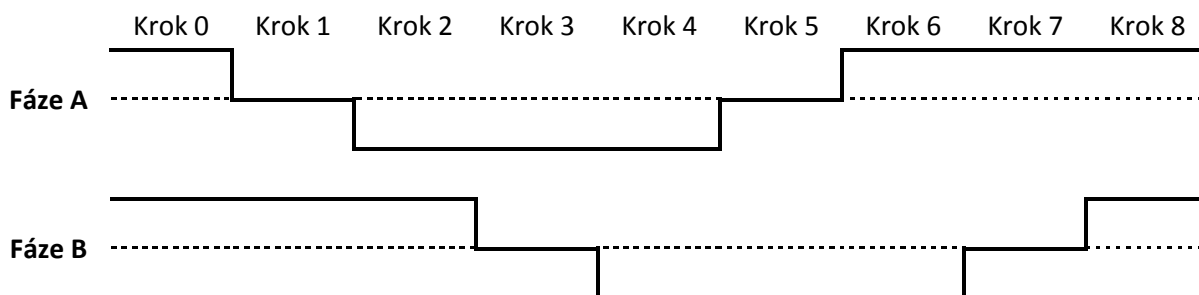
Při použití tohoto způsobu řízení jsou v jednom okamžiku magnetizovány vždy obě dvě fáze. Pohyb rotoru na další krok je realizován změnou směru toku proudu v jedné z fází, a tím pádem také změnou polaritu magnetického pole. Podle toho která z fází změní polaritu je možné určit směr otáčení. Na Obr. 18 je zobrazeno spínání fází a jejich polarita v jednotlivých krocích. Pro otáčení v jednom směru (podle obr. 12) je pořadí A+B+, A-B+, A-B-, A+B-, A+B+ a ve druhém směru je pořadí A+B+, A+B-, A-B-, A-B+, A+B+. Znaménko u fáze označuje její polaritu.



Obr. 18: Řízení s celým krokem a buzením dvou fází

2.3.2.3. Řízení s polovičním krokem

Podobně jako při unipolárním řízení přechází motor mezi dvěma stavy, kdy jsou buzeny dvě fáze a jenom jedna. Tímto způsobem dosáhneme dvojnásobného rozlišení motoru. Pořadí spínání fází pro jeden směr je znázorněno na Obr. 19.



Obr. 19: Řízení s polovičním krokem

Hlavní nevýhodou řízení s polovičním krokem je to, že moment motoru má přibližně pouze 70 % momentu v porovnání s předchozím způsobem. To je způsobeno menší magnetickou indukcí ve statoru. Během řízení s celým krokem se vektory magnetických indukcí od obou fází sčítají. Tyto vektory svírají úhel 45° , takže jejich absolutní hodnota je $\sqrt{2}$ krát větší než absolutní hodnota každého z nich. Při řízení s polovičním krokem nastává situace, kdy je buzena pouze jedna z fází, takže výsledná magnetická indukce je dána pouze indukcí od této jedné fáze, takže je $\sqrt{2}$ krát menší, a tudíž poklesne přibližně o 30 %. Tento pokles můžeme kompenzovat zvětšením proudu na $\sqrt{2}$ krát větší hodnotu během těch kroků, kdy je buzena pouze jedna fáze.

2.3.2.4. Mikrokrokování

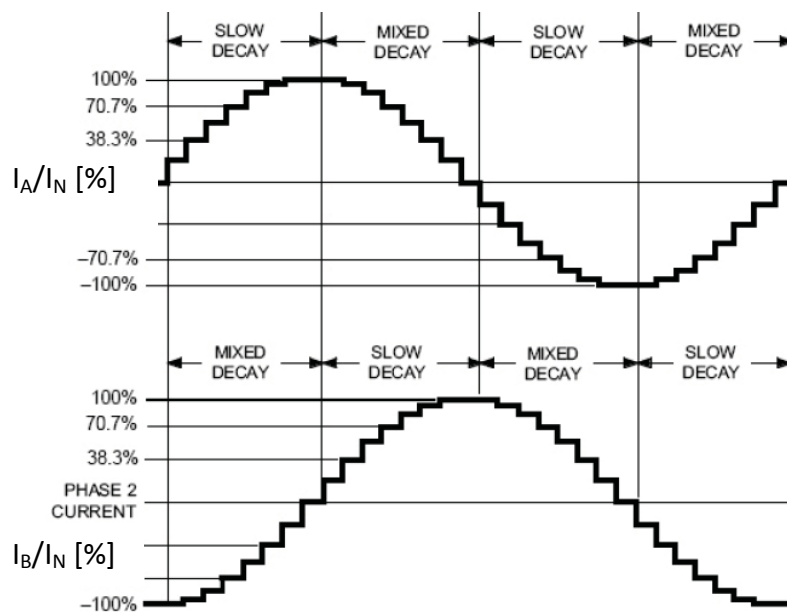
Pro dosažení většího rozlišení motoru můžeme i při bipolárním řízení použít mikrokrokování. Jak již bylo uvedeno v kapitole 2.3.1.4, proud v jednotlivých fázích má obvykle podobný průběh sinusoidě. Na Obr. 20 je jeden krok rozdělený na osm mikrokroků. Velikosti proudů ve fázích vztažené ke jmenovité hodnotě pro jednotlivé mikrokroky uvádí Tabulka 1 a jsou vypočteny podle následujících vztahů, kde I_A a I_B jsou proudy ve fázích A, B, I_N je jmenovitý proud, y je počet mikrokroků, na které je rozdělen jeden krok a x je číslo mikrokroku:

$$\frac{I_A}{I_N} = \sin\left(\frac{1}{y} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot x\right) \cdot 100 [\%] \quad (9)$$

$$\frac{I_B}{I_N} = \sin\left(\frac{1}{y} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot x - \frac{\pi}{2}\right) \cdot 100 [\%] \quad (10)$$

Mikrokrok	I_A/I_N [%]	I_B/I_N [%]
0	0	-100
1	19,5	-98,1
2	38,3	-92,4
3	55,6	-83,1
4	70,7	-70,7
5	83,1	-55,6
6	92,4	-38,3
7	98,1	-19,5
8	100	0

Tabulka 1: Proudý ve fázích při mikrokrokování

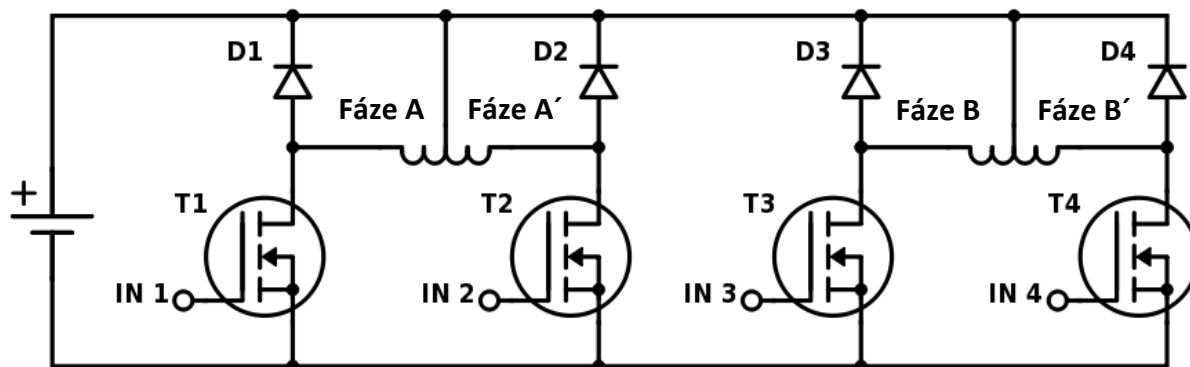


Obr. 20: Bipolární mikrokrokování [8]

2.4. Řídicí obvody krokových motorů

2.4.1. Obvod pro unipolární řízení

Obvod pro řízení dvoufázového unipolárního motoru je na Obr. 21. Středů obou vinutí jsou připojeny ke kladnému pólu napájecího zdroje. V obvodu jsou čtyři unipolární tranzistory typu n-MOSFET T1 až T4, každý z nich pro sepnutí jedné sekce vinutí. Je možné použít i jiné typy tranzistorů, jako jsou bipolární tranzistory nebo IGBT. K vinutím jsou připojeny zpětné diody D1 až D4 pro zabránění vzniku přepětí při vypnutí tranzistoru. Tento obvod je v porovnání s bipolárním obvodem jednodušší a vyžaduje menší počet součástek.



Obr. 21: Obvod pro unipolární řízení

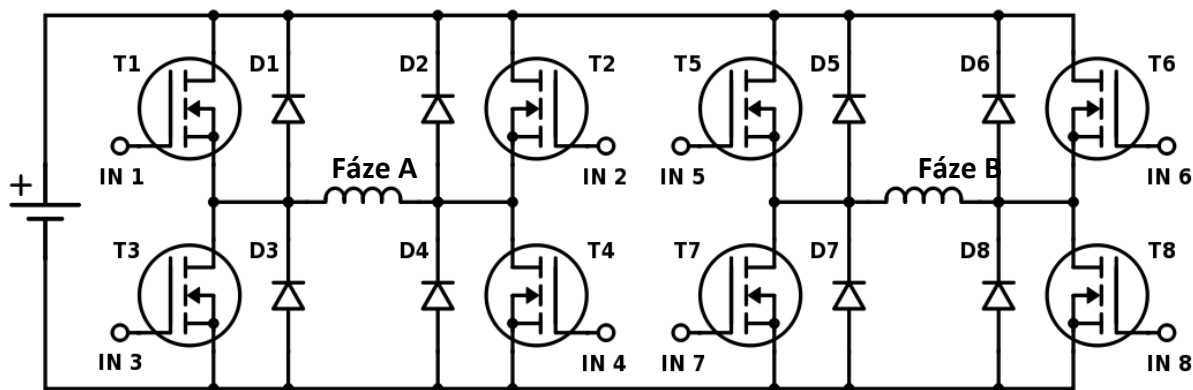
2.4.2. Obvod pro bipolární řízení

Bipolární řízení vyžaduje možnost měnit směr proudu ve vinutích motoru. Toho lze dosáhnout pomocí můstkového zapojení jako na Obr. 22. Pro jeden směr proudu u fáze A je třeba sepnout tranzistory T1 a T4, ve druhém směru tranzistory T2 a T3. Podobně lze řídit směr proudu ve fázi B. V tomto zapojení nikdy nesmíme sepnout tranzistory pod sebou, jinak by došlo ke zkratování napájecího zdroje a zničení tranzistorů.

Pro vypnutí fáze je možno využít dva základní způsoby. Pro rychlý pokles proudu je třeba, aby proud tekł zpětnými diodami a zdrojem. Jestliže jsou sepnuty např. tranzistory T1 a T4, po jejich současném vypnutí poteče proud přes zpětné diody D2 a D3 a napájecí zdroj v opačném směru, než při zapnutí fáze. To znamená, že bude docházet k rekuperaci energie do napájecího zdroje. Druhý, pomalejší způsob vypnutí fáze, spočívá v tom, že vypnut pouze jeden z tranzistorů. Pokud jsou sepnuty T1 a T4 a vypneme T4, poteče proud tranzistorem T1 a zpětnou diodou D2. Pokud naopak vypneme T1, poteče proud tranzistorem T4 a zpětnou diodou D3.

Unipolární tranzistory MOSFET mají ve své struktuře vestavěnou zpětnou diodu, takže při použití tohoto typu tranzistorů by zapojovat diody do obvodu nebylo třeba. Nicméně v obvodu podle Obr. 22 představují unipolární tranzistory obecně spínače, kterými by mohly být i bipolární tranzistory nebo IGBT, které tuto diodu nemají. Z tohoto důvodu obsahuje schéma i tyto diody D1 až D8.

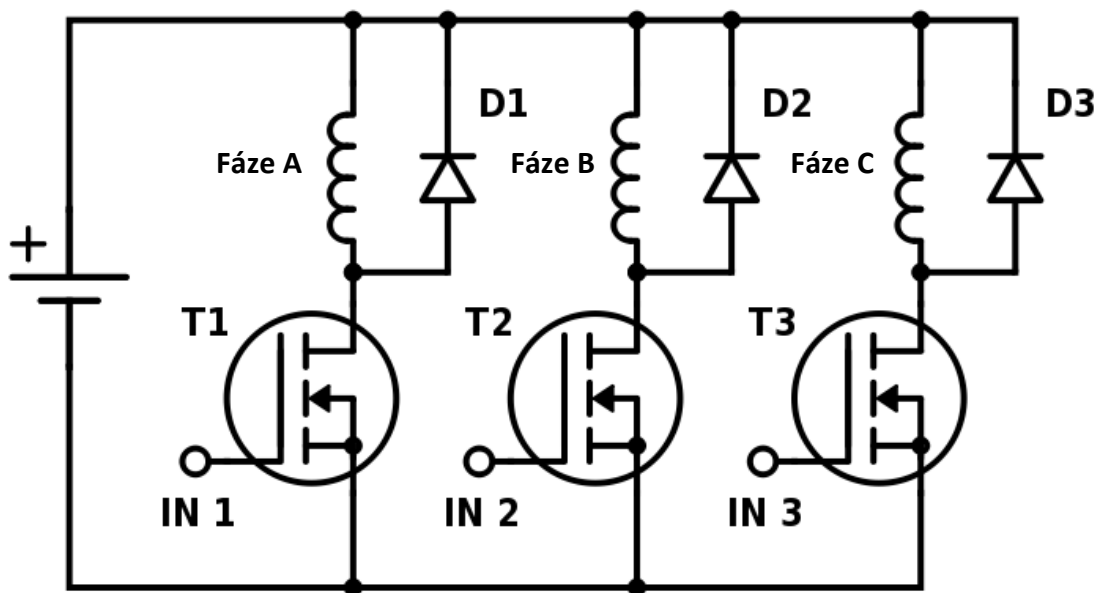
Všechny tranzistory MOSFET na obrázku mají n-kanál, takže jejich source je v dolní části. Pro otevření těchto tranzistorů je třeba přiložit napětí mezi gate a source. U tranzistorů v dolní části schématu to není problém, protože jejich source je připojen k zápornému pólu napájecího zdroje. Naopak u tranzistorů v horní části je k otevření třeba napětí vyšší než napájecí napětí U . Pokud budeme předpokládat, že na tranzistoru je v otevřeném stavu nulový úbytek napětí, je třeba na gate přiložit napětí $U + U_g$, kde U_g je napětí mezi gate a source pro otevření tranzistoru, typicky 12 V. Dosáhnout toho můžeme použitím integrovaného obvodu, který se postará o otevírání jak spodních, tak hlavně horních tranzistorů. Tento obvod je nazýván jako bridge driver nebo high and low side driver, jako příklad lze uvést IR2104 od společnosti International Rectifier. Druhou možností je použít tranzistory p-MOSFET, kde source připojíme ke kladnému pólu napájecího zdroje.



Obr. 22: Obvod pro bipolární řízení

2.4.3. Obvod pro řízení motoru s proměnnou reluktancí

Na Obr. 23 je obvod pro řízení třífázového motoru s proměnnou reluktancí. Tento obvod je ze všech nejjednodušší, protože není třeba měnit směr toku proudu, na rozdíl od dvoufázových motorů s permanentním magnetem a hybridních motorů. Každá z fází je připojena ke kladnému pólu napájecího zdroje a je opatřena zpětnou diodou.



Obr. 23: Obvod pro řízení motoru s proměnnou reluktancí

3. Použité vybavení

V této kapitole jsou popsány všechny přístroje a hardware použitý pro realizaci zvolené řídicí strategie krokového motoru.

3.1. Krokový motor

Pro otestování sestaveného driveru pro řízení krokového motoru byl použit motor od firmy Microcon s označením SX17-1005. Jedná se o jeden z nejlevnějších motorů z nabídky této firmy. Ve srovnání s ostatními motory z řady SX17 má velmi malý moment (největší je 25 Nm), ale při testování driveru nebude motor zatěžován, takže malý moment není na závadu a parametry použitého motoru jsou zcela postačující. Tento motor je hybridní a jeho velikost kroku je, stejně jako u všech ostatních motorů od Microconu, $1,8^\circ$ s tolerancí $0,1^\circ$. Vyrábí se také ve verzi s hřídelí vyvedenou na obě strany s označením SX17-1005D se zcela totožnými parametry.

Tento motor má vyvedeno 8 barevně odlišených vodičů, takže ho lze zapojit těmito třemi způsoby:

- 1) jako unipolární
- 2) jako bipolární zapojený sériově
- 3) jako bipolární zapojený paralelně

Vybraný způsob zapojení je bipolární sériový. Následující tabulka udává, jak je třeba použít jednotlivé vodiče motoru v tomto zapojení.

spojit	červený s hnědým
spojit	žlutý se zeleným
fáze A	oranžový
fáze A'	černý
fáze B	modrý
fáze B'	bílý

Tabulka 2: Bipolární sériové zapojení vinutí motoru SX17-1005 [4]

Všechny dostupné parametry motoru jsou v další tabulce.

Statický moment	Jmenovitý proud	Indukčnost	Odpor	Zbytkový moment	Moment setrvačnosti	Hmotnost
0,5 Nm	1 A	10,8 mH	5,4 Ω	0,022 Nm	54 g·cm ²	0,3 kg

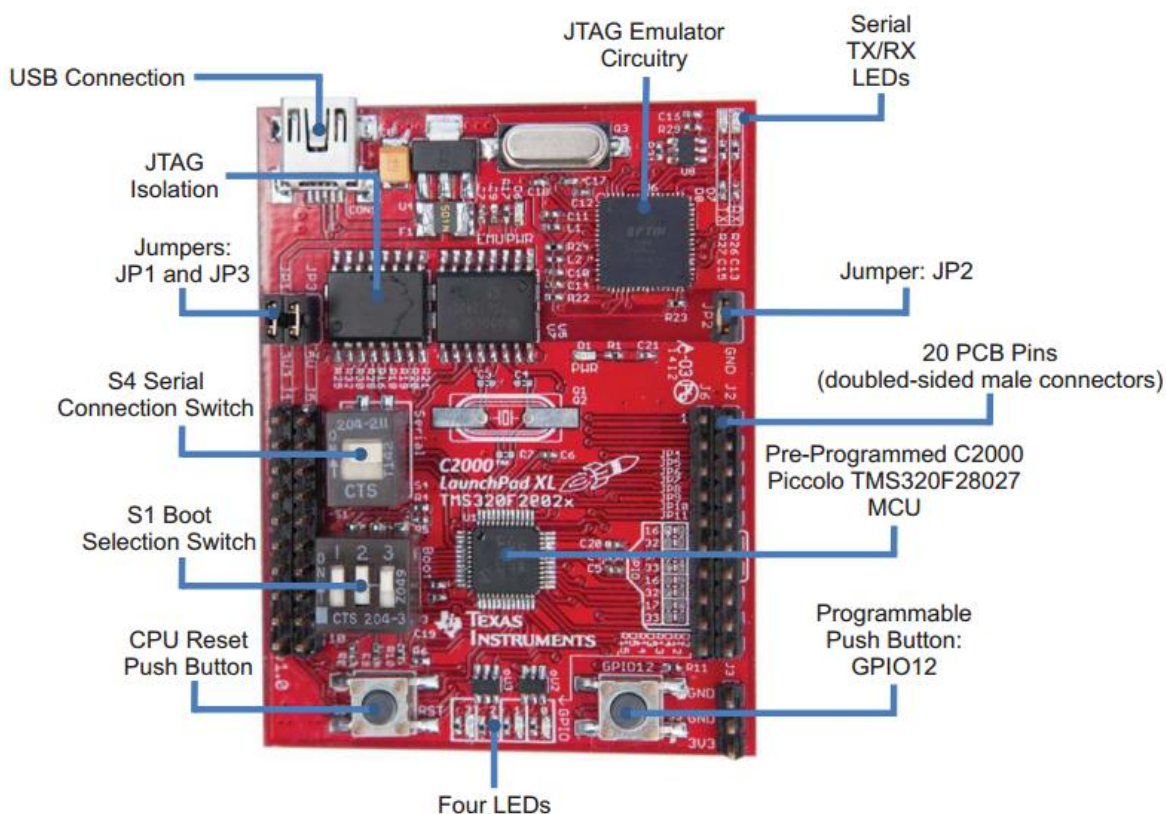
Tabulka 3: Parametry motoru SX17-1005 [5]

Hodnoty jmenovitého proudu, indukčnosti a odporu jsou udány pro použité bipolární sériové zapojení. V případě paralelního zapojení je jmenovitý proud dvojnásobný, zatímco indukčnost s odporem jsou čtvrtinové.

3.2. Mikrokontrolér a vývojová deska

Použitý mikrokontrolér od firmy Texas Instruments má označení TMS320F28027. Je vybavený 32bitovým procesorem s maximální frekvencí 60 MHz. Interní oscilátor má frekvenci 10 MHz, ale je možné ji zvýšit pomocí PLL. Má 22 pinů na vstup a výstup a 13 vstupů 12bitového AD převodníku, který má dva sample-and-hold obvody. Dále tento mikrokontrolér obsahuje tři časovače, jimiž lze generovat přerušení. Pracovní napětí je 3,3 V.

Tento mikrokontrolér je součástí vývojové desky LAUNCHXL-F28027. Tato deska obsahuje veškerý potřebný hardware pro jednoduché programování z PC přes USB rozhraní včetně debuggingu. Přes USB je také zajišťováno napájení desky včetně mikrokontroléru přes měnič napětí z 5 V na 3,3 V. Deska je také vybavena čtyřmi LED a dvěma tlačítky, jedno pro volné použití a druhé pro reset procesoru. K programování je určeno vývojové prostředí Code Composer Studio, které je volně dostupné.



Obr. 24: Vývojová deska LAUNCHXL-F28027 [6]

3.3. Nepájivé kontaktní pole

Pro sestavení obvodu bylo použito nepájivé kontaktní pole ZY-201. Napájecí část pole má 630 pinů a napájecí část 200 pinů.

4. Zapojení pro provoz použitého krokového motoru

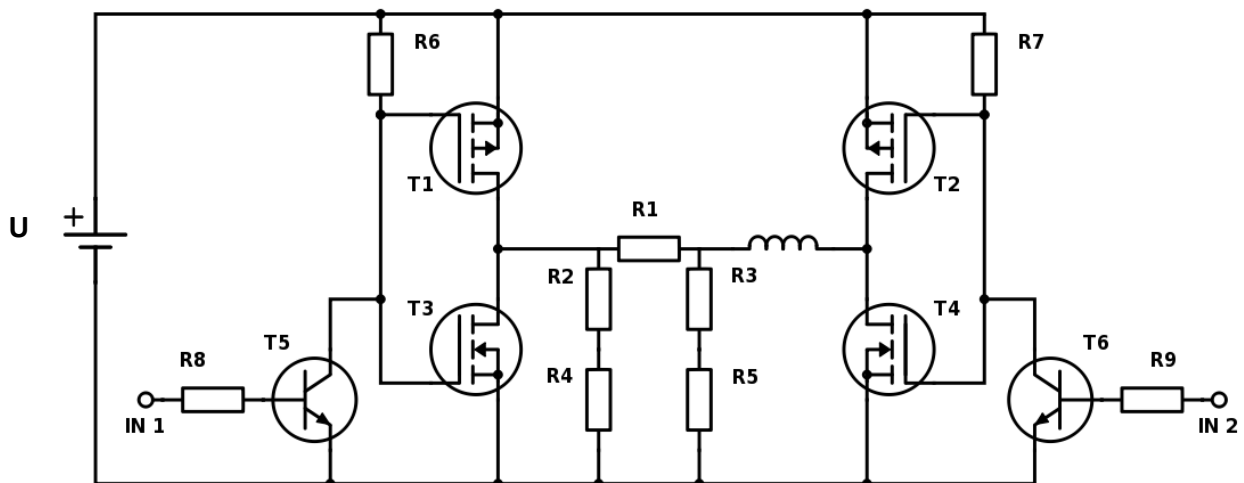
V této kapitole jsou popsány všechny zvolené způsoby řízení krokového motoru SX17-1005 od firmy Microcon podle kapitoly 2.

4.1. Obvod

Návrh obvodu pro řízení krokového motoru pomocí platformy Texas Instruments je uveden na Obr. 25. Na schématu je z prostorových důvodů pouze jeden můstek, druhý je zapojený stejným způsobem. Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, nejlepším způsobem řízení krokových motorů je řízení bipolární, jelikož lze pomocí něho dosáhnout největšího momentu. Z tohoto důvodu byl tento způsob zvolen a proto bylo třeba použít můstkové zapojení.

Každý z můstků je řízen dvěma logickými vstupy, jeden vstup ovládá polovinu můstku (levou nebo pravou). Těmito vstupy jsou řízeny bipolární tranzistory T5 a T6 a jsou připojeny přes rezistory R8 a R9, aby došlo k omezení proudu do bází těchto tranzistorů. Celkově jsou tedy použity čtyři vstupy. V horní části můstku jsou použity unipolární tranzistory typu p-MOSFET, jejichž elektroda source je připojena ke kladnému pólu napájecího zdroje a drain je připojen k fázi. V dolní části můstku jsou použity tranzistory typu n-MOSFET, jejich source je připojen k zápornému pólu napájecího zdroje a drain je, jako v předchozím případě, připojen k fázi.

Namísto tranzistorů unipolárních by bylo možné použít i tranzistory bipolární (BJT), nicméně unipolární mají výhodu v tom, že je v nich zabudovaná zpětná dioda pro tok proudu po vypnutí fáze. Na rozdíl od bipolárních také nepotřebují rezistor zařazený před elektrodu gate, což je obdoba báze u BJT. Celkový počet potřebných součástek se tímto výběrem tranzistorů výrazně snížil.

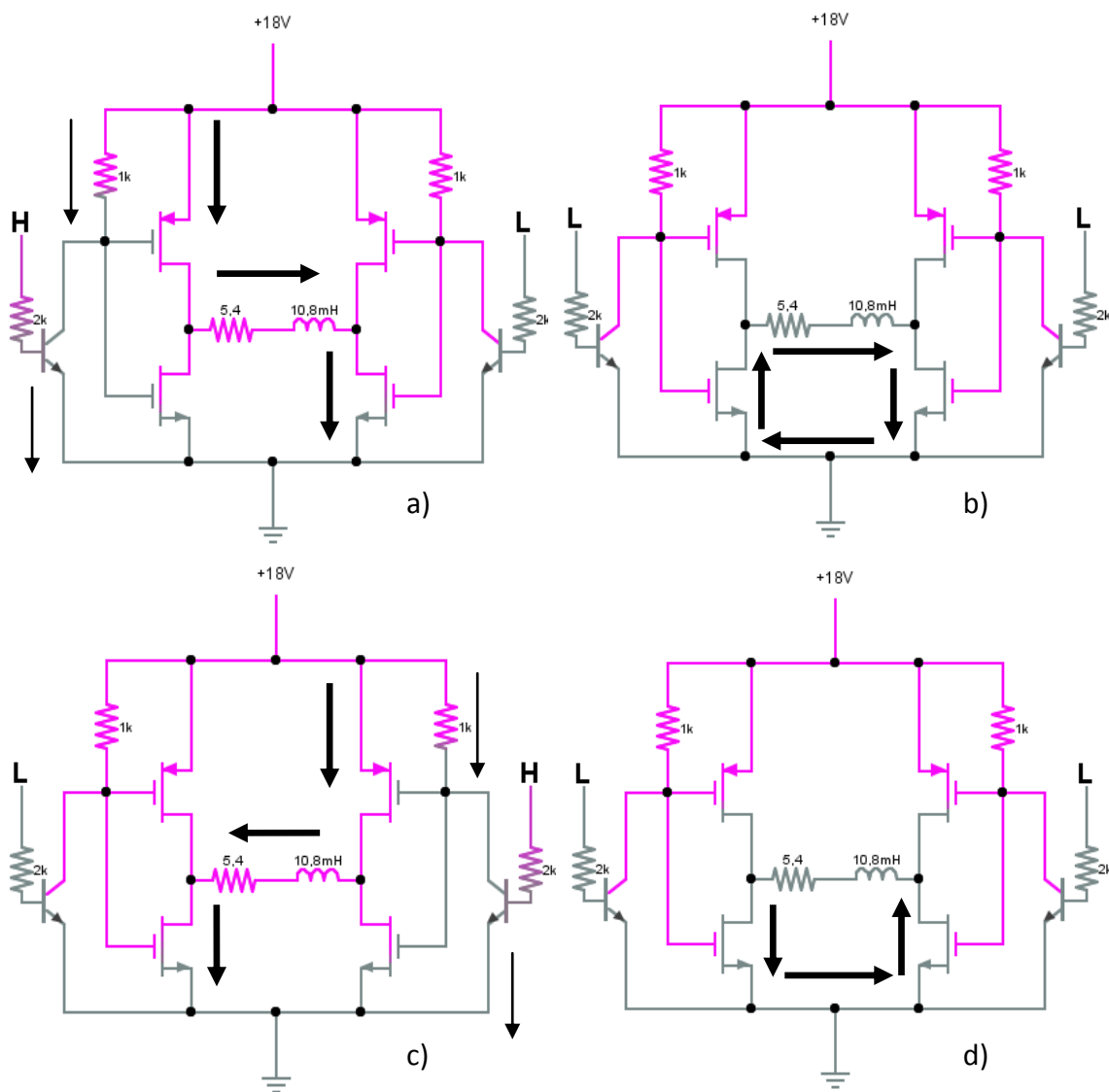


Obr. 25: Můstek pro řízení krokového motoru s měřením proudu na děliči

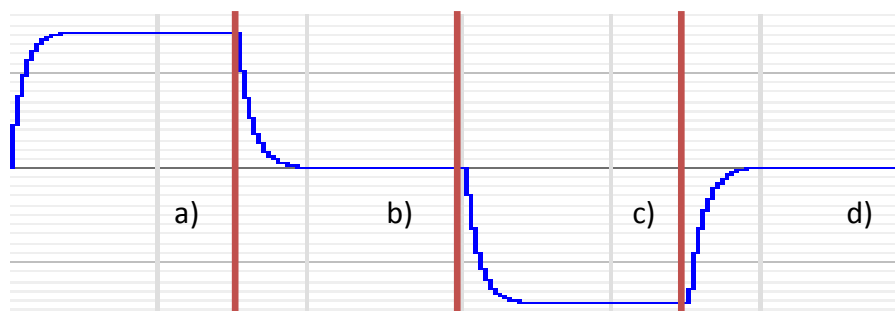
4.2. Princip fungování obvodu

Princip spínání unipolárních tranzistorů je vysvětlen podle levé části můstku na Obr. 25. Jestliže je na vstupu IN 1 logická jednička, napětí vůči zemi na něm je 3,3 V, do báze tranzistoru T5 začne téct proud a otevře se. To znamená, že je na něm prakticky nulový úbytek napětí. Z druhého Kirchhoffova zákona je známo, že algebraický součet napětí ve smyčce je nulový. Jestliže v této smyčce zbývá pouze napěťový zdroj a rezistor, je zřejmé, že veškerý úbytek napětí je na rezistoru. Tudiž napětí na gate tranzistoru T1 vůči zápornému pólu napájecího zdroje je nulové a z toho vyplývá, že napětí gate-source je rovno U . Dojde tedy k úplnému otevření tohoto tranzistoru. Naopak napětí gate-source tranzistoru T3 je nulové a tranzistor se zcela zavře.

Když se na vstupu IN 1 objeví logická nula, napětí poklesne na nulu a do báze nepoteče žádný proud. Následkem toho se zavře bipolární tranzistor a celý úbytek napětí bude právě na něm. Naopak na rezistoru R6 žádný úbytek napětí nebude, takže napětí gate-source tranzistoru T1 bude nulové a tranzistor se zavře. Napětí gate-source tranzistoru T3 bude U a tranzistor se otevře. Směr proudu můstkem při různých vstupech znázorňují Obr. 26 a Obr. 27.



Obr. 26: Tok proudu můstkem 1



Obr. 27: Tok proudu můstkem 2

Z výše uvedeného vyplývá, že je vždy jeden z tranzistorů nad sebou otevřený a jeden zavřený. To je velká výhoda tohoto zapojení, protože nikdy nemůže dojít ke zkratování napájecího zdroje. Stejně tak nelze dosáhnout zavření obou tranzistorů nad sebou, nicméně to pro fungování můstku není třeba, protože k odpojení zátěže od napětí postačí, aby oba spodní tranzistory byly zavřené, případně oba horní.

Následující tabulka shrnuje všechny možnosti sepnutí můstku. Jestliže jsou oba vstupy na logické nule, jsou horní tranzistory T1 a T2 zavřeny, na fázi není žádné napětí a neteče jí proud. Stejněho výsledku dosáhneme, pokud jsou oba vstupy na logické jedničce. V takovém případě jsou zavřeny dolní tranzistory T3 a T4. Pokud na logických vstupech budou rozdílné hodnoty, poteče fází proud. Znaménky + a - jsou v tabulce rozlišeny různě polarity napětí a směry proudu.

IN 1	IN 2	Fáze
0	0	0
1	1	0
0	1	+
1	0	-

Tabulka 4: Spínání můstku

4.3. Způsob omezení proudu

Použitý napájecí zdroj má napětí 12 V a odpor vinutí motoru je 5,4 Ω . Ustálená hodnota proudu vinutím potom vychází přibližně 2,22 A. Jmenovitá hodnota proudu použitého motoru je ovšem pouze 1 A. Z toho plyne, že v úvahu připadají způsoby omezení proudu popsané v kapitolách 2.2.2 - Řízení L/nR a 2.2.3 - Řízení s PWM. Vzhledem k tomu, že první možnost je nevýhodná z důvodu velkých ztrát a potřeby rezistoru s velkým ztrátovým výkonem, byla zvolena druhá možnost.

Měření proudu se obvykle provádí tím způsobem, že je měřeno napětí na rezistoru, jehož jeden konec je připojen k zápornému pólu napájecího zdroje. Analogově číslicový (AD) převodník měří napětí právě vůči tomuto bodu, takže změřená hodnota napětí se rovná právě úbytku napětí na rezistoru, z něhož lze snadno určit proud. Realizace tohoto způsobu je v obvodu podle Obr. 25 problematická, protože po odpojení fáze od napětí neteče proud přes napájecí zdroj.

Jeden ze způsobů měření proudu fází je proveden pomocí rezistorů R1 až R5. Rezistor R1 má malý odpor, aby nedošlo k větším ztrátám. Jelikož AD převodník měří napětí proti zemi, je možné změřit tato napětí na obou koncích rezistoru U_A a U_B a vypočítat úbytek napětí na rezistoru jako rozdíl těchto napětí. Tento úbytek je poté třeba podělit velikostí rezistoru R1 pro získání proudu fází. Maximální povolené napětí na vstupu AD převodníku je ovšem pouze 3,3 V, ale na fázi je možné mít napětí blízké se napájecímu napětí U, což je 12 V. Z tohoto důvodu jsou k oběma koncům rezistoru R1 připojeny napěťové děliče proti zemi. Vstupy AD převodníku jsou připojeny mezi rezistory R2 a R4, resp. R3 a R5. Pro napětí mezi těmito body a zemí U_1 a U_2 potom platí následující vztahy:

$$U_1 = U_A \cdot \frac{R_4}{R_4 + R_2} \text{ [V]} \quad (11)$$

$$U_2 = U_B \cdot \frac{R_5}{R_5 + R_3} \text{ [V]} \quad (12)$$

Napětí U_A a U_B vyjádříme jako:

$$U_A = U_1 \cdot \frac{R_4 + R_2}{R_4} \text{ [V]} \quad (13)$$

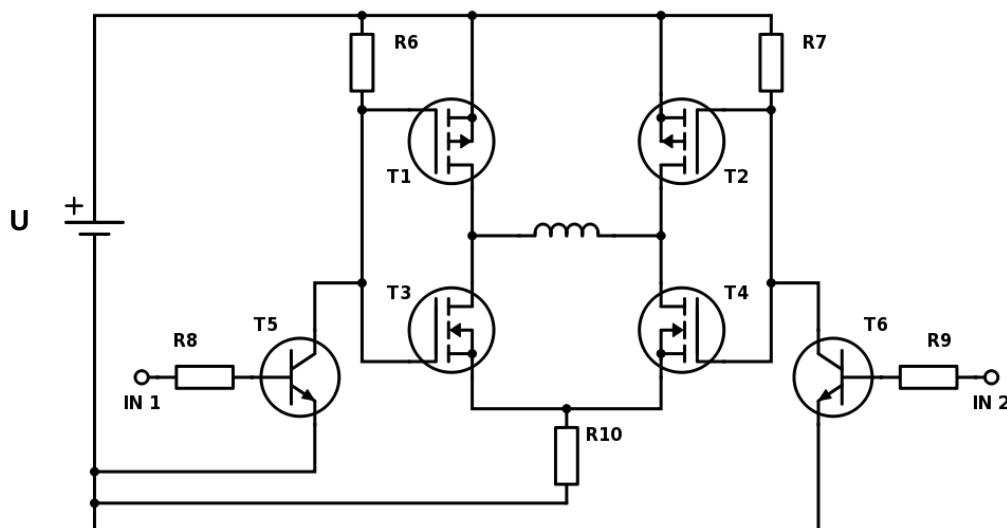
$$U_B = U_2 \cdot \frac{R_5 + R_3}{R_5} \text{ [V]} \quad (14)$$

A proud tekoucí fází potom určíme jako:

$$I_v = \frac{|U_A - U_B|}{R_1} \text{ [A]} \quad (15)$$

Absolutní hodnota je zde použita z toho důvodu, že směr proud není podstatný a důležitá je pouze jeho velikost, která by překročením jmenovité hodnoty mohla poškodit motor.

Druhý způsob měření proudu spočívá v připojení jednoho měřicího rezistoru mezi dolní část každého z můstků a zem. Jak již bylo řečeno, nevýhoda tohoto způsobu je možnost měření pouze při sepnuté fázi. Jestliže proud překročí požadovanou hodnotu a fáze je odpojena od napětí, poteče proud oběma dolními, případně horními tranzistory a měřícím rezistorem žádný proud nepoteče. Po určité době je třeba opět sepnout fázi, začít znovu měřit proud a porovnat ho s žádanou hodnotou. Doba, po kterou je fáze vypnuta musí být vhodně zvolena tak, aby proud dostatečně poklesl, ale ne příliš mnoho, aby nepoklesl moment motoru. Schéma pro měření proudu tímto způsobem je na Obr. 28. Během testování řídicího obvodu budou vyzkoušeny oba uvedené způsoby měření.



Obr. 28: Můstek pro řízení krokového motoru s přímým měřením proudu

4.4. Použité součástky

Seznam použitých součástek v obvodu podle Obr. 25 uvádí Tabulka 5. Všechny součástky svými parametry s velkou rezervou splňují nároky na provoz použitého krokového motoru. Jeho jmenovitý proud je 1 A, zatímco jmenovitý proud unipolárními tranzistory je 23 A, resp. 33 A. Napětí zdroje je 12 V a maximální napětí mezi elektrodami drain-source obou unipolárních tranzistorů je 100 V. Stejně tak všechny použité rezistory se svými maximálními ztrátovými výkony bohatě postačují.

Značka	Název	Parametry
T1, T2	Unipolární tranzistor p-kanál: IRF9540N	$U_{DS} = 100 \text{ V}$, $I_D = 23 \text{ A}$, $P_D = 140 \text{ W}$, $R_{DS} = 0,117 \Omega$
T3, T4	Unipolární tranzistor n-kanál: IRF540N	$U_{DS} = 100 \text{ V}$, $I_D = 33 \text{ A}$, $P_D = 130 \text{ W}$, $R_{DS} = 0,044 \Omega$
T5, T6	Bipolární tranzistor NPN: BC547A	$U_{CE} = 45 \text{ V}$, $I_C = 100 \text{ mA}$, $P_D = 625 \text{ mW}$
R1	Rezistor metalizovaný	$R = 0,22 \Omega$, $P_z = 0,6 \text{ W}$
R2, R3, R8, R9	Rezistor metalizovaný	$R = 2 \text{ k}\Omega$, $P_z = 0,6 \text{ W}$
R4, R5	Rezistor metalizovaný	$R = 360 \Omega$, $P_z = 0,6 \text{ W}$
R6, R7	Rezistor metalizovaný	$R = 1 \text{ k}\Omega$, $P_z = 0,6 \text{ W}$
U	Napěťový zdroj	$U = 12 \text{ V}$, $I = 500 \text{ mA}$

Tabulka 5: Seznam použitých součástek

5. Program

5.1. Použité prostředky mikrokontroléru

Program využívá vstupy a výstupy mikrokontroléru, dva časovače a AD převodník. Jako oscilátor je použit interní oscilátor s frekvencí 10 MHz, která je pětinasobně zvětšena pomocí PLL.

5.1.1. Vstupy a výstupy

Čtyři výstupy jsou použity pro spínání bipolárních tranzistorů, které prostřednictvím unipolárních tranzistorů spínají fáze motoru. Jestliže je výstup v logické jedničce, je na něm napětí $U_O = 3,3$ V. Úbytek napětí na bázi tranzistoru je přibližně $U_B = 0,7$ V a výstup je připojen k bázi přes rezistor o odporu $R = 2$ k Ω . Proud tekoucí z výstupu mikrokontroléru do báze tranzistoru I_O je potom:

$$I_O = \frac{U_O - U_B}{R} = \frac{3,3 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{2 \text{ k}\Omega} = 1,3 \text{ mA} \quad (16)$$

Což je proud, který s velkou rezervou otevře použitý tranzistor. Tento proud je také vyhovující z hlediska maximální odebíraného proudu z výstupu, což jsou 4 mA.

Dále jsou použity čtyři výstupy připojené k LED na vývojové desce, dva vstupy AD převodníku a dva vstupy pro připojení tlačítka. Všechny použité vstupy a výstupy jsou uvedeny v následující tabulce:

Druh	Označení	Použití
Výstup	GPIO 28	Spínání fáze A
Výstup	GPIO 29	Spínání fáze A
Výstup	GPIO 34	Spínání fáze B
Výstup	GPIO 18	Spínání fáze B
Výstup	GPIO 0	LED pro signalizaci zapnutí motoru
Výstup	GPIO 1	LED pro signalizaci směru otáčení / rychlost
Výstup	GPIO 2	LED pro signalizaci režimu / rychlost
Výstup	GPIO 3	LED pro signalizaci režimu / rychlost
Vstup	GPIO 5	Tlačítko pro nastavení směru / režimu / rychlosti
Vstup	GPIO 12	Tlačítko pro zapnutí / vypnutí motoru
Vstup AD převodníku	ADCINA2	Měření proudu fáze A
Vstup AD převodníku	ADCINB2	Měření proudu fáze B

Tabulka 6: Použité vstupy a výstupy

5.1.2. Časovače

K dispozici jsou tři časovače. CPU-Timer 0 je použit ke změně stavu, který určuje sepnutí fází. K této změně dochází v obsluze přerušení tohoto časovače. Jeho perioda potom určuje rychlost otáčení motoru. CPU-Timer 1 má dvě funkce. Jednou z nich je spouštění převodu AD převodníku a jeho perioda je v této funkci 50 mikrosekund. Přerušení tohoto časovače je po dobu, kdy je motor zapnut a časovač zajišťuje AD převody, blokováno. Jeho druhou funkcí je zajištění blikání LED na GPIO 0 ve stavu, kdy je motor vypnut, směr je nastaven a tlačítkem na GPIO 5 je nastavován režim. V této funkci je perioda časovače 200 milisekund a jeho přerušení je povoleno a využito. Třetí časovač, CPU-Timer 2, využit není.

5.1.3. AD převodník

AD převodník je v tomto programu využit pro měření proudů tekoucích fázemi motoru. Tyto proudy je třeba měřit z toho důvodu, aby nebyla překročena jmenovitá hodnota proudu zdroje ani motoru, ale také kvůli mikrokrokování, kde je nutné nastavovat různé velikosti proudu. Převodník je nastaven tak, že každých 50 mikrosekund je spuštěn převod na obou vstupech současně. Po dokončení obou převodů je generováno přerušení. Jestliže je některý z proudů větší než jeho žádaná hodnota, je příslušná fáze v obsluze přerušení vypnuta na 100 mikrosekund a poté opět zapnuta.

5.2. Režimy programu

Program umožňuje řídit motor ve čtyřech režimech, a to v režimu s celým krokem, s polovičním krokem, s mikrokrokováním, kde jeden krok je rozdělen na čtyři mikrokroky, a v režimu, kdy se motor po spuštění otočí o 90° a poté se zastaví. Ve všech režimech lze nastavit směr otáčení.

5.2.1. Řízení s celým krokem

Krokový motor bude v tomto režimu řízen bipolárně pomocí řízení s celým krokem a buzením jedné fáze, popsaného v kapitole 2.3.2.1. Tento způsob byl zvolen z toho důvodu, že maximální proud odebraný z napájecího zdroje je 500 mA, zatímco jmenovitý proud motoru je 1 A. Řízení s buzením dvou fází je lepší z důvodu většího momentu, nicméně s použitým zdrojem není možné tuto výhodu využít.

Fáze A bude řízena digitálními výstupy GPIO 28 a GPIO 29, zatímco fáze B bude řízena výstupy GPIO 34 a GPIO 18. Posloupnost hodnot na těchto výstupech udává následující tabulka, kde od kroku 4 se posloupnost opakuje. Pro odpojení fáze je použita kombinace výstupu 00, i když stejně tak by bylo možné použít kombinaci 11. Pro otáčení motoru v opačném směru je třeba tuto posloupnost obrátit.

Stav	Krok	I_A [mA]	GPIO 28	GPIO 29	I_B [mA]	GPIO 34	GPIO 18
0	0	+500	1	0	0	0	0
2	1	0	0	0	+500	1	0
4	2	-500	0	1	0	0	0
6	3	0	0	0	-500	0	1
0	4	+500	1	0	0	0	0

Tabulka 7: Řízením s celým krokem

5.2.2. Řízení s polovičním krokem

Tento režim využívá posloupnost impulzů popsanou a znázorněnou v kapitole 2.3.2.3. Velikost kroku použitého motoru je $1,8^\circ$, takže při použití polovičního kroku se bude pohybovat po úsecích o velikosti $0,9^\circ$. Ve stavu, kdy jsou aktivní obě fáze, poteče každou z nich 250 mA, jestliže je aktivní pouze jedna z fází, proud bude 354 mA. V obou dvou stavech je tedy naplno využít napájecí zdroj. Posloupnost spínání jednotlivých výstupů mikrokontroléru pro jeden směr je uvedena v následující tabulce.

Stav	Krok	I_A [mA]	GPIO 28	GPIO 29	I_B [mA]	GPIO 34	GPIO 18
0	0	+500	1	0	0	0	0
1	0,5	+354	1	0	+354	1	0
2	1	0	0	0	+500	1	0
3	1,5	-354	0	1	+354	1	0
4	2	-500	0	1	0	0	0
5	2,5	-354	0	1	-354	0	1
6	3	0	0	0	-500	0	1
7	3,5	+354	1	0	-354	0	1
0	4	+500	1	0	0	0	0

Tabulka 8: Řízení s polovičním krokem

5.2.3. Řízení mikrokrokováním

Tento způsob řízení je popsán v kapitole 2.3.2.4 včetně uvedení obecných vztahů pro výpočet velikosti proudu v jednotlivých mikrokrocích. Během otáčení motoru z kroku 0 do kroku 1 podle Tabulka 7 a Tabulka 8 bude proud při jednotlivých mikrokrocích následující:

Stav	Krok	Mikrokrok	I_A [mA]	I_B [mA]
0	0	0	500	0
1	0,25	1	461	191
1	0,50	2	354	354
1	0,75	3	191	461
2	1	4	0	500

Tabulka 9: Řízení mikrokrokováním

A proudy ve fázích byly vypočteny pomocí těchto vztahů:

$$I_A = I_{max} \cdot \sin\left(\frac{1}{4} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot x + \frac{\pi}{2}\right) [A] \quad (17)$$

$$I_B = I_{max} \cdot \sin\left(\frac{1}{4} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot x\right) [A] \quad (18)$$

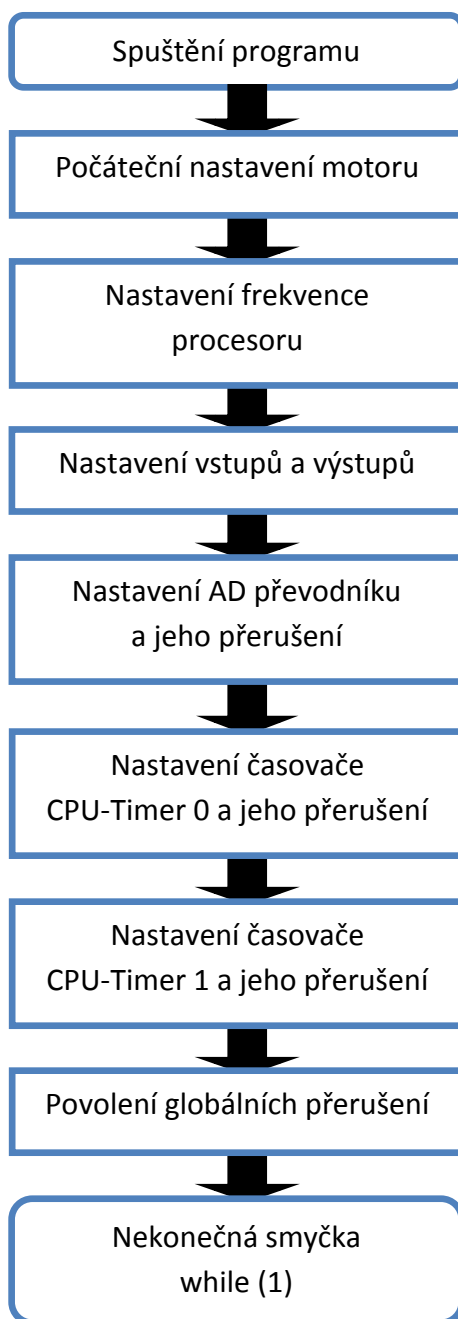
5.2.4. Režim otočení

Tento režim využívá řízení s celým krokem a funguje tak, že se motor po spuštění otočí o 90° a zastaví se. Celý krok má velikost $1,8^\circ$, takže úhel 90° odpovídá 50 krokům. Režim otočení byl do programu zařazen z toho důvodu, že se krokové motory používají v aplikacích, kde je třeba přesně nastavit polohu. Tento režim má za úkol tuto schopnost motoru a programu demonstrovat.

5.3. Vývojový diagram

Vývojový diagram je pro větší přehlednost rozdělen do dvou částí, a to do částí spuštění programu a běh programu.

5.3.1. Spuštění programu

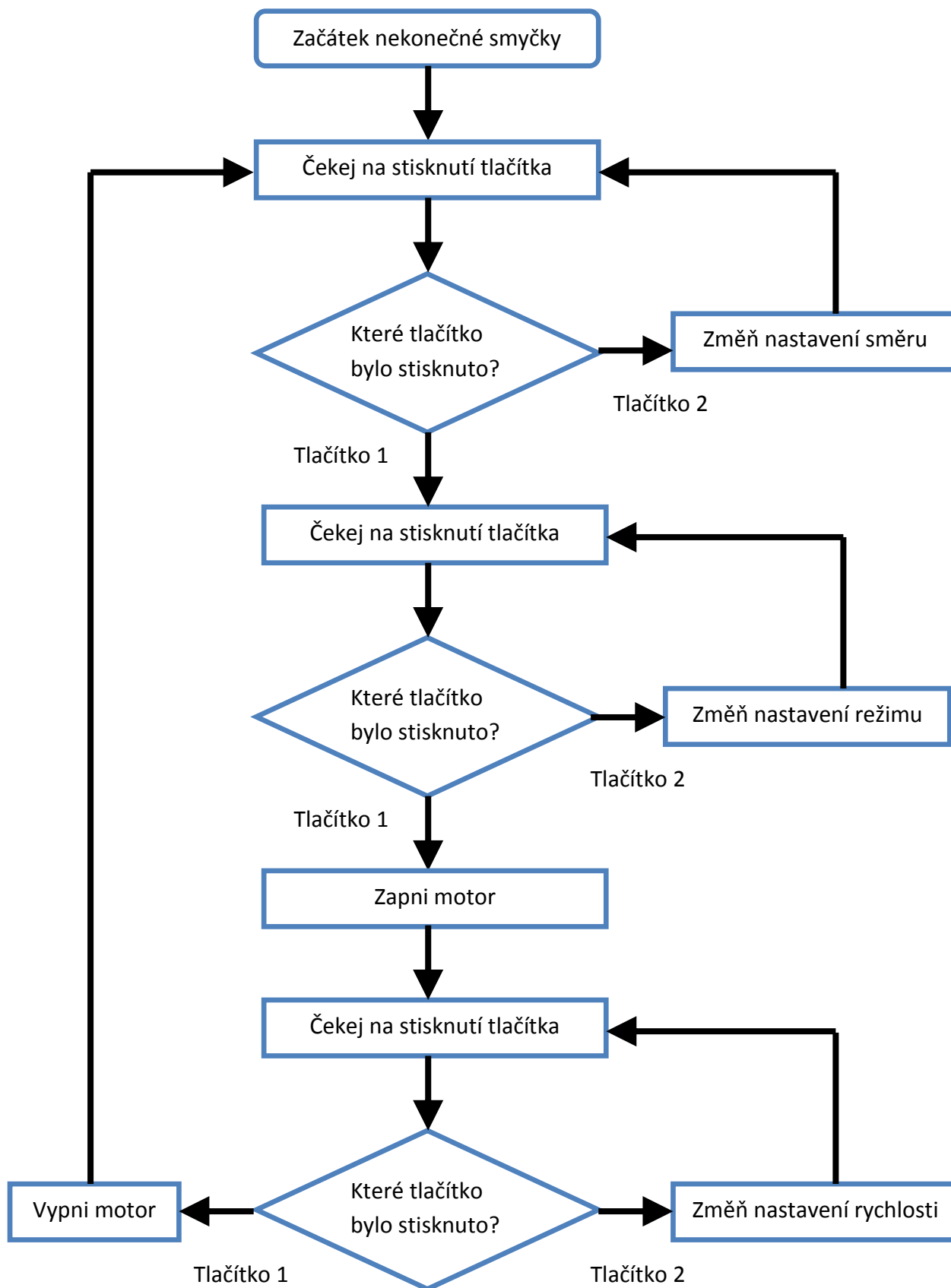


Obr. 29: Vývojový diagram pro spuštění programu

Obr. 29 znázorňuje kroky provedené po spuštění programu. Nejprve je provedeno přiřazení hodnot do struktury zvané motor, která obsahuje proměnné určující chování motoru. Počáteční nastavení je následující: režim je nastaven na řízení s celým krokem, směr otáčení je po směru hodinových ručiček, rychlost je nastavena jako nejmenší možná, obě fáze jsou vypnuty a také motor jako celek je vypnut. Dalšími kroky jsou nastavení frekvence procesoru na 50 MHz, nastavení příslušných GPIO jako vstupy nebo jako výstupy, nastavení AD převodníku a obou časovačů. Dochází také k nastavení a povolení přerušování těchto časovačů a AD převodníku, nicméně k přerušování může dojít teprve když jsou povolena globální přerušování. To je také poslední krok před vstupem do nekonečné smyčky, ve které program zůstává po celou dobu svého spuštění, s výjimkou obsluhy přerušování. Na pořadí kroků provedených po spuštění programu nezáleží, vyjma posledních dvou kroků. Obecně platí, že globální přerušování by měla být povolena až ve chvíli, když mají všechna jednotlivá přerušování požadované nastavení.

5.3.2. Běh programu

Vývojový diagram pro běh programu je na Obr. 30. Ve chvíli, kdy program vstoupí do nekonečné smyčky, je směr nastavený na otáčení po směru hodinových ručiček, což ukazuje zhasnutá LED na GPIO 1, umístěna jako druhá zprava na vývojové desce. Režim je nastaven na řízení s celým krokem, což ukazují dvě zhasnuté LED na GPIO 2 a GPIO 3, umístěné jako první a druhá zleva. Motor je v tomto okamžiku vypnutý, takže LED na GPIO 0 je zhasnutá. Jestliže je stisknuto tlačítko 2, dojde ke změně nastaveného směru a LED na GPIO 1 se rozsvítí. Při opětovném stisknutí tohoto tlačítka LED zhasne a směr je nastaven zpátky na počáteční hodnotu. Pokud je stisknuto tlačítko 1, LED na GPIO 0 začne blikat. V tomto stavu lze pomocí tlačítka 2 nastavovat režim. Motor je stále vypnutý. Teprve při dalším stisknutí tlačítka 1 je motor spuštěn a běží v nastaveném režimu a směru. Tlačítkem 2 lze za běhu motoru měnit rychlost. Dalším stisknutím tlačítka 1 se motor vypne a program se dostane na začátek cyklu.



Obr. 30: Vývojový diagram pro běh programu

6. Ověření funkčnosti návrhu

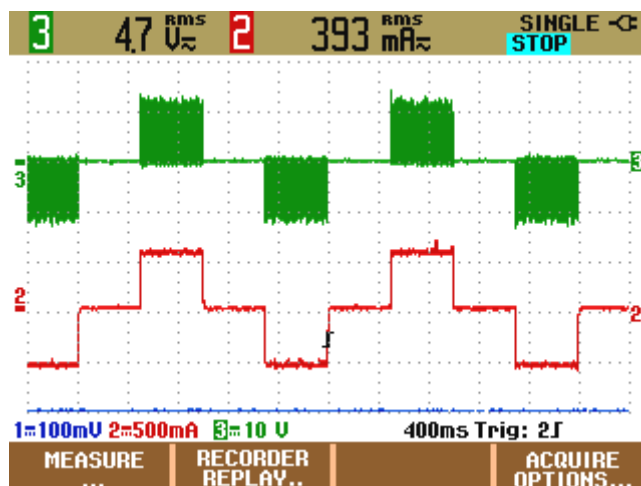
Řídicí obvod podle kapitoly **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** byl sestrojen a následně propojen s vývojovou deskou LAUNCHXL-F28027 vybavenou mikrokontrolérem TMS320F28027 od firmy Texas Instruments. K takto vytvořenému driveru byl připojen krokový motor SX17-1005 od firmy Microcon.

Z vizuálního hlediska funguje obvod a program správně. Krokový motor se otáčí ve všech režimech dle očekávání, přepínání rychlosti a směru funguje bez problémů. Při použití režimu otočení se motor otočí přesně o požadovaných 90°. Drobné potíže se vyskytují u mikrokrokování, u kterého je vidět, že velikost jednotlivých mikrokroků se mírně liší, což je s největší pravděpodobností zapříčiněno nepřesností měření a regulace proudu.

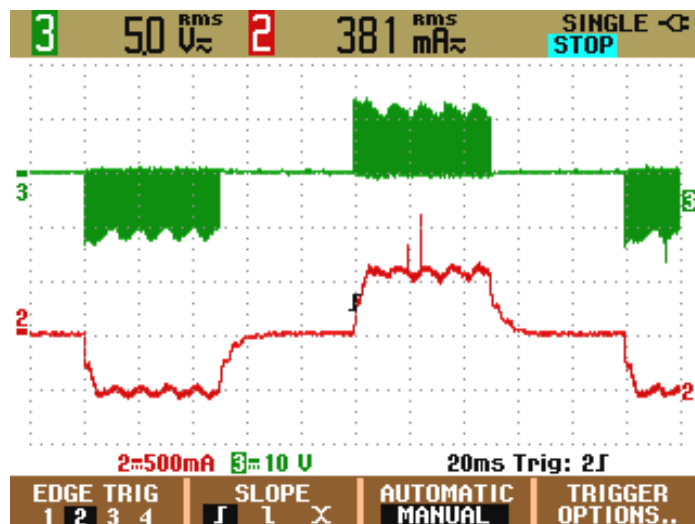
Důležitou součástí ověření funkčnosti je změření průběhů proudů fází krokového motoru v různých režimech, které dokumentuje, s jakou přesností funguje měření a regulace proudu. Vysoká přesnost je důležitá především v režimech, kdy je jeden krok rozdělen do více částí, tj. řízení s polovičním krokem a řízení mikrokrokováním. Na následujících obrázcích jsou tyto průběhy zobrazeny včetně jejich popisu.

Na všech obrázcích z osciloskopu je napětí fáze na kanálu 3 a proud fáze na kanálu 2. Průběhy, které obsahují proudy obou fází je proud druhé fáze na kanálu 1. Měřítka jsou uvedena ve spodní části každého obrázku.

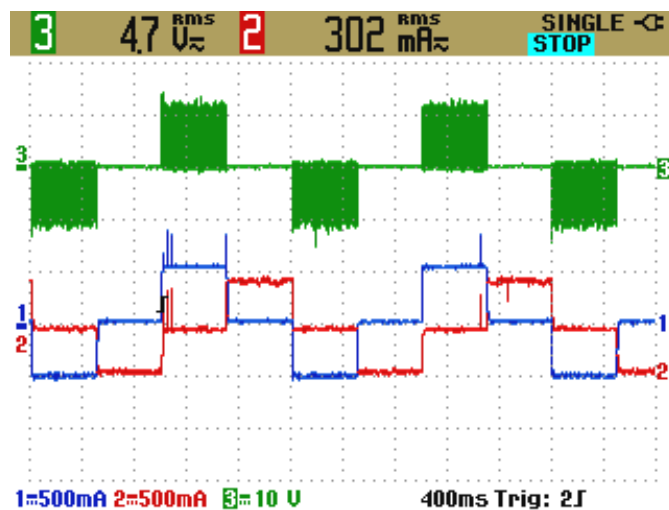
6.1. Řízení s celým krokem



Obr. 31: Průběhy proudu a napětí pro řízení s celým krokem



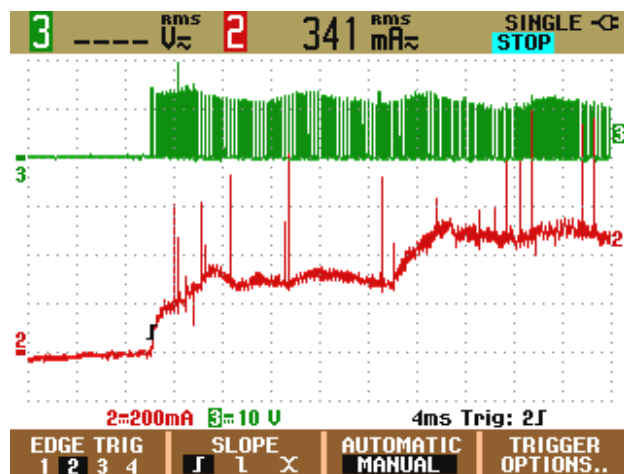
Obr. 32: Průběhy proudu a napětí pro řízení s celým krokem v detailu



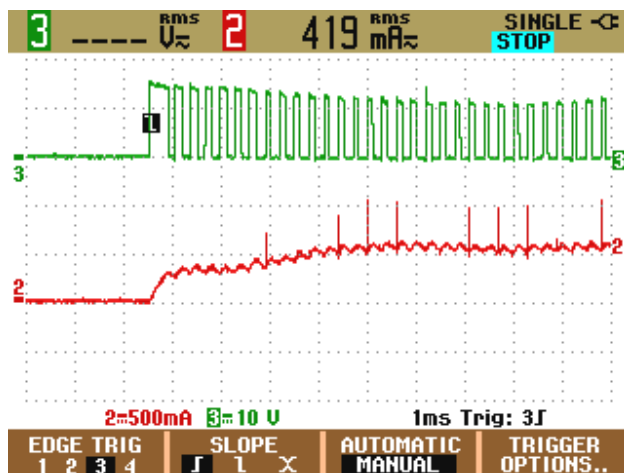
Obr. 33: Průběhy proudů obou fází a napětí pro řízení s celým krokem

Na Obr. 31 až Obr. 33 jsou průběhy napětí a proudů pro řízení motoru s celým krokem. Z těchto průběhů je vidět, že velikost proudu při sepnuté fázi je téměř přesně požadovaných 500 mA, což je jmenovitý proud zdroje, a proud se od této hodnoty příliš nevzdaluje. To je dáno vysokou frekvencí PWM, která je 20 kHz. Z tohoto důvodu také není na kanálu 3 vidět vypínání a zapínání fáze, protože průběh splynul v jednu souvislou plochu. Na Obr. 32 jsou zřetelné přechodné děje při zapínání a vypínání fáze, způsobené indukčností vinutí. Na Obr. 33 jsou průběhy proudů obou fází, kde v okamžiku, kdy je jedna fáze vypnuta, je druhá fáze zapnuta.

6.2. Řízení s polovičním krokem



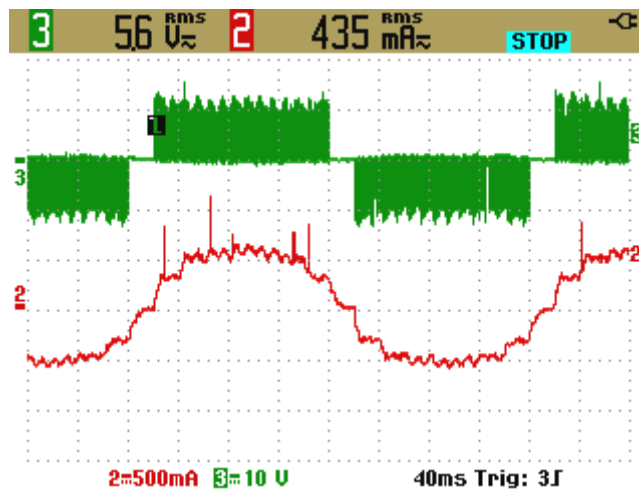
Obr. 34: Průběhy proudu a napětí pro řízení s polovičním krokem v detailu 1



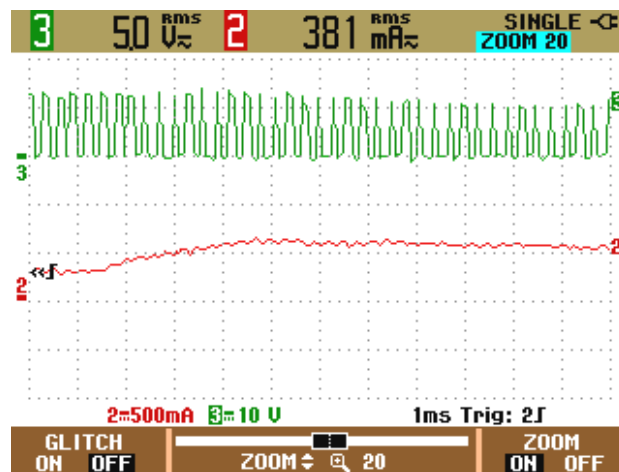
Obr. 35: Průběhy proudu a napětí pro řízení s polovičním krokem v detailu 2

Na dvou předešlých obrázcích jsou průběhy pro řízení s polovičním krokem. Na prvním z obrázků je dobře vidět, jak se jedna z fází přepíná z polovičního kroku do celého kroku. Na druhém obrázku není tento přechod až tak zřetelný, protože průběh má menší měřítko a ukazuje krátký časový úsek.

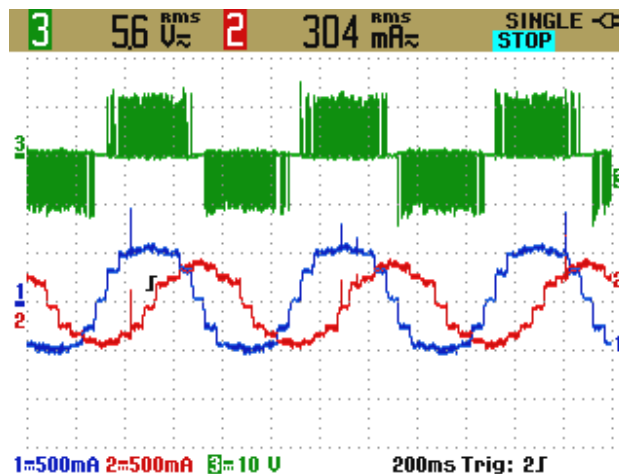
6.3. Řízení mikrokrokováním



Obr. 36: Průběhy proudu a napětí pro řízení mikrokrokováním



Obr. 37: Průběhy proudu a napětí pro řízení mikrokrokováním v detailu

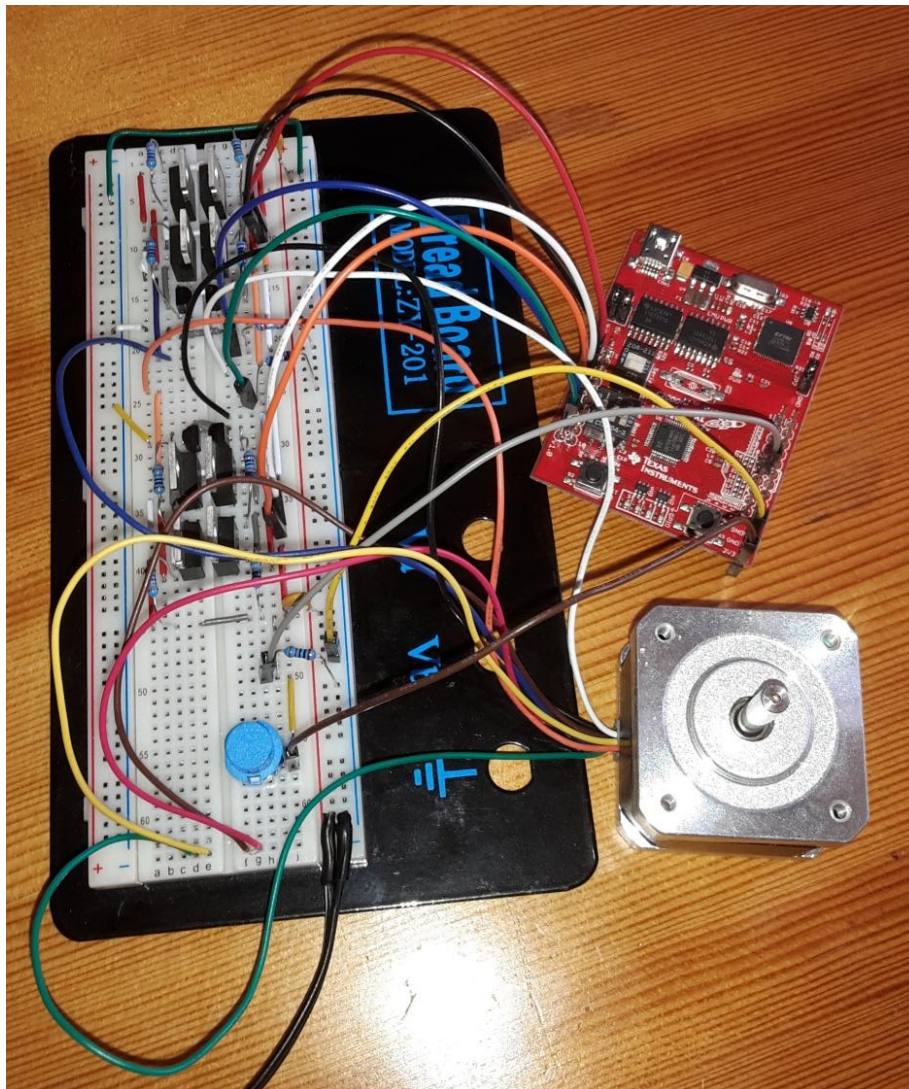


Obr. 38: Průběhy proudu obou fází a napětí pro řízení mikrokrokováním

Na Obr. 36 je vidět, že je průběh proudu podobný sinusovému průběhu. Čím je větší počet mikrokroků, tím je tato podobnost větší. Pokud by byl průběh čistě sinusový, motor by se otáčel plynule. Na dalším obrázku je detail přechodu fáze mezi dvěma mikrokroky a na posledním obrázku vidíme průběhy proudů obou fází současně.

6.4. Fotografie sestaveného obvodu

Na Obr. 39 je fotografie řídicího obvodu na nepájivém kontaktním poli, vývojové desky s mikrokontrolérem a krokového motoru. Tranzistory p-MOSFET se nacházejí v obou můstcích na vnější straně, tranzistory n-MOSFET na vnitřní straně obvodu a bipolární tranzistory jsou u středu.



Obr. 39: Fotografie sestaveného driveru

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo popsat stavbu krokových motorů, popsat způsoby jejich řízení, navrhnout strukturu měniče pro řízení krokového motoru a vyzkoušet návrh pomocí mikroprocesory od firmy TI.

Stavbou všech tří druhů krokových motorů, tedy motoru s permanentním magnetem, motoru s proměnnou reluktancí a hybridního motoru, se zabývá první kapitola. Je zde vysvětlen základní princip jejich fungování, obrázky a rozdíly jednotlivých druhů.

Druhá kapitola se detailně věnuje způsobům řízení krokových motorů z několika různých hledisek včetně posloupnosti, ve které jsou buzeny fáze motoru jak pro unipolární řízení, tak i bipolární. V této kapitole jsou také uvedeny řídicí obvody pro unipolární motory, bipolární motory a motory s proměnnou reluktancí. Teoretické poznatky z kapitoly o řízení byly využity při návrhu driveru krokového motoru v praktické části práce.

Při navrhování driveru bylo v první řadě třeba vycházet z druhu použitého krokového motoru, kterým byl hybridní motor s osmi vyvedenými vodiči. Z toho plyne, že bylo možné použít jak unipolární, tak i bipolární způsob řízení. Zvolen byl bipolární způsob, protože je v praxi více využíván z důvodu vyššího dosažitelného momentu. Z této volby plyne nutnost použít složitějšího zapojení než v případě unipolárního řízení včetně většího počtu součástek.

Navržené můstkové zapojení má výhodu v tom, že potřebuje pouze čtyři výstupy mikrokontroléru, protože každým z nich jsou řízeny dva tranzistory. K použití tohoto obvodu postačuje jeden napěťový zdroj, který slouží jako napájení motoru a zároveň jako napětí pro otevírání tranzistorů MOSFET. To ovšem může být také jeho nevýhoda, jak se ukázalo při použití zdroje o napětí 18,5 V, což je napětí velice blízké maximálnímu napětí gate-source tranzistoru, kterým je napětí 20 V. Použití tohoto zdroje mělo za následek to, že v obvodu docházelo ke zkratům, rychlému zahřívání tranzistorů a dokonce ke zničení dvou z nich. Z tohoto důvodu byl 18,5V zdroj vyměněn za 12V zdroj, který tyto problémy již nezpůsobil.

Testování driveru proběhlo pro všechny způsoby řízení krokového motoru, tedy řízení s celým krokem, řízení s polovičním krokem a řízení mikrokrokování. Během všech způsobů řízení se motor choval dle očekávání. Bylo také provedeno měření proudu pomocí osciloskopu a ukázalo se, že řídicí program umí pomocí AD převodníku mikrokontroléru poměrně přesně regulovat proud na požadovanou hodnotu. Použito bylo měření proudu pomocí jednoho měřicího rezistoru pro každou fázi s tím, že když proud překročil požadovanou hodnotu, je fáze odpojována na 100 mikrosekund. Měření proudu na napěťovém děliči se ukázalo jako nepřesné.

Seznam použité literatury

- [1] McCOMB, Marc: Introduction to Stepper Motors [online]. Microchip Technology Incorporated, 2007 [cit. 10. 4. 2017]. Dostupné z http://www.microchip.com/stellent/groups/SiteComm_sg/documents/DeviceDoc/en543047.pdf
- [2] EARL, Bill: All About Stepper Motors [online]. Adafruit Industries. Poslední změna 29. 9. 2015 [cit. 16. 4. 2017]. Dostupné z <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/all-about-stepper-motors.pdf>
- [3] HOPKINS, Thomas: Stepper motor driving [online]. STMicroelectronics, 11/2012 [cit. 20. 4. 2017]. Dostupné z http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/57/c8/7c/c1/0d/91/46/89/CD00003774.pdf/files/CD00003774.pdf/jcr:content/translations/en.CD00003774.pdf
- [4] Standardní zapojení vinutí [online]. MICROCON, s.r.o. [cit. 25. 4. 2017]. Dostupné z <http://microcon.cz/zapojenivinuti2012web/zapojenivnutipdf2012/ZV8lw.pdf>
- [5] Hybridní dvoufázové krokové motory řady SX [online]. MICROCON, s.r.o., 9/2015 [cit. 25. 4. 2017]. Dostupné z <http://microcon.cz/pdf2015/motorySX.pdf>
- [6] LAUNCHXL-F28027 C2000 Piccolo LaunchPad Experimenter Kit - User's Guide [online]. Texas Instruments Incorporated, 07/2012. Poslední změna 01/2014 [cit. 5. 5. 2017]. Dostupné z <http://www.ti.com/lit/ug/spruhh2a/spruhh2a.pdf>
- [7] TMS320F2802x Piccolo™ Microcontrollers [online]. Texas Instruments Incorporated, 11/2008. Poslední změna 06/2016 [cit. 5. 5. 2017]. Dostupné z <http://www.ti.com/lit/ds/sprs523k/sprs523k.pdf>
- [8] Thing-O-Matic: MBI Stepper Motor Analysis [online]. 5. 5. 2011. Dostupné z <https://softsolder.com/2011/05/05/thing-o-matic-mbi-stepper-motor-analysis/>
- [9] Stepper motor. In: Wikipedie: otevřená encyklopedie [online]. Wikimedia Foundation, 2003. Stránka naposledy edit. 18. 5. 2017 v 16:27. [cit. 20. 5. 2017]. Anglická verze. Dostupné z https://en.wikipedia.org/wiki/Stepper_motor

Seznam symbolů a zkratk

$\Delta\Phi$	Velikost kroku
m	Počet fází statoru
N	Počet zubů rotoru
n	Počet kroků na otáčku
I_V	Proud vinutím
U	Napájecí napětí
R_c	Celkový odpor obvodu vinutí
R_V	Odpor vinutí
L_V	Indukčnost vinutí
τ_V	Časová konstanta vinutí
M	Moment
k	Konstrukční konstanta motoru
ϕ	Magnetický indukční tok
R_p	Odpor přídavného rezistoru
I_N	Jmenovitý proud
I_A	Proud tekoucí fází A
I_B	Proud tekoucí fází B
y	Počet mikrokroků, na které je rozdělen jeden krok
x	Číslo mikrokroku
U_O	Napětí na výstupu mikrokontroléru
I_O	Proud z výstupu mikrokontroléru
U_B	Úbytek napětí na bázi bipolárního tranzistoru

Seznam obrázků

Obr. 1: Krokový motor s permanentním magnetem [1]	10
Obr. 2: Princip motoru s permanentním magnetem [1]	10
Obr. 3: Krokový motor s proměnnou reluktancí [1]	11
Obr. 4: Princip motoru s proměnnou reluktancí [1]	11
Obr. 5: Hybridní krokový motor [1]	12
Obr. 6: Princip hybridního krokového motoru 1 [1]	13
Obr. 7: Princip hybridního krokového motoru 2 [1]	13
Obr. 8: Motor se 4 vodiči [2]	14
Obr. 9: Motor s 5 vodiči [2]	15
Obr. 10: Motor se 6 vodiči [2]	15
Obr. 11: Motor s 8 vodiči [2]	16
Obr. 12: Porovnání řízení L/R, L/5R a PWM [3]	18
Obr. 13: Řízení s celým krokem a buzením jedné fáze	19
Obr. 14: Řízení s celým krokem a buzením dvou fází	19
Obr. 15: Řízení s polovičním krokem	20
Obr. 16: Unipolární mikrokrokování [9]	20
Obr. 17: Řízení s celým krokem a buzením jedné fáze	21
Obr. 18: Řízení s celým krokem a buzením dvou fází	21
Obr. 19: Řízení s polovičním krokem	22
Obr. 20: Bipolární mikrokrokování [8]	23
Obr. 21: Obvod pro unipolární řízení	24
Obr. 22: Obvod pro bipolární řízení	25
Obr. 23: Obvod pro řízení motoru s proměnnou reluktancí	25
Obr. 24: Vývojová deska LAUNCHXL-F28027 [6]	27
Obr. 25: Můstek pro řízení krokového motoru s měřením proudu na děliči	28
Obr. 26: Tok proudu můstkem 1	29
Obr. 27: Tok proudu můstkem 2	30
Obr. 28: Můstek pro řízení krokového motoru s přímým měřením proudu	32
Obr. 29: Vývojový diagram pro spuštění programu	36
Obr. 30: Vývojový diagram pro běh programu	38
Obr. 31: Průběhy proudu a napětí pro řízení s celým krokem	39
Obr. 32: Průběhy proudu a napětí pro řízení s celým krokem v detailu	40
Obr. 33: Průběhy proudů obou fází a napětí pro řízení s celým krokem	40
Obr. 34: Průběhy proudu a napětí pro řízení s polovičním krokem v detailu 1	41
Obr. 35: Průběhy proudu a napětí pro řízení s polovičním krokem v detailu 2	41
Obr. 36: Průběhy proudu a napětí pro řízení mikrokrokováním	42
Obr. 37: Průběhy proudu a napětí pro řízení mikrokrokováním v detailu	42
Obr. 38: Průběhy proudu obou fází a napětí pro řízení mikrokrokováním	42
Obr. 39: Fotografie sestaveného driveru	43

Seznam tabulek

Tabulka 1: Proudý ve fázích při mikrokrokování	23
Tabulka 2: Bipolární sériové zapojení vinutí motoru SX17-1005 [4].....	26
Tabulka 3: Parametry motoru SX17-1005 [5].....	26
Tabulka 4: Spínání můstku	30
Tabulka 5: Seznam použitých součástek	32
Tabulka 6: Použité vstupy a výstupy	33
Tabulka 7: Řízení s celým krokem	34
Tabulka 8: Řízení s polovičním krokem	35
Tabulka 9: Řízení mikrokrokováním	35

Příloha: zdrojový kód řídicího programu

```
#include "DSP28x_Project.h"
#include "f2802x_common/include/cpu.h"
#include "f2802x_common/include/timer.h"
#include "f2802x_common/include/gpio.h"
#include "f2802x_common/include/pie.h"
#include "f2802x_common/include/adc.h"
#include "f2802x_common/include/clk.h"
#include "f2802x_common/include/pll.h"
#define MILISEKUNDA          (uint32_t)50000
#define MIKROSEKUNDA        (uint32_t)50
#define PERIODA_AD_PREVODNIKU 50 * MIKROSEKUNDA
#define PERIODA_BLIKANI      200 * MILISEKUNDA
#define MAXIMUM_CELE         200
#define MAXIMUM_TRICTVRTINOVE 185
#define MAXIMUM_POLOVICNI    141
#define MAXIMUM_CTVRTINOVE   77
#define CELY_KROK             0
#define POLOVICNI_KROK       1
#define MIKROKROKOVANI       2
#define OTOCENI              3
#define PO_SMERU              0
#define PROTI_SMERU          1

CPU_Handle myCpu;
TIMER_Handle myTimer0;
TIMER_Handle myTimer1;
GPIO_Handle myGpio;
PIE_Handle myPie;
ADC_Handle myAdc;
CLK_Handle myClk;
PLL_Handle myPll;

interrupt void casovac_0_isr();
interrupt void casovac_1_isr();
interrupt void adc_isr();
struct
{
    unsigned int perioda : 3;
    unsigned int stav : 3;
    unsigned int rezim : 2;
    unsigned int mikrokrok : 2;
    unsigned int smer : 1;
    unsigned int smer_nastaven : 1;
    unsigned int faze_a_zapnuta : 1;
    unsigned int faze_b_zapnuta : 1;
    unsigned int zapnut : 1;
} motor;

void main()
{
    myCpu = CPU_init((void *)NULL, sizeof(CPU_Obj));
    myTimer0 = TIMER_init((void *)TIMER0_BASE_ADDR, sizeof(TIMER_Obj));
    myTimer1 = TIMER_init((void *)TIMER1_BASE_ADDR, sizeof(TIMER_Obj));
    myGpio = GPIO_init((void *)GPIO_BASE_ADDR, sizeof(GPIO_Obj));
    myPie = PIE_init((void *)PIE_BASE_ADDR, sizeof(PIE_Obj));
    myAdc = ADC_init((void *)ADC_BASE_ADDR, sizeof(ADC_Obj));
    myClk = CLK_init((void *)CLK_BASE_ADDR, sizeof(CLK_Obj));
    myPll = PLL_init((void *)PLL_BASE_ADDR, sizeof(PLL_Obj));
```

```

// Periody přepínání fází v milisekundách
const unsigned int periody[8] = {500, 200, 100, 75, 50, 20, 10, 5};
// Počáteční nastavení motoru
motor.perioda = 0;
motor.stav = 0;
motor.rezim = CELY_KROK;
motor.mikrokrok = 0;
motor.smer = PO_SMERU;
motor.smer_nastaven = 0;
motor.faze_a_zapnuta = 0;
motor.faze_b_zapnuta = 0;
motor.zapnut = 0;

// Nastavení frekvence, interní oscilátor: f = 10 MHz,
// PLL: f = 10 MHz * 10 / 2 = 50 MHz
CLK_setOscSrc(myClk, CLK_OscSrc_Internal);
PLL_setup(myPll, PLL_Multiplier_10, PLL_DivideSelect_ClkIn_by_2);

// Nastavení vstupů a výstupů
GPIO_setMode(myGpio, GPIO_Number_18, GPIO_18_Mode_GeneralPurpose);
GPIO_setMode(myGpio, GPIO_Number_28, GPIO_28_Mode_GeneralPurpose);
GPIO_setMode(myGpio, GPIO_Number_29, GPIO_29_Mode_GeneralPurpose);
GPIO_setMode(myGpio, GPIO_Number_34, GPIO_34_Mode_GeneralPurpose);

GPIO_setDirection(myGpio, GPIO_Number_0, GPIO_Direction_Output);
// LED signalizující zapnutý motor
GPIO_setDirection(myGpio, GPIO_Number_1, GPIO_Direction_Output);
// LED ukazující směr / rychlost
GPIO_setDirection(myGpio, GPIO_Number_2, GPIO_Direction_Output);
// LED ukazující režim / rychlost
GPIO_setDirection(myGpio, GPIO_Number_3, GPIO_Direction_Output);
// LED ukazující režim / rychlost
GPIO_setDirection(myGpio, GPIO_Number_5, GPIO_Direction_Input);
// tlačítko pro směr, režim a rychlost
GPIO_setDirection(myGpio, GPIO_Number_12, GPIO_Direction_Output);
// tlačítko pro zapnutí
GPIO_setDirection(myGpio, GPIO_Number_18, GPIO_Direction_Output);
// fáze A
GPIO_setDirection(myGpio, GPIO_Number_28, GPIO_Direction_Output);
// fáze A´
GPIO_setDirection(myGpio, GPIO_Number_29, GPIO_Direction_Output);
// fáze B
GPIO_setDirection(myGpio, GPIO_Number_34, GPIO_Direction_Output);
// fáze B´

// Nastavení AD převodníku
CLK_enableAdcClock(myClk);
(*Device_cal)();
ADC_powerUp(myAdc);
ADC_enableBandGap(myAdc);
ADC_enableRefBuffers(myAdc);
ADC_enable(myAdc);
ADC_setVoltRefSrc(myAdc, ADC_VoltageRefSrc_Int);
// Nastavení převodů na kanálech ADCINA2 a ADCINB2
ADC_setSocChanNumber(myAdc, ADC_SocNumber_0,
ADC_SocChanNumber_A2_and_B2_Together);
ADC_setSocTrigSrc(myAdc, ADC_SocNumber_0, ADC_SocTrigSrc_CpuTimer_1);
ADC_setSampleMode(myAdc, ADC_SampleMode_SOC0_and_SOC1_Together);
ADC_setSocSampleWindow(myAdc, ADC_SocNumber_0,
ADC_SocSampleWindow_20_cycles);

```

```

// Nastavení přerušení AD převodníku
ADC_setIntSrc(myAdc, ADC_IntNumber_1, ADC_IntSrc_EOC0);
ADC_enableInt(myAdc, ADC_IntNumber_1);
PIE_registerPieIntHandler(myPie, PIE_GroupNumber_10,
                          PIE_SubGroupNumber_1, (intVec_t)&adc_isr);
PIE_enableAdcInt(myPie, ADC_IntNumber_1);
CPU_enableInt(myCpu, CPU_IntNumber_10);

// Nastavení časovače 0, slouží k přepínání fází
TIMER_setPeriod(myTimer0, periody[motor.perioda] * MILISEKUNDA);
TIMER_enableInt(myTimer0);
PIE_registerPieIntHandler(myPie, PIE_GroupNumber_1,
                          PIE_SubGroupNumber_7, (intVec_t)&casovac_0_isr);
PIE_enableTimer0Int(myPie);
CPU_enableInt(myCpu, CPU_IntNumber_1);

// Nastavení časovače 1, slouží pro spouštění AD převodů
TIMER_setPeriod(myTimer1, PERIODA_AD_PREVODNIKU);
TIMER_enableInt(myTimer1);
PIE_registerSystemIntHandler(myPie, PIE_SystemInterrupts_TINT1,
                              (intVec_t)casovac_1_isr);

// Nastavení přerušení
PIE_enable(myPie);
CPU_enableGlobalInts(myCpu);

struct
{
    unsigned int soucasna_hodnota : 1;
    unsigned int minula_hodnota : 1;
} tlacitko_1, tlacitko_2;

while (1)
{
    if (motor.zapnut)
    {
        GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_0);
        if (motor.perioda & 1 << 0)
            GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_1);
        else
            GPIO_setHigh(myGpio, GPIO_Number_1);
        if (motor.perioda & 1 << 1)
            GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_2);
        else
            GPIO_setHigh(myGpio, GPIO_Number_2);
        if (motor.perioda & 1 << 2)
            GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_3);
        else
            GPIO_setHigh(myGpio, GPIO_Number_3);
        if (motor.faze_a_zapnuta)
        {
            switch (motor.stav)
            {
                case 0:
                    GPIO_setHigh(myGpio, GPIO_Number_28);
                    GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_29);
                    break;
                case 1:
                    GPIO_setHigh(myGpio, GPIO_Number_28);
                    GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_29);
            }
        }
    }
}

```

```

        break;
    case 2:
        GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_28);
        GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_29);
        break;
    case 3:
        GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_28);
        GPIO_setHigh(myGpio, GPIO_Number_29);
        break;
    case 4:
        GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_28);
        GPIO_setHigh(myGpio, GPIO_Number_29);
        break;
    case 5:
        GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_28);
        GPIO_setHigh(myGpio, GPIO_Number_29);
        break;
    case 6:
        GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_28);
        GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_29);
        break;
    case 7:
        GPIO_setHigh(myGpio, GPIO_Number_28);
        GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_29);
        break;
    }
} // konec if (motor.faze_a_zapnuta)
else
{
    GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_28);
    GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_29);
}
if (motor.faze_b_zapnuta)
{
    switch (motor.stav)
    {
    case 0:
        GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_34);
        GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_18);
        break;
    case 1:
        GPIO_setHigh(myGpio, GPIO_Number_34);
        GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_18);
        break;
    case 2:
        GPIO_setHigh(myGpio, GPIO_Number_34);
        GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_18);
        break;
    case 3:
        GPIO_setHigh(myGpio, GPIO_Number_34);
        GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_18);
        break;
    case 4:
        GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_34);
        GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_18);
        break;
    case 5:
        GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_34);
        GPIO_setHigh(myGpio, GPIO_Number_18);
        break;
    case 6:

```

```

        GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_34);
        GPIO_setHigh(myGpio, GPIO_Number_18);
        break;
    case 7:
        GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_34);
        GPIO_setHigh(myGpio, GPIO_Number_18);
        break;
    }
} // konec if (motor.faze_b_zapnuta)
else
{
    GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_34);
    GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_18);
}
} // konec if (motor.zapnut)
else
{
    GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_28);
    GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_29);
    GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_34);
    GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_18);
    if (!motor.smer_nastaven)
        GPIO_setHigh(myGpio, GPIO_Number_0);
    if (motor.smer)
        GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_1);
    else
        GPIO_setHigh(myGpio, GPIO_Number_1);
    if (motor.rezim & 1 << 0)
        GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_2);
    else
        GPIO_setHigh(myGpio, GPIO_Number_2);
    if (motor.rezim & 1 << 1)
        GPIO_setLow(myGpio, GPIO_Number_3);
    else
        GPIO_setHigh(myGpio, GPIO_Number_3);
}
// Tlačítko pro zapnutí
tlacitko_1.minula_hodnota = tlacitko_1.soucasna_hodnota;
tlacitko_1.soucasna_hodnota = GPIO_getData(myGpio, GPIO_Number_12);
if (tlacitko_1.soucasna_hodnota && !tlacitko_1.minula_hodnota)
{
    if (!motor.smer_nastaven && !motor.zapnut)
    {
        motor.smer_nastaven = 1;
        TIMER_setPeriod(myTimer1, PERIODA_BLIKANI);
        CPU_enableInt(myCpu, CPU_IntNumber_13);
        // Povolení přerušeni časovače 1
    }
    else if (!motor.zapnut)
    {
        motor.zapnut = 1;
        TIMER_setPeriod(myTimer1, PERIODA_AD_PREVODNIKU);
        CPU_disableInt(myCpu, CPU_IntNumber_13);
        // Zablokování přerušeni časovaše 1
    }
    else if (motor.zapnut)
    {
        motor.zapnut = 0;
        motor.smer_nastaven = 0;
    }
}
}

```

```

// Tlačítko pro směr, režim a rychlost
tlacitko_2.minula_hodnota = tlacitko_2.soucasna_hodnota;
tlacitko_2.soucasna_hodnota = GPIO_getData(myGpio, GPIO_Number_5);
if (tlacitko_2.soucasna_hodnota && !tlacitko_2.minula_hodnota)
{
    if (!motor.smer_nastaven && !motor.zapnut)
        motor.smer++;
    else if (!motor.zapnut)
    {
        if ((motor.rezim == MIKROKROKOVANI) &&
            (motor.stav % 2 == 1))
        {
            motor.mikrokrok = 0;
            motor.stav++;
        }
        motor.rezim++;
    }
    else if (motor.zapnut)
    {
        motor.perioda++; // Změna rychlosti otáčení
        TIMER_setPeriod(myTimer0,
                        periody[motor.perioda] * MILISEKUNDA);
    }
}
} // konec while (1)
} // konec void main()

interrupt void casovac_1_isr()
{
    GPIO_toggle(myGpio, GPIO_Number_0);
    // Blikající LED ukazuje, že lze nastavovat režim
}

interrupt void casovac_0_isr()
{
    static unsigned int citac = 0;
    if (motor.zapnut)
    {
        switch (motor.rezim)
        {
            case OTOCENI:
            {
                if (citac == 50)
                {
                    citac = 0;
                    motor.zapnut = 0;
                    motor.smer_nastaven = 0;
                    break;
                }
                citac++;
            }
            case CELY_KROK:
            {
                switch (motor.smer)
                {
                    case PO_SMERU:
                        motor.stav += 2;
                        break;
                    case PROTI_SMERU:
                        motor.stav -= 2;
                        break;
                }
                break;
            }
            case POLOVICNI_KROK:

```

```

        switch (motor.smer)
        {
            case PO_SMERU:
                motor.stav++;
                break;
            case PROTI_SMERU:
                motor.stav--;
                break;
        }
        break;
    case MIKROKROKOVANI:
        switch (motor.smer)
        {
            case PO_SMERU:
                if (motor.stav % 2 == 0 || motor.mikrokrok == 3)
                {
                    motor.stav++;
                }
                motor.mikrokrok++;
                break;
            case PROTI_SMERU:
                if (motor.stav % 2 == 0 || motor.mikrokrok == 1)
                {
                    motor.stav--;
                }
                motor.mikrokrok--;
                break;
        }
        break;
    }
}
PIE_clearInt(myPie, PIE_GroupNumber_1);
}

interrupt void adc_isr()
{
    static unsigned int a2[3] = {0, 0, 0}, b2[3] = {0, 0, 0}, vyp_a = 0,
                        vyp_b = 0, i = 0;
    unsigned int a2_prumer, b2_prumer, maximum_a, maximum_b;

    a2[i] = ADC_readResult(myAdc, ADC_ResultNumber_0);
    // Výsledek převodu na ADCINA2
    a2_prumer = (a2[0] + a2[1] + a2[2]) / 3;
    b2[i] = ADC_readResult(myAdc, ADC_ResultNumber_1);
    // Výsledek převodu na ADCINB2
    b2_prumer = (b2[0] + b2[1] + b2[2]) / 3;

    if (motor.stav % 2 == 0) // Celé kroky
    {
        maximum_a = MAXIMUM_CELE;
        maximum_b = MAXIMUM_CELE;
    }
    else if ((motor.stav % 2 == 1) && (motor.mikrokrok % 2 == 0))
    // Poloviční kroky
    {
        maximum_a = MAXIMUM_POLOVICNI;
        maximum_b = MAXIMUM_POLOVICNI;
    }
}

```

```

else if (motor.mikrokrok) // Mikrokroky
{
    if ((motor.stav == 1 && motor.mikrokrok == 1) ||
        (motor.stav == 3 && motor.mikrokrok == 3) ||
        (motor.stav == 5 && motor.mikrokrok == 1) ||
        (motor.stav == 7 && motor.mikrokrok == 3))
    {
        maximum_a = MAXIMUM_TRICTVRTINOVE;
        maximum_b = MAXIMUM_CTVRTINOVE;
    }
    else if ((motor.stav == 1 && motor.mikrokrok == 3) ||
             (motor.stav == 3 && motor.mikrokrok == 1) ||
             (motor.stav == 5 && motor.mikrokrok == 3) ||
             (motor.stav == 7 && motor.mikrokrok == 1))
    {
        maximum_a = MAXIMUM_CTVRTINOVE;
        maximum_b = MAXIMUM_TRICTVRTINOVE;
    }
}

if (a2_prumer > maximum_a)
{
    motor.faze_a_zapnuta = 0;
    vyp_a = 2;
}
else if (vyp_a > 0)
    vyp_a--;
else
    motor.faze_a_zapnuta = 1;

if (b2_prumer > maximum_b)
{
    motor.faze_b_zapnuta = 0;
    vyp_b = 2;
}
else if (vyp_b > 0)
    vyp_b--;
else
    motor.faze_b_zapnuta = 1;

i++;
if (i == 3)
    i = 0;

ADC_clearIntFlag(myAdc, ADC_IntNumber_1);
PIE_clearInt(myPie, PIE_GroupNumber_10);
}

```