

**České vysoké učení technické v Praze**

**Fakulta elektrotechnická**

**Přípravek s krokovými motory**

**Stepper motor kit**

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

Vedoucí práce: Ing. Karel Künzel, CSc.

**Michal Kolář**

**Praha, 2020**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kolář** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **425054**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a management**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Přípravek s krokovými motory**

Název bakalářské práce anglicky:

**Stepper motor kit**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se řídicí jednotkou krokových motor
2. Navrhněte školní přípravek se dvěma krokovými motory
3. Zpracujte analýzu trhu a proveďte technické ekonomické zhodnocení nabízených jednotek
4. Realizujte přípravek s vybranou řídicí jednotkou
5. Připravte vzorovou úlohu a ověřte funkci
6. Zpracujte dokumentaci technického a zejména programového vybavení

Seznam doporučené literatury:

Lepka, J., Grasblum, P.: Použití mikroprocesorů pro řízení pohonů s BLDC motory, Učební texty ke kurzu, Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií, Rožnov p. R., 2011, dostupné na [http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura\\_09\\_1111.pdf](http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_09_1111.pdf)  
STM32Cube, Firemní literatura STMicroelectronics  
STM X-Nucleo, Firemní literatura STMicroelectronics, <http://www.st.com/en/ecosystems/x-nucleo-ihm08m1.html>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Karel Künzel, CSc., katedra elektrotechnologie FEL**

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

**Ing. Miroslav Vítek, CSc., 13116**

Datum zadání bakalářské práce: **04.09.2019** Termín odevzdání bakalářské práce: **07.01.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.02.2021**

Ing. Karel Künzel, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
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.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

## Prohlášení

„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.“

Praha, 7.1.2020

Podpis autora práce

Děkuji mé rodině za podporu při studiu. Zároveň děkuji panu Karlu Künzelovi, CSc. za věcné připomínky, vlídnost, ochotu a cenné rady při konzultacích k vypracování bakalářské práce.

## Abstrakt

Krokové motory mají v dnešní době velké využití. Tato bakalářská práce zkoumá řídicí jednotky malých krokových bipolárních motorů jak z technického tak ekonomického pohledu. Prvním cílem práce je zjistit, zda je pro výrobní firmu výhodná vlastní produkce modulů řídicích jednotek. Druhým cílem je pomocí technické a ekonomické analýzy určit nejvhodnější volbu řídicí jednotky. Třetím cílem je zkoumání výnosnosti investice do výroby a následného prodeje řídicích jednotek. Čtvrtým cílem je výroba desky plošného spoje s řídicí jednotkou a pátým cílem oživení a ověření funkce poskytnutých řídicích jednotek. Bylo zjištěno, že pro výrobní firmu je pravděpodobně výhodné přistoupit k vlastní produkci řídicích jednotek s drv8825, drv8847 nebo L6470. Výroba řídicích jednotek za účelem prodeje se firmě dle analýzy nevyplatí. Deska plošného spoje byla sestrojena a zvolené řídicí jednotky oživeny.

Klíčová slova: Přípravek s krokovými motory, bipolární krokový motor, čistá současná hodnota

## Abstract

Bipolar stepper motors have big industrial usage in these days. Thesis examines small bipolar stepper motor control units from technological and economic view. The first task is to recognize if own production of controller units is more profitable than its purchase. The second task is to research the best choice of controller unit with regards to economic and technological perspective. The third task is to recognize if investment into control unit production and following sale is reasonable from economic point of view. The fourth task is to produce printed circuit board with control unit and fifth task is to verify function of provided control units. It was found that company should probably produce its own control units containing drv8825, drv8847 or L6470. Production of control units for sale does not look profitable because of the analysis. Printed circuit board with control unit was produced and function of provided control units were verified.

Keywords: Stepper motor kit, bipolar stepper motor, net present value

# Obsah

<b>Seznam grafů</b>	<b>8</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>8</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>9</b>
<b>Zkratky</b>	<b>10</b>
<b>Úvod</b>	<b>11</b>
<b>Analýza trhu</b>	<b>12</b>
Přehled řídicích jednotek	12
L298N	12
L6470	16
DRV8825	18
DRV8847	19
A4988	20
Shrnutí	21
Přehled cen řídicích jednotek	22
<b>Ekonomická analýza</b>	<b>23</b>
Cíl analýzy	23
Návrh řešení	24
Scénář 1	24
Scénář 2	24
Výpočty a výsledky	27
Scénář 1	27
Scénář 2	29
<b>Oživení řídicí jednotky</b>	<b>32</b>
Cíl oživení	32
Návrh řešení	32
Výsledky	33
<b>Závěr</b>	<b>37</b>
<b>Přílohy</b>	<b>38</b>
<b>Seznam použité literatury a zdrojů</b>	<b>46</b>

## Seznam grafů

Graf 1: Porovnání nákladů na desku bez MCU oproti cenám vybrané konkurence [Kč]	28
Graf 2: Porovnání nákladů na desku s MCU oproti cenám vybrané konkurence [Kč]	29

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Náhradní schéma pro tepelný přenos L298	13
Obrázek 2: Podrobné náhradní schéma pro tepelný přenos L298	14
Obrázek 3: Typické zapojení čipu L298	15
Obrázek 4: Vnitřní schéma zapojení L298	15
Obrázek 5: Náhradní schéma pro tepelný přenos L298	17
Obrázek 6: Typické zapojení L6470	17
Obrázek 7: Vnitřní schéma zapojení L6470	18
Obrázek 8: Náhradní schéma pro tepelný přenos drv8825	19
Obrázek 9: Náhradní schéma pro tepelný přenos drv8847	20
Obrázek 10: Náhradní schéma pro tepelný přenos A4988	21
Obrázek 11: Schéma desky plošného spoje	34
Obrázek 12: Rozvržení desky plošného spoje	35
Obrázek 13: Fotografie osazeného plošného spoje	36
Obrázek 14: Dokumentace třídy PowerStep01Demo	44
Obrázek 15: Dokumentace třídy L6470Demo	46



# Seznam tabulek

Tabulka 1: Shrnující tabulka vlastností jednotlivých řadičů krokových motorků	21
Tabulka 2: Shrnující tabulka ochran jednotlivých řadičů krokových motorků	22
Tabulka 3: Nejnižší ceny čipů z vybraných obchodů [Kč] (bez DPH)	23
Tabulka 4: Odhad dalších výdajů firmy [Kč]	27
Tabulka 5: Cena za kus a citlivostní analýza čisté současné hodnoty (vše v Kč) v případě 500 ks	31
Tabulka 6: Cena za kus a citlivostní analýza čisté současné hodnoty (vše v Kč) v případě 1 000 ks	31
Tabulka 7: Cena za kus a citlivostní analýza čisté současné hodnoty (vše v Kč) v případě 5 000 ks	32
Tabulka 8: Podrobné ceny součástek MCU	38
Tabulka 9: Podrobné ceny součástek napěťového regulátoru	38
Tabulka 10: Podrobné ceny součástek řadiče L298 a desky	38
Tabulka 11: Podrobné ceny součástek řadiče L6470 a desky	11
Tabulka 12: Podrobné ceny součástek řadiče drv8825 a desky	12
Tabulka 13: Podrobné ceny součástek řadiče drv8847 a desky	40
Tabulka 14: Podrobné ceny součástek řadiče A4988 a desky	40
Tabulka 15: Soupis vybavení pro vzorové úlohy	40

## Zkratky

<b>C</b>	<b>Kondenzátor</b>
<b>IC</b>	<b>Integrovaný obvod</b>
<b>IDE</b>	<b>Integrované vývojové prostředí</b>
<b>GPIO</b>	<b>Vstupně/výstupní kolíčky</b>
<b>L</b>	<b>Cívka</b>
<b>MCU</b>	<b>Mikrokontrolér</b>
<b>R</b>	<b>Odpor</b>
<b>PWM</b>	<b>Pulzně šířková modulace</b>
<b>SS</b>	<b>Stejnoseměrný</b>

# Úvod

Řídící jednotky krokových motorů dnes mají velké využití. Jsou například součástí robotů, tiskáren, kamer, bankomatů apod. Pro výrobní firmu, která takové řídicí jednotky používá jako meziprodukt, je důležité vědět, zda je výhodnější si řídicí jednotky vyrobit nebo je nakoupit u jiné firmy. Prvním cílem práce je odpovědět na to, zda se reálné výrobní firmě vyplatí vlastní výroba řídicích jednotek malých bipolárních krokových motorů nebo má raději tyto jednotky nakoupit od dalších firem. Pokud firma přistoupí k vlastní výrobě řídicích jednotek, potřebuje vědět, kterou řídicí jednotku si má vybrat. Jak z hlediska technologických vlastností tak i výrobních nákladů. Druhým cílem je zjistit která varianta řídicí jednotky je z hlediska technického a zároveň i ekonomického nejlepší.

Firma by mohla chtít rozšířit své portfolio a investovat do výroby a prodeje řídicích jednotek malých krokových motorů. Třetím cílem je proto zjistit, zda se firmě vyplatí řídicí jednotky vyrábět a dále je prodávat.

Výrobní firma potřebuje znát výhody a nevýhody výroby řídicích jednotek. Čtvrtým cílem je osazení vlastního plošného spoje s mikrokontrolérem a řadičem malých krokových bipolárních motorů. Kromě výrobního procesu potřebuje výrobní firma znát i náročnost vývoje funkční řídicí jednotky. Volba nevhodné řídicí jednotky může firmě způsobit značné finanční ztráty. Pátým cílem je oživení a připravení vzorové úlohy pro práci s dvěma různými řídicími jednotkami.

# Analýza trhu

## Přehled řídicích jednotek

Cílem kapitoly je seznámení s řídicími jednotkami malých bipolárních krokových motorů. Pro analýzu byly vybrány jednotky, které se vyskytují téměř u každého většího obchodníka s elektronikou (L298, drv8847 a A4988), relativně nový produkt na trhu drv8825 a technicky pokročilejší L6470.

### L298N

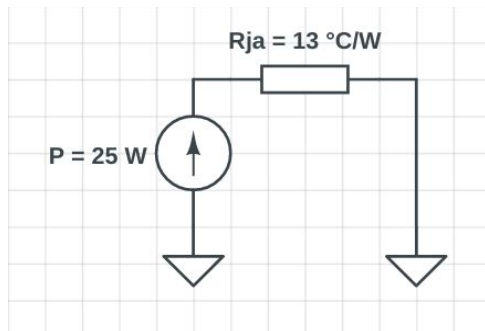
Výrobce čipu L298 je STMicroelectronics. Jedná se o řadič s jednoduchou konstrukcí. Používá se při práci s bipolárním krokovým motorem, dvěma stejnosměrnými motory, relé nebo solenoidem. Operační napětí je v rozmezí od 4,8 do 46 V. Napětí logických členů je 4 až 7 V. Skládá se ze dvou plně zapojených BJT H-můstků. Každý kanál můstku může obsluhovat proud až do výše 2 A pro stejnosměrný proud. Řadič má vestavěnou ochranu proti přehřátí. Operační teplota přechodu čipu je -25 až 130 °C.

Zvláštní funkci v obvodu tvoří dva "enable" vstupy, které bez ohledu na logickou úroveň vodičů mířících do zátěže určují, zda jsou operace se zátěží povolené/možné. Toho si lze všimnout v blokovém diagramu L298 (obrázek 4). "Enable" vstupy (EnA a EnB) jsou spolu se vstupy řídicích vodičů motoru (In1, In2, In3, In4) zapojeny jako vstupy do logických členů AND. Každý "Enable" vstup povoluje vždy dva řídicí vstupy vodičů motoru (tzn. každý H-můstek má vlastní "Enable" vstup).

Maximální provozní ztrátový výkon čipu pro přípustnou teplotu pouzdra 75 °C je 25 W. Celkový maximální napěťový úbytek při maximálním proudu obou kanálů, 2 A na kanál, je 4,9 V (při 1 A je to 3,2 V). IC umožňuje za pomoci dvou rezistorů detekovat

proud procházející obvodem na výstupu z čipu (obrázek 3). To umožňuje vytvořit vlastní programovou ochranu před nadměrným proudem. Uvnitř samostatně zakoupeného řadiče (obrázek 3) se bohužel nenacházejí ochranné, antiparalelně zapojené diody inдукtivní zátěže (motorů). Proto se musí přikoupit [1].

Výpočet chlazení L298:



Obrázek 1: Náhradní schéma pro tepelný přenos L298

$$\vartheta_j = P \cdot R_{ja} + \vartheta_a = 25 \cdot 13 + 25 = 350 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Rovnice 1: Výpočet maximální teploty přechodu čipu

kde  $\vartheta_j$  je maximální teplota přechodu čipu,

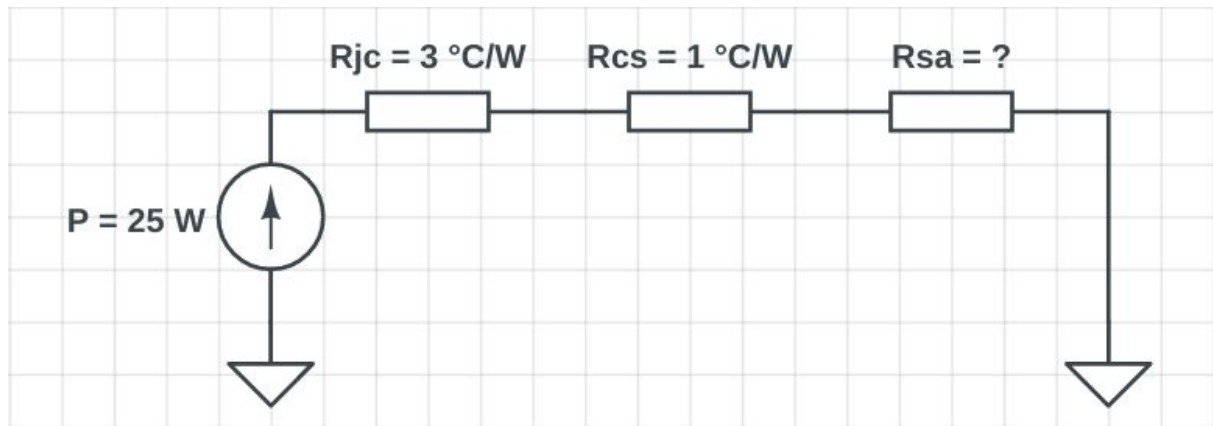
$\vartheta_a$  je teplota okolí,

$P$  je maximální ztrátový výkon,

$R_{ja}$  je tepelný odpor mezi přechodem čipu a vnějším okolím

Jelikož je maximální povolená pracovní teplota přechodu čipu  $130 \text{ } ^\circ\text{C}$  a vypočítaná teplota přechodu čipu je při maximálním výkonu  $350 \text{ } ^\circ\text{C}$ , je třeba s řadičem použít chladič.

Výpočet tepelného odporu chladiče:



Obrázek 2: Podrobné náhradní schéma pro tepelný přenos L298

$$\vartheta_j = P \cdot (R_{jc} + R_{cs} + R_{sa}) + \vartheta_a \Rightarrow R_{sa} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_a}{P} - R_{jc} + R_{cs} = \frac{130 - 25}{25} - 0 - 1 = 3,2 \frac{\text{°C}}{\text{W}}^1$$

Rovnice 2: Výpočet tepelného odporu mezi chladičem a řadičem

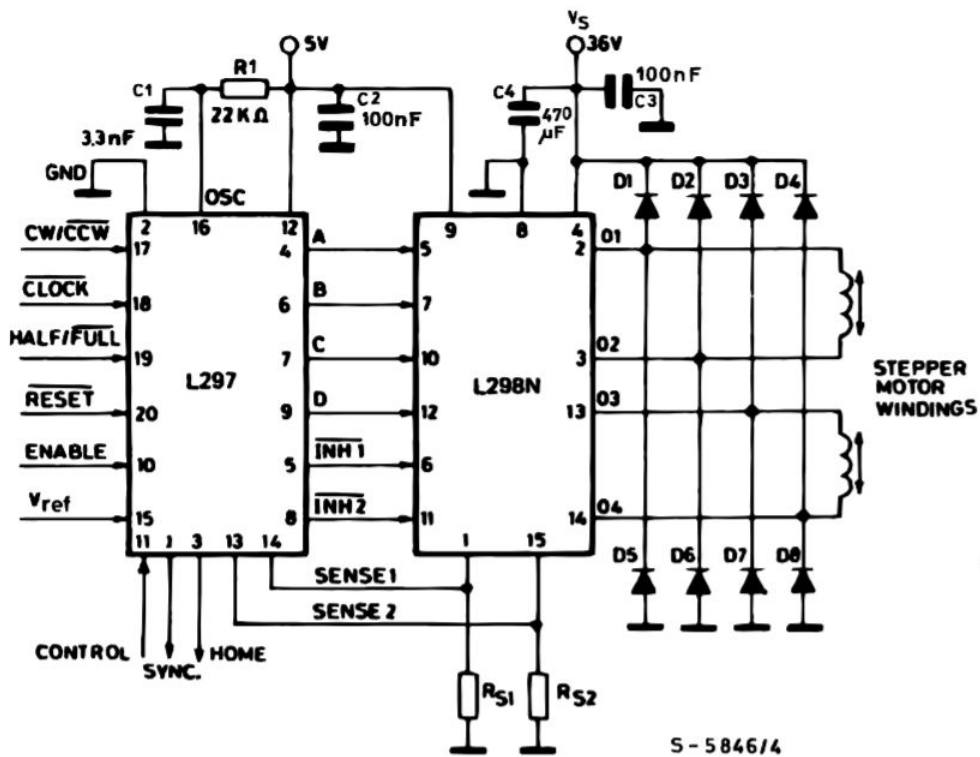
kde  $R_{jc}$  je tepelný odpor mezi přechodem čipu a jeho pouzdem,

$R_{cs}$  je tepelný odpor mezi pouzdem řadiče a chladičem,

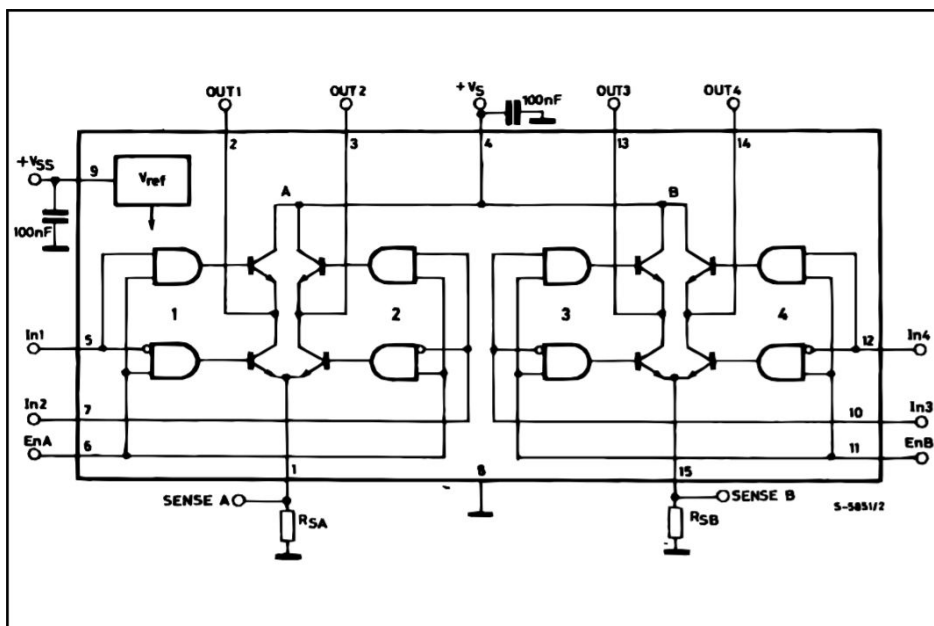
$R_{sa}$  je tepelný odpor mezi chladičem a vnějším okolím

K čipu L298 je nutné přikoupit chladič, který bude mít tepelný odpor menší nebo rovno  $3,2 \text{ °C/W}$ .

<sup>1</sup> V datasheetu je pro  $R_{jc}$  u pouzdra uvedena pomlčka "-". Jelikož je pro pouzdro Multiwatt15 uvedena hodnota 3, tak je předpokládáno, že  $R_{jc}$  je pro PowerSO20 hodnota blížíící se nule (ve výpočtu je proto zanedbána a nahrazena nulou)



Obrázek 3: Typické zapojení čipu L298 [1]



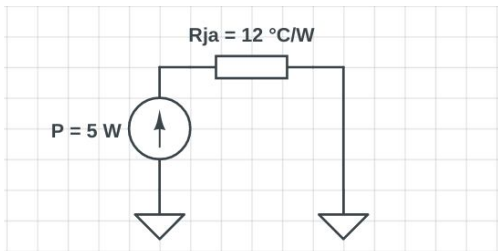
Obrázek 4: Vnitřní schéma zapojení L298 [1]

## L6470

L6470, od firmy STMicroelectronics, představuje vyšší řadu čipu pro řízení bipolárních krokových motorů. Na obrázku níže (obrázek 6) je vidět typické zapojení L6470 a na dalším obrázku pod ním (obrázek 7) je vnitřní schéma řadiče. Operační napětí je v rozmezí od 8 do 45 V. Napětí logických členů je buď 5 nebo 3,3 V. Čip může obsluhovat motor se zatížením až 3 A (špičkově až 7 A). Operační teplota přechodu čipu je -40 až 150 °C. Maximální provozní ztrátový výkon pro teplotu vnějšího okolí 25 °C je 5 W. Čip je programován přes programové registry, které nastavují jak ochrany (např. proti přehřátí) tak další atributy motoru (zrychlení, rychlost, frekvenci PWM atd.). Čip umožňuje mikrokrokování 1/128. Obsahuje ochranu proti přehřátí, přepětí sběrnice, nízkému napětí, zastavení motoru a proudovou ochranu. Součástí je vestavěné SPI (5-Mbit/s), které slouží ke komunikaci s řadičem a zapisuje do programových registrů. IC obsahuje také 16 MHz interní oscilátor a napěťový regulátor na 3,3 V [2]. Pro napájení řízení tranzistorů na H-můstku je využíváno nábojové pumpy (DC-DC měnič, obrázek 6).

L6470 obsahuje spoustu digitálních a analogových vstupů/výstupů, které rozšiřují snadnost ovládání motoru. Jde například o kolíček BUSY|SYNC, který funguje jako signalizátor zaneprázdněnosti řadiče nebo jako synchronizační signál krokování motoru. Standby kolíček může nastavit čip do standby módu, kdy je vypnuta většina zařízení (otevřené H- můstky, interní logika a SPI deaktivované). Flag kolíček je ve stavu nula, pokud nastane některá z definovaných situací (aktivace nějaké ochrany atd.). Krokový kolíček (step-clock) umožňuje krokovat motor v závislosti na náběžné hraně příchozího signálu do IC. Součástí jsou také analogově digitální převodník a kolíček, ke kterému lze připojit tlačítko způsobující okamžité zastavení motoru.



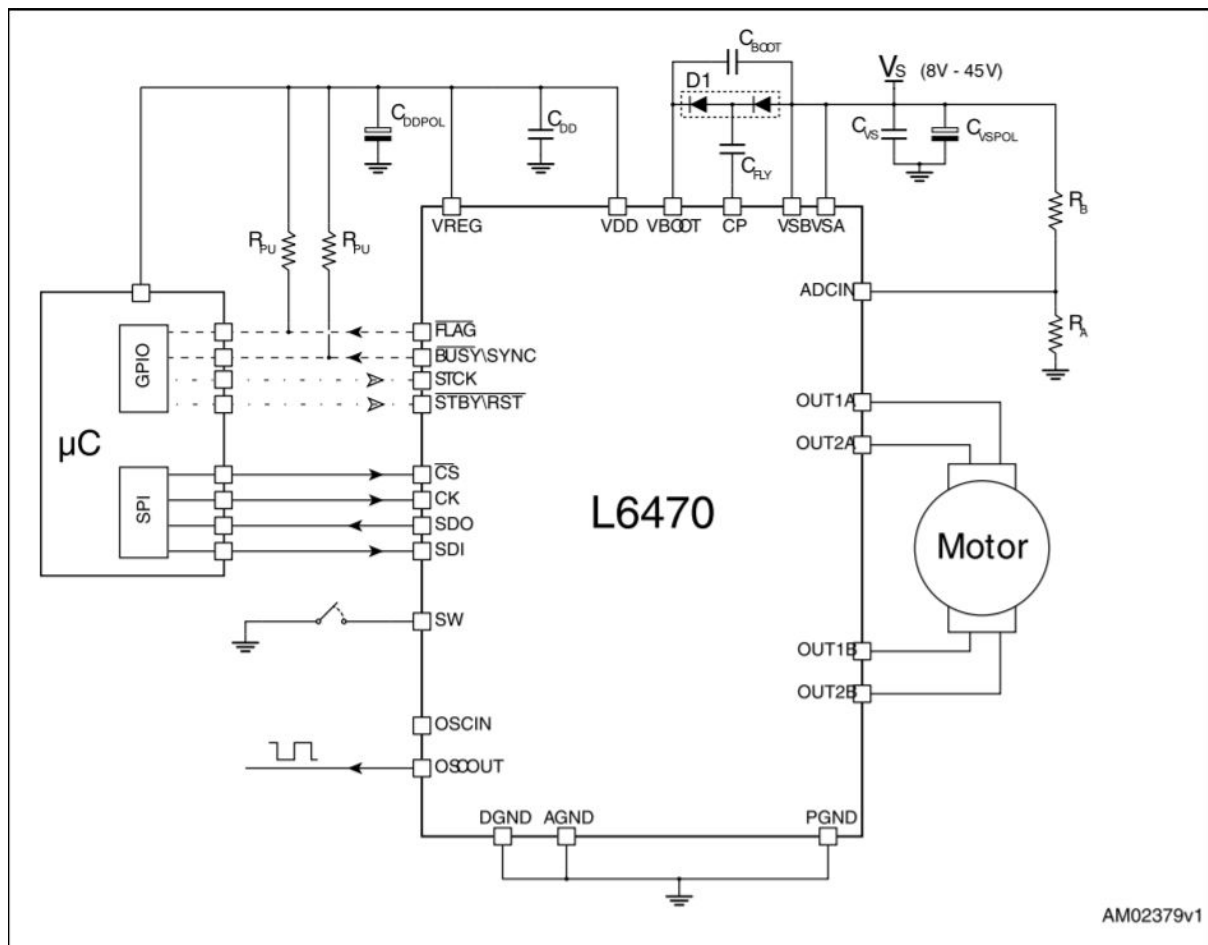


Obrázek 5: Náhradní schéma pro tepelný přenos L298

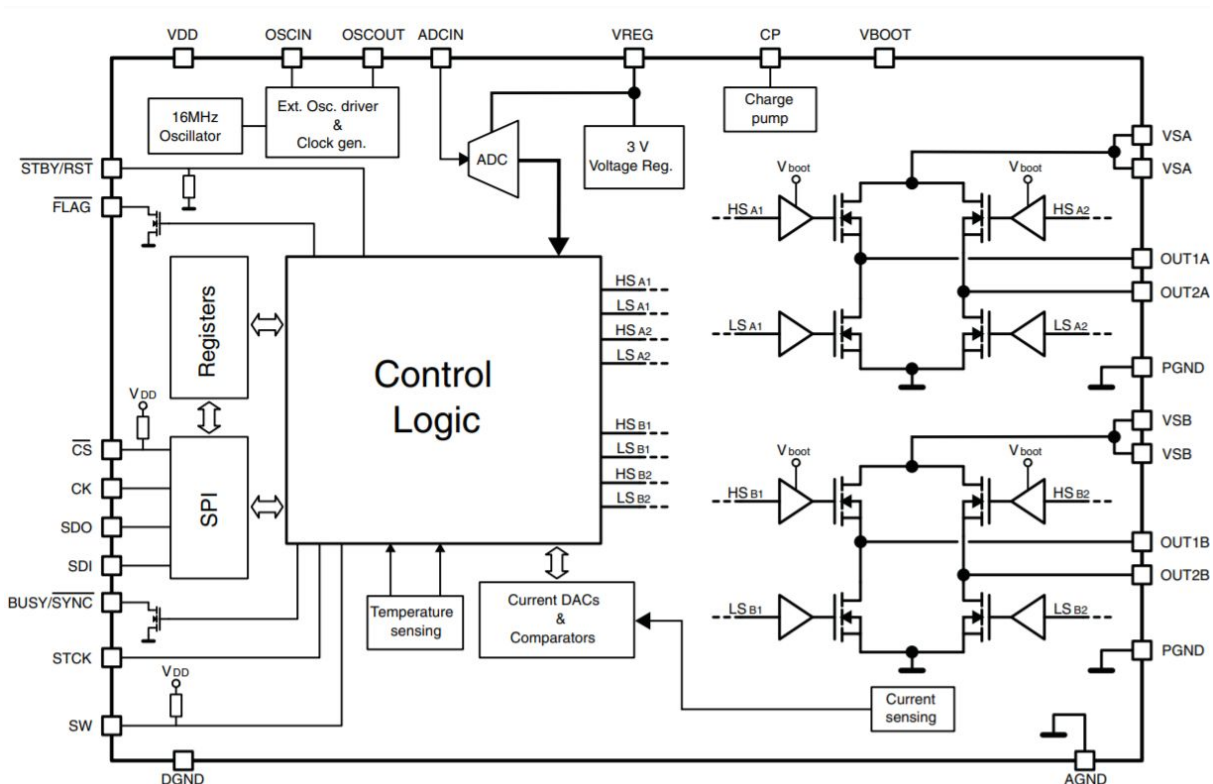
$$\vartheta_j = P \cdot R_{ja} + \vartheta_a = 5 \cdot 12 + 30 = 90 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Rovnice 3: Výpočet maximální teploty přechodu čipu

Jelikož  $90 < 150 \text{ } ^\circ\text{C}$ , tak pro čip není třeba použít chladič.



Obrázek 6: Typické zapojení L6470 [2]



Obrázek 7: Vnitřní schéma zapojení L6470 [2]

## DRV8825

DRV8825 vyrábí firma Texas Instruments. Operační napětí se nachází v rozmezí od 8,2 do 45 V. Má zabudovanou logiku pro mikrokrokování 1/32. Operační teplota přechodu čipu je -40 až 150 °C. Má tři různé módy útlumu při nadměrném proudu (rychlý, pomalý, kombinovaný). Maximální dovolený proud 2,5 A při 24 V a teplotě okolí 25 °C. Součástí jsou vestavěné ochrany přehřátí, podpětí a proudová ochrana [3].

$$P = 4 \cdot R \cdot (0,7 \cdot I)^2 = 4 \cdot 0,32 \cdot (0,7 \cdot 2,5)^2 = 3,92 \text{ W}$$

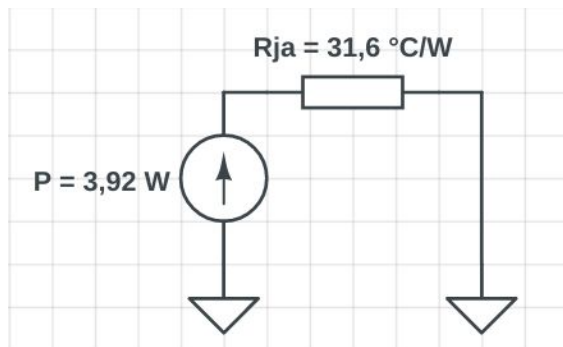
Rovnice 4: Výpočet maximálního provozního ztrátového výkonu (z datasheetu)

kde  $I$  je maximální proud kanálem,

R je maximální odpor tranzistoru při teplotě 85 °C,

P je maximální provozní ztrátový výkon

Výpočet zda je třeba chladič:



Obrázek 8: Náhradní schéma pro tepelný přenos drv8825

$$\vartheta_j = P \cdot R_{ja} + \vartheta_a = 3,92 \cdot 31,6 + 25 = 148 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Rovnice 5: Výpočet maximální teploty přechodu čipu

Jelikož  $116 < 150 \text{ } ^\circ\text{C}$ , tak pro řadič není třeba použít chladič.

## DRV8847

DRV8847 je jednoduchým čipem od Texas Instruments, který je určený pro řízení dvou stejnosměrných motorů nebo jednoho bipolárního krokového motoru. Operační napětí se nachází v rozmezí od 2,7 do 18 V. Operační teplota přechodu čipu je -40 až 150 °C. Maximální dovolený proud je pouze 1 A. Součástí jsou vestavěné ochrany přehřátí, podpětí a proudová [4]. Maximální provozní ztrátový výkon se spočítá dle rovnice z datasheetu:

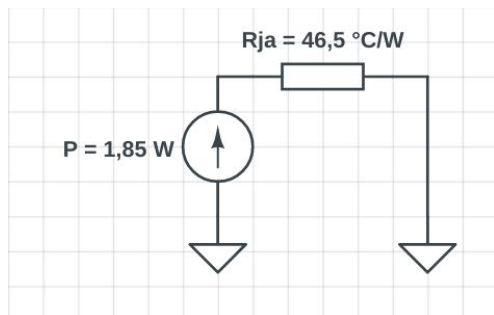
$$P = R_D \cdot I^2 + R_H \cdot I^2 = 0,9 \cdot 1^2 + 0,95 \cdot 1^2 = 1,85 \text{ W}$$

Rovnice 6: Výpočet maximálního provozního ztrátového výkonu

kde  $R_D$  je odpor dolních tranzistorů v H-můstku,

$R_H$  je odpor horních tranzistorů v H-můstku

Výpočet zda je potřeba chladič:



Obrázek 9: Náhradní schéma pro tepelný přenos drv8847

$$\vartheta_j = P \cdot R_{ja} + \vartheta_a = 1,85 \cdot 46,5 + 30 = 116 \text{ °C}$$

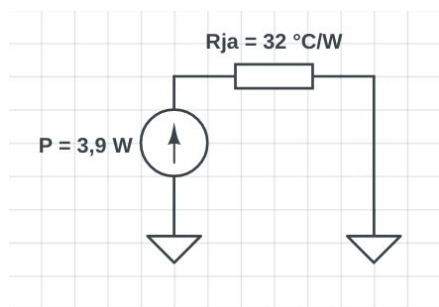
Rovnice 7: Výpočet maximální teploty přechodu čipu

Jelikož  $116 < 150 \text{ °C}$ , tak pro řadič není třeba použít chladič.

## A4988

A4988 vyrábí Allegro MicroSystems. Operační napětí je v rozmezí od 8 do 35 V. Lze u něj nastavit mikrokrokování až 1/16. Maximální teplota přechodu čipu je 150 °C. Maximální dovolený proud je 2 A. Součástí jsou vestavěné ochrany proti přehřátí, podpětí, nadproudu a zkratu. Má dva různé módy útlumu při nadměrném proudu (pomalý a kombinovaný). Napětí logických členů může být buď 5 nebo 3,3 V. Maximální provozní ztrátový výkon pro teplotu vnějšího okolí 25 °C je přibližně 3,9 W (odečteno z grafu z datasheetu) [5].

Výpočet zda je třeba chladič:



Obrázek 10: Náhradní schéma pro tepelný přenos A4988

$$\vartheta_j = P \cdot R_{ja} + \vartheta_a = 3,9 \cdot 32 + 25 = 149 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Rovnice 8: Výpočet maximální teploty přechodu čipu

Jelikož  $149 < 150 \text{ } ^\circ\text{C}$ , tak pro řadič není třeba použít chladič.

## Shrnutí

typ řadiče	operační napětí zdroje [V]	maximální dovolený proud [A]	operační teplota přechodu čipu [°C]	maximální provozní ztrátový výkon [W]	mikrokrokování
L298	4,8 až 46	2	-25 až 130	25 (75 °C pouzdro)	ne
L6470	8 až 45	3	-40 až 150	5 (25 °C vnějšího okolí)	1/128
drv8825	8,2 až 45	2,5 (25 °C okolí, 24 V)	-40 až 150	3,92 (85 °C přechod čipu)	1/32
derv8847	2,7 až 18	1 (25 °C okolí)	-40 až 150	1,85	ne
A4988	8 až 35	2	až 150	3,9 (25 °C okolí)	1/16

Tabulka 1: Shrnující tabulka vlastností jednotlivých řadičů krokových motorků

typ řadiče	ochrany řadiče
L298	přehřátí
L6470	přehřátí, přepětí sběrnice, nízkému napětí, zastavení motoru, proudová

drv8825	přehřátí, podpětí, proudová
drv8847	přehřátí, podpětí, proudová
A4988	přehřátí, podpětí, nadproudu a zkratu

Tabulka 2: Shrnující tabulka ochran jednotlivých řadičů krokových motorků

Všechny vybrané řadiče se hodí pro řízení malých bipolárních krokových motorů (tabulka 1 a tabulka 2). L6470 je na rozdíl od ostatních řadičů jednoduše programovatelný pro složitější aplikace krokových motorů (vlastní registry a knihovny). Může napájet větší motory (do 3 A), jeho součástí je ochrana proti zastavení a může mikrokrokovat až 1/128. Od drv8825 a A4988 se liší vysokými provozními ztrátami (5 W). L298, drv8825 a A4988 mají velmi podobné charakteristiky, kromě toho že L298 má velké maximální provozní ztráty až 25 W (především díky BJT tranzistorům v H-můstkách) a také tím, že obsahuje jen teplotní ochranu. Drv8847 má nižší maximální proud než ostatní řadiče (1 A). Minimální napájecí napětí motoru u něj může být velmi nízké (pouze 2,7 V). Na druhou stranu maximální napájecí napětí drv8847 je nižší než u ostatních řadičů (18 V). Má velmi nízké maximální provozní ztráty. Ochrany drv8847 jsou podobné s drv8825 a A4988.

## Přehled cen řídicích jednotek

Jako představitelé trhu řídicích jednotek malých bipolárních motorů byli vybráni různí prodejci elektroniky. Laskarduino.cz a arduino-shop.cz jako prodejci z ČR, tme.eu a pololu.com jako velcí prodejci elektrotechniky a amazon.com a aliexpress.com jako první a třetí nejnavštěvovanější online obchody na světě [6]. Ceny čipů (jednotek) lze najít v tabulce níže (tabulka 3).

typ čipu	arduino-shop (CZ)	laskarduino (CZ)	pololu (USA)	tme (Po)	amazon (USA)	aliexpress (CN)
L298	119	73		365	127	19

L6470	-	-	-	-	188	106
drv8825	97	48	203	148	58	28
drv8847	-	-	-	-	-	-
A4988	64	40	135	157	13	13

Tabulka 3: Nejnižší ceny čipů z vybraných obchodů [Kč] (bez DPH)

## Ekonomická analýza

### Cíl analýzy

Ekonomická analýza má dva primární cíle, které jsou dále řešeny za pomoci dvou scénářů.

Scénář 1: Zjistit, zda se výrobní firmě vyplatí si vyrábět vlastní řídicí jednotky pro malé bipolární motory. Pokud ano, vybrat nejvhodnější řídicí jednotku pro výrobu.

Scénář 2: Prostřednictvím citlivostní analýzy zjistit, zda se prodejní firmě vyplatí vyrábět si vlastní řídicí jednotky pro malé bipolární motory a dále je přeprodávat.

Jako vlastní produkt je brán plošný spoj (řídicí jednotka) obsahující řadič L298, L6470, drv8825, drv8825, drv8847 nebo A4988. Firmou vyrobené řídicí jednotky jsou pak porovnávány s produkty (substituty), které se v současné době nacházejí na trhu tabulka 3.

## Návrh řešení

Pro vyhodnocení scénáře 1 byla zvolena metoda porovnání nákladů na výrobu řídicí jednotky s reálnými cenami na trhu.

Pro vyhodnocení scénáře 2 byla zvolena metoda citlivostní analýzy porovnávající čisté současné hodnoty investic za různých okolností.

V obou scénářích se analyzuje výsledek na základě výroby 500, 1 000 a 5 000 kusů řídicí jednotky. S velikostí nákupu množství jednotlivých komponent se cena zpravidla výrazně snižuje.

### Scénář 1

Při výpočtu nákladů na pořízení samotných desek řadičů je třeba postupovat tímto způsobem. Nejdříve analyzovat "datasheety" jednotlivých řadičů a zjistit, jaké součástky s jakými hodnotami jsou potřeba. Poté vyhledat nejlevnější dostačující součástky na Digikey, Mouser a Farnell. Dále vypočítat ceny vytvoření a sestrojení plošného spoje řadiče pro 500, 1 000 a 5 000 kusů pomocí specializovaných webových stránek vendorů [7] [8]. K těmto nákladům přičíst další náklady firmy (mzdy a skladování). Nakonec stačí vzít průměrné náklady na jeden kus a porovnat je s cenami současných alternativ na trhu.

### Scénář 2

V první řadě je třeba se pokusit o jednoduchou analýzu toho, zda existuje dostatečná poptávka po modulech řídicích jednotek malých bipolárních krokových motorů. Pro zjištění poptávky (počtu prodaného zboží) za rok je vytvořena jednoduchá úvaha



postavená na analýze prodeje čipu L298 v roce 2019 na platformě aliexpress.com.

Aliexpress je e-shop založený na velmi levných produktech, což dle autora názoru, souvisí nejvíce s nízkými výrobními náklady (mzdy) a komponentami špatné kvality. Aliexpress je dle analytiky SimilarWeb třetí největší e-commerce internetovou platformou (dle návštěv) [6]. Aliexpress představuje obchod, který prodává zboží všemožného charakteru. Přesto lze některé elektronické kvalitnější produkty z e-shopu použít při hobby aktivitách nebo prototypování.

$$\text{roční prodej L298} = \frac{Q \cdot P}{A}$$

Rovnice 9: Výpočet odhadu celkového ročního prodeje kusů L298

kde Q je množství prodané elektroniky obsahující L298 na aliexpress.com v 2019,

P je populace států s velkým příjmem (definováno dle světové banky),

A je počet nakupujících na aliexpress.com v roce 2018

Je zřejmé, že odhad celkového ročního prodeje L298 se stává pouze přibližným výpočtem. Do odhadu nejsou vzaty v úvahu čipy L298 prodané profesionálními prodejci elektrotechniky jako Farnell, Digikey atd. Dále není do výpočtu zahrnut prodej ostatních řídicích jednotek, které jsou substituty L298 (A4988, drv8825, drv8847 atd.).

Oproti scénáři 1 je varianta scénáře 2 více nákladná, protože s ní jsou spojeny další výdaje jako např. výdaje na marketing a prodej. Představuje větší risk, protože je nejisté, jak vypadá skutečná křivka poptávky.

Analýza je konstruována následovně. Nejdříve je třeba odhadnout zda je poptávka po řídicích jednotkách v počtu 500, 1 000 nebo 5 000 kusů dostatečná. Pokud není dostatečná, další výpočty nemají smysl. Předpokládá se rozložení investice rovnoměrně do 3 let. Zaprvé je nutné vypočítat náklady na celkovou výrobu desek (výpočet ze scénáře 1), k těm jsou připočteny další náklady a čistá marže. Od této

částky se odečte odhadnuté procento nedobytných pohledávek a vyjdou výnosy za jeden rok. Od těchto celkových výnosů se odečtou celkové náklady za prodané a neprodané desky čímž se získá hotovostní tok za jeden kalendářní rok. Toky za 3 roky se diskontují (PRIBORem), sečtou a z toho vyjde čistá současná hodnota investice. Jelikož při scénáři 2 je třeba vzít v úvahu velký risk, ve výpočtech je využita citlivostní analýza. Proto se čistá současná hodnota vypočítává při 100%, 85% a 66% množství prodeje desek za rok a při marži 5 % a 15 %.

Rovnice pro výpočet zisku za jednotlivý rok:

$$CN = N + DN$$

$$V = k \cdot (CN + M)$$

$$HT = \frac{V - V \cdot P}{3}$$

Rovnice 10: Výpočet hotovostního toku z investice za 1 rok

kde k je koeficient množství prodaného zboží (100 %, 85 % nebo 66 %),

N jsou náklady bezprostředně spojené s vývojem a vytvořením desky radiče,

DN jsou ostatní náklady spojené s investicí,

M je čistá marže (5 % a 15 %),

P je koeficient nedobytných pohledávek z výnosů (určen jako 1 %),

CN jsou celkové náklady za investici,

HT je hotovostní tok za 1 rok

$$NPV = -CN + \sum_{t=1}^3 \frac{HT_t}{1+i}$$

Rovnice 11: Výpočet čisté současné hodnoty projektu

kde t je číslo roku,

i je sazba použitá k diskontování (PRIBOR = 2,27 %) [9],

NPV je čistá současná hodnota

## Výpočty a výsledky

Vypočtené náklady na vytvoření a nákup všech desek lze najít v příloze (tabulka 10, tabulka 11, tabulka 12, tabulka 13 a tabulka 14).

V tabulce pod textem (tabulka 4) lze najít odhad dalších nákladů použitý při výpočtu scénáře 1 a 2<sup>2</sup>.

mzdy	8 000
skladování	1 400
<b>celkem scénář 1</b>	<b>9 400</b>
marketing, náklady na prodej	3 000
doprava k velkoobchodníkům	2 000
<b>celkem scénář 2</b>	<b>14 400</b>

Tabulka 4: Odhad dalších výdajů firmy [Kč]

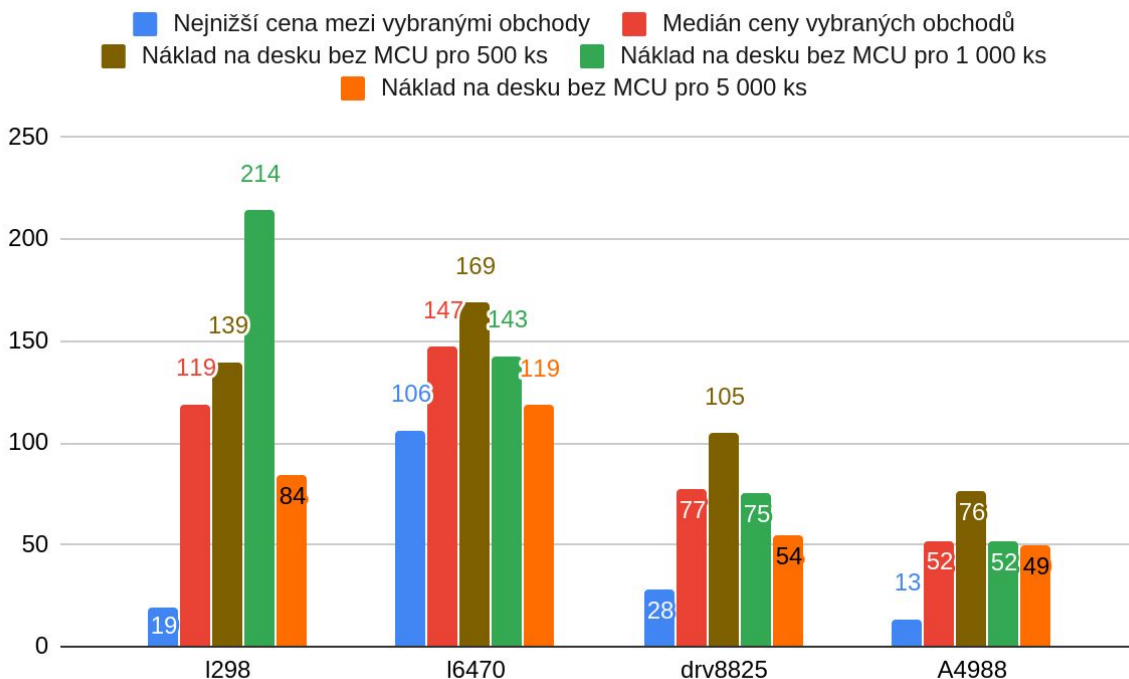
### Scénář 1

Z grafu (graf 1) je vidět, že pro 500, 1 000 a 5 000 kusů se dá vždy mezi obchody narazit na levnější variantu než je vlastní výroba. Cena za vlastní výrobu desky u 5 000 kusů je vždy nižší než mediánová cena u vybraných obchodů. To samé platí i u výroby 1 000 kusů (kromě L298). Velmi nízké ceny u obchodníků se dají najít na aliexpress.com a amazon.com (graf 1 a tabulka 3). Bohužel se pravděpodobně jedná o klony, které obsahují nekvalitní součástky. To samé může ovšem platit i u ostatních obchodníků. Pokud bude výrobní firma potřebovat moduly na řízení krokových motorků, dá se předpokládat že bude požadovat, aby byly spolehlivé. Díky zjištěním z grafu (graf 1) a sázkou na spolehlivost by se firma měla nejspíše

---

<sup>2</sup> Pro zjednodušení nebylo s dluhem dále pracováno

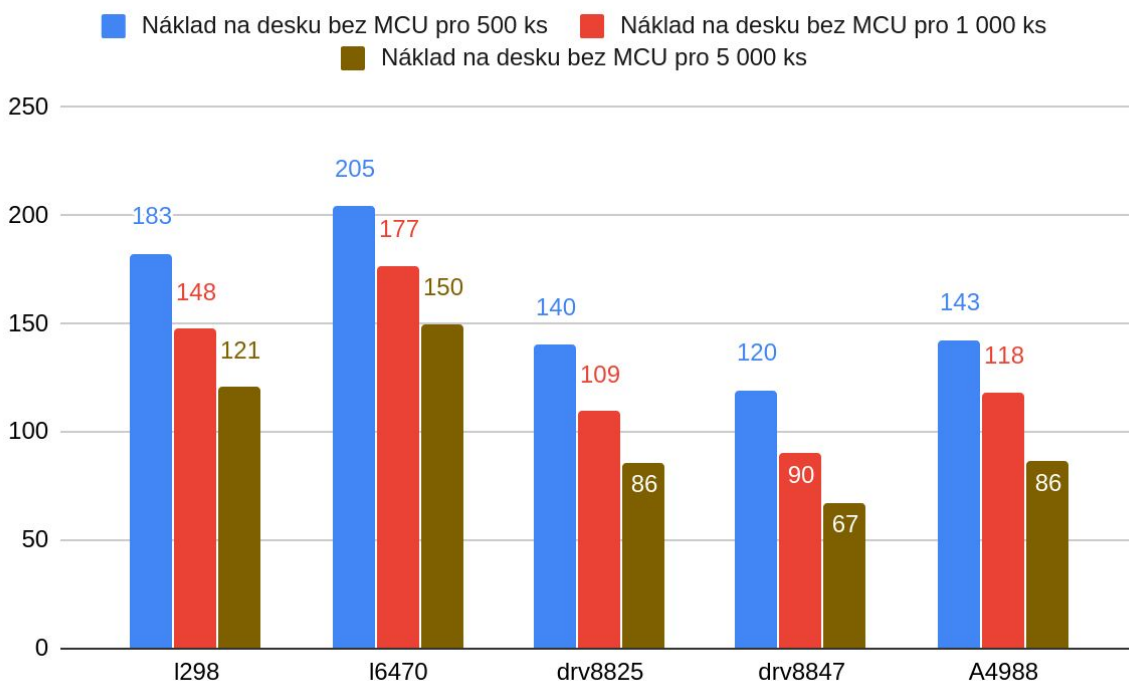
přiklonit k vlastní výrobě modulu pro množství 1 000 a 5 000 kusů. U 500 kusů by rozhodnutí záleželo na konkrétní aplikaci (spolehlivost, cena atd.).



Graf 1: Porovnání nákladů na desku bez MCU oproti cenám vybrané konkurence [Kč]

Protože je rozhodnuto, že by pravděpodobně bylo nejlepší, aby si firma řadič vyrobila sama, tak je třeba vybrat kterou z řídicích jednotek by bylo nejvhodnější zvolit. V tomto rozhodování hraje hlavní roli cena a technické požadavky na konkrétní aplikaci. Jelikož se často s čipem používá pouze jeden řadič, tak byly vypočteny celkové náklady na jednu desku obsahující jak řadič motoru, tak čip atmega328 (zahrnující napěťový regulátor, pokud byl třeba). V grafu (graf 2) je vidět srovnání těchto konečných celkových nákladů. Do výběru byl přidán také řadič drv8847, který chyběl v předchozí analýze, jelikož se jedná o nový produkt, který se běžně zatím jako samostatný modul neprodává<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Autor nikde na internetu modul s tímto řadičem nenalezl.



Graf 2: Porovnání nákladů na desku s MCU oproti cenám vybrané konkurence [Kč]

Pro jednoduché aplikace s motory, které odebírají proud do 1 A je z výběru jednoznačně nejlepší modul drv8847. Je nejlevnější, má nízké maximální ztráty a kromě mikrokrokování se svými charakteristikami velmi podobá A4988, drv8825 a L298. Z analýzy vyplývá, že se nevyplatí kupovat L298, které má velké ztráty, pouze jeden typ ochrany a “na to, co dokáže, je drahý”. Pro aplikace s krokovými bipolárními motory odebírajícími mezi 1 až cca 2 A se nejlépe hodí deska s drv8847. Nicméně jen o něco méně vhodnou variantou je A4988, která se mírně liší pouze v nastavení mikrokrokování, maximu napájecího napětí a maximu operačního proudu. Pro složitější aplikace a aplikace odebírající proud až do 3 A se z výběru hodí nejdražší L6470.

## Scénář 2

Na aliexpress.com se za rok 2019 prodalo 4 423 kusů modulů či samostatných čipů obsahujících L298. Za rok 2018 na aliexpress.com nakoupilo 150 milionu zákazníků

[10]. Populace ve státech s velkým příjmem byla 1,71 miliard lidí (2018) [11]. Jednoduše lze předpokládat, že vzorek z aliexpress.com kopíruje poměr celkové světové poptávky. Jako vzorek pro výpočet je použita populace ve státech s velkým příjmem, i když zahrnuje i chudé obyvatele, děti a staré občany, kteří by si pravděpodobně modul nekoupili. Dalším předpokladem je, že chudí lidé, děti a staří občané budou v počtu množství prodaných čipů vyváženi součtem ostatních lidí ze států s nižšími příjmy.

$$\text{celkový roční prodej L298} = \frac{4\,423 \cdot 1,71 \cdot 10^9}{150 \cdot 10^6} = 50\,422 \text{ kusů (vychází z rovnice 9)}$$

Rovnice 12: Odhad celkového ročního prodeje L298

Díky odhadu počtu prodaných kusů L298 ve světě (50 422 kusů) je vidět, že i pro výrobu a prodej 5 000 kusů by pravděpodobně mohla být na trhu dostatečná poptávka.

V tabulkách níže (tabulka 5, tabulka 6 a tabulka 7) lze vidět vypočítané hodnoty citlivostní analýzy pro různé scénáře. Dle výsledku nemá cenu uvažovat o prodeji s 5% čistou marží, jelikož všechny výsledky čistých současných hodnot vyšly záporné. U 15% marže je vidět u všech modulů kladný výsledek čisté současné hodnoty, když se prodá 100 % množství zboží. Pokud by se ale prodalo každý rok pouze 85 % nebo méně množství zboží, tak už by čistá současná hodnota byla negativní. Například pro drv8847 je při výrobě 5 000 kusů při plném 100% prodeji čistá současná hodnota 24 883 Kč, ale při 85% prodeji už je 20 886 Kč a při 66% prodeji je ztráta z investice vysoká 78 796 Kč (tabulka 7). Z grafu s cenami desek na trhu (graf 1) lze vidět, že ceny za kus jsou při přeprodeji desek vyšší než při scénáři 1 (výroba pro vlastní spotřebu firmy). Při výrobě 5 000 kusů u A4988 je to například 54 Kč oproti 49 Kč za modul pro vlastní užití a oproti 52 Kč mediánu ceny vybraných firem (tabulka 7 a graf 1).

Je třeba vzít v úvahu i to, že nebylo uvažováno DPH, daň z příjmu a marže dalších obchodníků. Proto je jasným závěrem 2. scénáře, že by se za takových předpokladů nejspíše nevyplatilo investovat do žádného scénáře s jakoukoli řídicí jednotkou.

typ řadiče	marže 5 %				marže 15 %			
	cena za kus	prodané zboží 100 %	prodané zboží 85 %	prodané zboží 66 %	cena za kus	prodané zboží 100 %	prodané zboží 85 %	prodané zboží 66 %
L298	158	-450	-11 697	-25 942	173	6 691	-5 627	-21 229
L6470	190	-539	-13 996	-31 041	208	8 006	-6 733	-25 402
drv8825	121	-345	-8 967	-19 889	133	5 129	-4 314	-16 276
drv8847	92	-260	-6 757	-14 987	100	3 865	-3 251	-12 265
A4988	116	-330	-8 572	-19 012	127	4 903	-4 124	-15 558

Tabulka 5: Cena za kus a citlivostní analýza čisté současné hodnoty (vše v Kč) v případě 500 ks

typ řadiče	marže 5 %				marže 15 %			
	cena za kus	prodané zboží 100 %	prodané zboží 85 %	prodané zboží 66 %	cena za kus	prodané zboží 100 %	prodané zboží 85 %	prodané zboží 66 %
L298	119	-675	-17 545	-38 913	130	10 036	-8 440	-31 843
L6470	157	-889	-23 116	-51 269	171	13 222	-11 121	-41 955
drv8825	85	-483	-12 558	-27 854	93	7 184	-6 042	-22 794
drv8847	60	-341	-8 868	-19 670	66	5 073	-4 266	-16 096
A4988	90	-513	-13 327	-29 558	99	7 623	-6 411	-24 188

Tabulka 6: Cena za kus a citlivostní analýza čisté současné hodnoty (vše v Kč) v případě 1 000 ks

typ řadiče	marže 5 %				marže 15 %			
	cena za kus	prodané zboží 100 %	prodané zboží 85 %	prodané zboží 66 %	cena za kus	prodané zboží 100 %	prodané zboží 85 %	prodané zboží 66 %
L298	90	-2 561	-66 571	-147 649	99	38 079	-32 026	-120 826
L6470	127	-3 603	-93 630	-207 666	139	53 558	-45 044	-169 940
drv8825	59	-1 670	-43 414	-96 288	64	24 833	-20 886	-78 796
drv8847	33	-945	-24 556	-54 464	36	14 046	-11 813	-44 569

A4988	54	-1 521	-39 542	-87 702	59	22 619	-19 023	-71 770
-------	----	--------	---------	---------	----	--------	---------	---------

Tabulka 7: Cena za kus a citlivostní analýza čisté současné hodnoty (vše v Kč) v případě 5 000 ks

## Oživení řídicí jednotky

### Cíl oživení

Původním cílem ze zadání je oživení, připravení vzorové úlohy a zpracování dokumentace pro zkušební desku X-NUCLEO-IHM03A1 s čipem PowerStep01 a jedním krokovým motorem a zkušební desku X-NUCLEO-IHM02A1 s dvěma čipy L6470 a dvěma krokovými motory. Seznam vybavení určený pro vykonání vzorových úloh se nalézá v příloze (tabulka 15). Autorovi se v předmětu Konstrukce elektrických obvodů naskytla příležitost vytvořit vlastní výukovou desku s řídicí jednotkou, což by dělal tvůrce této práce vůbec poprvé. Takovou příležitost autor využil a přidal jako bonus do práce.

### Návrh řešení

Navrhnout a osadit desku plošného spoje řadičem L298 a MCU atmega328. Na plošný spoj přidat 2 potenciometry pro ovládání motorů či jinou funkci, vyvést kolíčky z atmega328 na programování čipu a další volné kolíčky pro jiné použití.

Oživit, úlohu pro 2 jednotky. Úlohu sepsat jako třídu dostupnou přes hlavičkový soubor (v jazyce C++). Zpracovat programovou dokumentaci.

Úloha pro vývojovou desku X-NUCLEO-IHM03A1 s PowerStep01:



1. Pootočit krokovým motorem o  $90^\circ$ , poté motor navrátit do původní polohy.
2. Pootočit krokovým motorem o  $360^\circ$ , poté motor navrátit do původní polohy.
3. V cyklu zrychlovat v každé iteraci o 5 kroků za sekundu. Otáčet proti směru hodinových ručiček. Začínat rychlostí jeden krok za sekundu a pokračovat až do 61 kroků za sekundu.

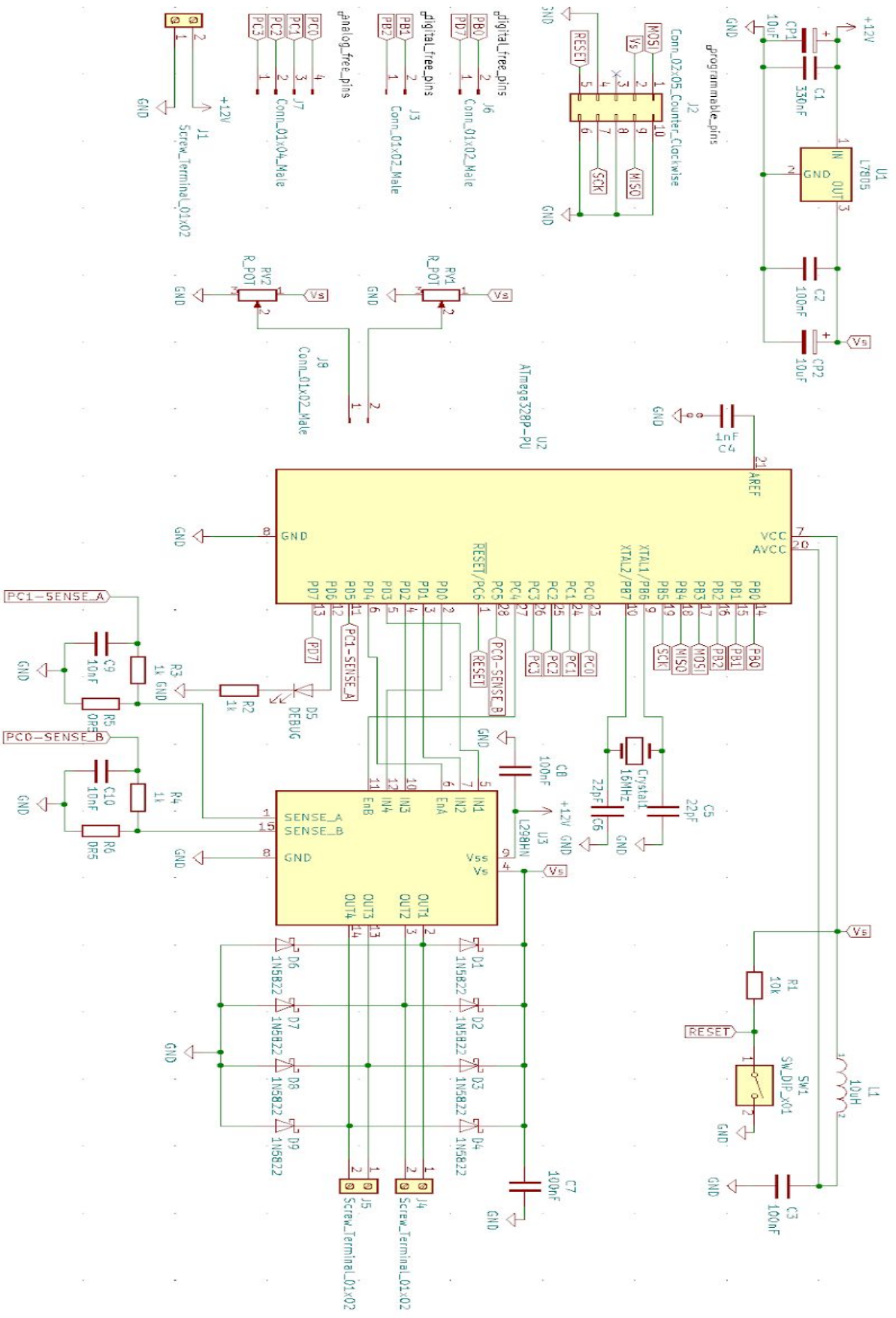
Úloha pro vývojovou desku X-NUCLEO-IHM02A1 s dvěma L6470:

1. Simultánně otáčet oběma motory proti směru hodinových ručiček. Poté zastavit.
2. Simultánně otočit oba motory o  $360^\circ$ . Jeden po směru hodinových ručiček. Druhý proti směru hodinových ručiček. Poté zastavit
3. Simultánně otáčet oběma motory po směru hodinových ručiček. Poté zastavit.

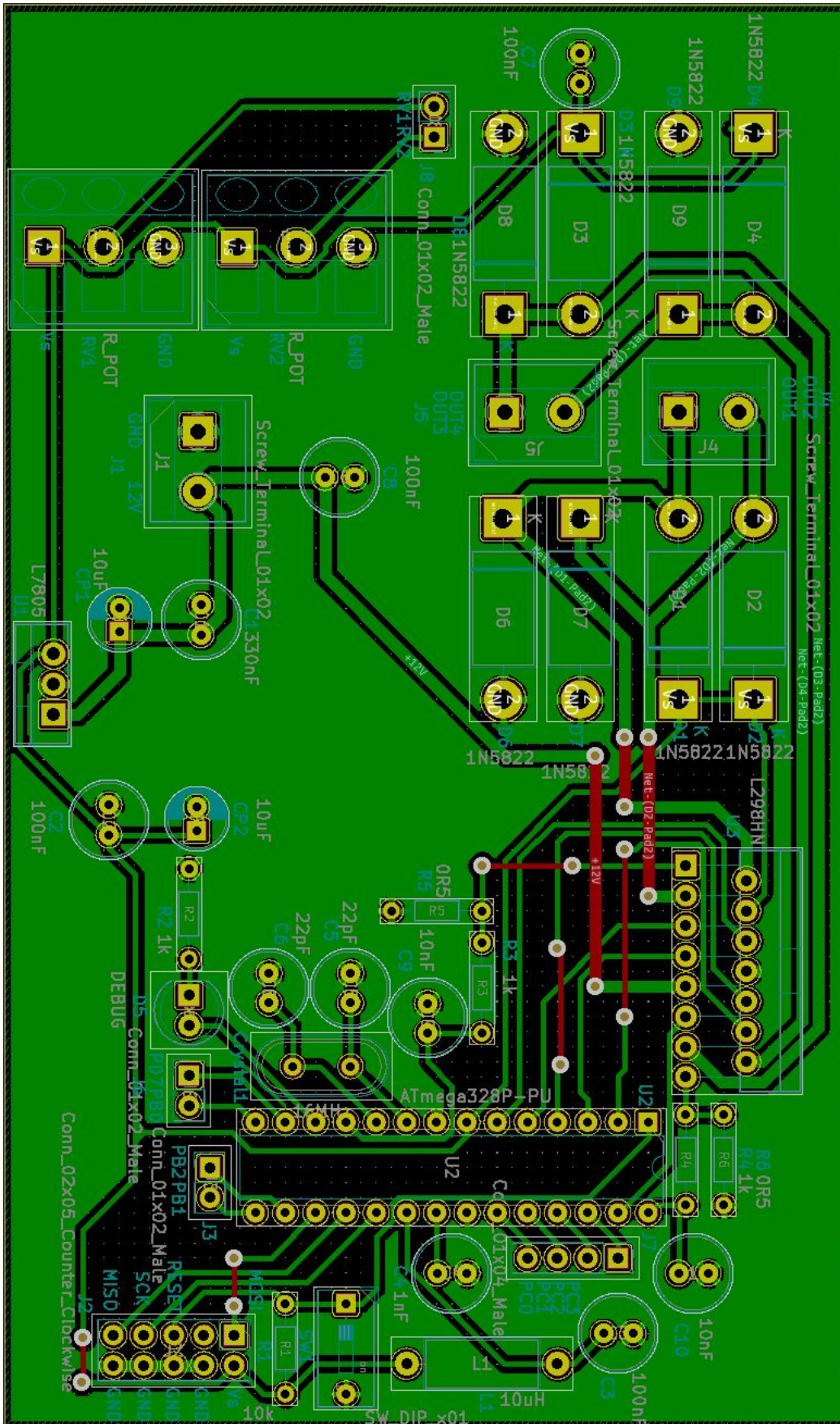
## Výsledky

Obrázek 11 představuje vytvořené schéma plošného spoje. Obrázek 12 ukazuje rozvržení součástek na desku plošného spoje. Obrázek 13 prezentuje osazený plošný spoj (chybí pouze chladiče).

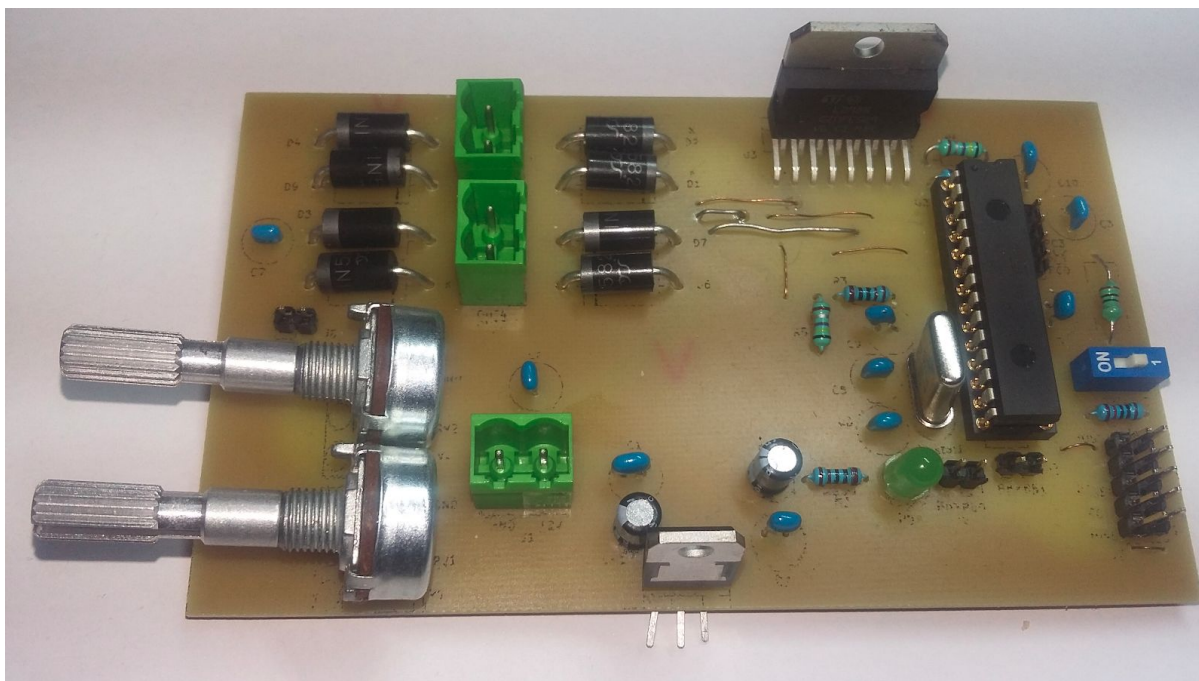
Kromě šesti digitálních kolíčků (použitých pro řízení L298) lze většina dalších kolíčků použít pro další aplikace. Atmega se dá programovat pomocí 10 shluklých kolíčků díky programátoru USBasp od Thomase Fischla (obrázek 13 vpravo dole) [12].



Obrázek 11: Schéma desky plošného spoje



Obrázek 12: Rozvržení desky plošného spoje



Obrázek 13: Fotografie osazeného plošného spoje

Úlohu pro X-NUCLEO-IHM03A1 s PowerStep01 se podařilo správně naprogramovat a zprovoznit. U X-NUCLEO-IHM02A1 s dvěma L6470 se úlohu podařilo naprogramovat, ale jeden z motorů se při chodu občas zastavuje a vydává hlasitý zvuk. Autor se domnívá, že kód je napsán bez chyby a problém je v jednom čipu L6470, protože stejný kód pro separátně spuštěné řadiče přinese v jednom případě požadované chování motoru a v druhém případě ne. Autor se do obhajoby práce pokusí sehnat další desku X-NUCLEO-IHM02A1 a kód ověřit.

Pro vytvoření úloh pro řídicí jednotky bylo použito online IDE Mbed OS, které je určené na programování čipů od firmy ARM. Jako dokumentační nástroj byl použit program doxygen. Dokumentace a kód jsou sepsány v angličtině. Úlohy jsou sepsány vždy v jedné třídě a dají se do jakéhokoli projektu přidat pouze zahrnutím hlavičkového souboru (např. `#include "PowerStep01Demo.h"`). Dokumentace tříd vzorových úloh lze nalézt v příloze (obrázek 14 a obrázek 15). Zbytek dokumentace byl přidán i se zdrojovým kódem na přiloženém DVD.

## Závěr

Z technické a ekonomické analýzy trhu vyšlo, že se výrobní firmě vyplatí vyrábět vlastní řídicí jednotky malých bipolárních krokových motorů. Dále se zjistilo, že pro aplikace s motory, které odebírají proud do 1 A je z výběru nejlepší modul s drv8825. Pro aplikace požadující mezi 1 až cca 2 A je nejvhodnější variantou deska s drv8847 a pro náročnější úlohy do 3 A řídicí jednotka s L6470. Modul s L298 se kvůli svým špatným vlastnostem a ceně nevyplatí pro žádnou aplikaci.

Pomocí výpočtu čisté současné hodnoty při uplatnění citlivostní analýzy bylo zjišťováno, zda se prodejní firmě vyplatí investice do vyrábění vlastní řídicí jednotky krokových motorů za účelem prodeje dalším firmám. Výsledkem analýzy je, že se firmě taková investice nevyplatí pro 500, 1 000 ani 5 000 vyrobených kusů.

Autor v rámci práce navrhnul a osadil plošný spoj určený k řízení malých bipolárních krokových motorů s použitím čipů atmega328 a L298. Také oživil řídicí jednotky PowerStep01 s jedním krokovým motorem a dvě L6470 s dvěma krokovými motory. Pro každou desku s řídicími jednotkami naprogramoval úlohu dle zadání. Vypracovaná úloha pro PowerStep01 funguje bez chyby. Hotová úloha spouštěná na desce se dvěma L6470 nefunguje dle zadání. Autor si myslí, že jeden čip L6470 má poruchu. Do obhajoby vyzkouší zpracovanou úlohu pro dva L6470 na jiné desce. Program úloh byl řádně zdokumentován.

Autor se díky této práci naučil pájet. Poprvé navrhnul a osadil plošný spoj, programoval třídy v C++ a automaticky generoval dokumentaci. Získal základní přehled v oblasti malých bipolárních krokových motorů a jejich funkcionality.

Zadání a cíle práce byly splněny.

## Přílohy

atmega328	cena za 1 kus [Kč]			počet	cena za všechny kusy [Kč]		
	500 ks	1 000 ks	5 000 ks		500 ks	1 000 ks	5 000 ks
atmega328	24,57	24,57	24,57	1	24,57	24,57	24,57
L - 10 uH	0,91	0,81	0,57	1	0,91	0,81	0,57
C keramický - 100 nF, 10 %, 16 V	0,29	0,23	0,16	1	0,29	0,23	0,16
C keramický - 1 nF, 50 V, 10 %	0,23	0,13	0,13	1	0,23	0,13	0,13
C keramický - 22 pF, 50 V, 1 %	0,26	0,21	0,18	2	0,52	0,42	0,36
R - 10 kOhm, 1/16 W, 1 %	0,31	0,13	0,08	2	0,62	0,26	0,16
R - 1 kOhm, 1/10 W, 5 %	0,29	0,10	0,08	1	0,29	0,10	0,08
quartz krystal - 16 Mhz	3,28	2,63	2,37	1	3,28	2,63	2,37
led dioda - 9V	0,60	0,52	0,42	1	0,60	0,52	0,42
<b>celkem</b>					<b>31,31</b>	<b>29,67</b>	<b>28,81</b>

Tabulka 8: Podrobné ceny součástek MCU

napětový regulátor	Cena za 1 kus [Kč]			počet	Cena za všechny kusy [Kč]		
	500 ks	1 000 ks	5 000 ks		500 ks	1 000 ks	5 000 ks
napětový regulátor - na 5 V, max 30V	2,81	2,55	2,34	1	2,81	2,55	2,34
C elektrolytický - 10 uF, 50 V, 20 %	1,85	1,56	1,40	2	3,70	3,12	2,80
C keramický - 330 nF, 25 V, 10 %	0,60	0,47	0,36	1	0,60	0,47	0,36
C keramický - 100 nF, 10 %, 16 V	0,29	0,23	0,16	1	0,29	0,23	0,16
chladič	0,34	0,34	0,34	1	0,34	0,34	0,34
<b>celkem</b>					<b>7,39</b>	<b>6,37</b>	<b>5,66</b>

Tabulka 9: Podrobné ceny součástek napětového regulátoru

L298	cena za 1 kus [Kč]			počet	cena za všechny kusy [Kč]		
	500 ks	1 000 ks	5 000 ks		500 ks	1 000 ks	5 000 ks
L298	71,50	60,06	55,90	1	71,50	60,06	55,90
C keramický - 100 nF, 25 V, 10%	0,09	0,09	0,09	2	0,18	0,18	0,18
C keramický - 470 uF, 50 V, 10 %	0,52	0,34	0,34	1	0,52	0,34	0,34
R - 0,47 Ohm, 100mW, 1%	0,02	0,02	0,02	2	0,03	0,03	0,03
schottky dioda - 2A, 40 V	0,96	0,96	0,96	8	7,68	7,68	7,68
chladič	6,43	6,43	6,43	1	6,43	6,43	6,43
kolíková lišta	0,08	0,08	0,08	3	0,23	0,23	0,23
celkem pouze součástky					86,58	74,96	70,80
samotná deska bez MCU					33,98	22,66	11,33
samotná deska s MCU					38,52	27,19	13,59
<b>celkem bez MCU</b>					<b>120,56</b>	<b>97,62</b>	<b>82,13</b>
<b>celkem s MCU (vyjma MCU součástek)</b>					<b>125,10</b>	<b>102,15</b>	<b>84,39</b>

Tabulka 10: Podrobné ceny součástek řadiče L298 a desky

L6470	cena za 1 kus [Kč]			počet	cena za všechny kusy [Kč]		
	500 ks	1 000 ks	5 000 ks		500 ks	1 000 ks	5 000 ks
L6470	105,22	102,18	98,28	1	105,22	102,18	98,28
R - 39 kOhm, 1/16 W, 1 %	0,31	0,13	0,08	2	0,62	0,26	0,16
R - 2,7 kOhm, 1/10 W, 5 %, 70 V	0,29	0,13	0,08	1	0,29	0,13	0,08
R - 62 kOhm, 1/10 W, 1 %, 75 V	0,18	0,13	0,10	1	0,18	0,13	0,10
C keramický - 220 nF, 50V, 10 %	0,83	0,70	0,68	1	0,83	0,70	0,68
C elektrolitický - 100 uF, 20 %, 50 V	3,46	2,94	2,37	1	3,46	2,94	2,37
C elektrolitický - 10 uF, 50 V, 20 %	1,85	1,56	1,40	1	1,85	1,56	1,40
C keramický - 100 nF, 10 %, 16 V	0,29	0,23	0,16	1	0,29	0,23	0,16
C keramický - 220 nF, 10 %, 50 V	0,81	0,62	0,62	1	0,81	0,62	0,62
C keramický - 10 nF, 10 %, 50 V	0,34	0,34	0,34	1	0,34	0,34	0,34
charge pump dioda - 100 V, 0,215 A	0,91	0,60	0,47	2	1,82	1,20	0,94
kolíková lišta	0,08	0,08	0,08	3	0,23	0,23	0,23
celkem pouze součástky					115,94	110,53	105,35
samotná deska bez MCU					33,98	22,66	11,33
samotná deska s MCU					38,54	27,21	13,60
<b>celkem bez MCU</b>					<b>149,92</b>	<b>133,19</b>	<b>116,68</b>
<b>celkem s MCU (vyjma MCU součástek)</b>					<b>154,48</b>	<b>137,74</b>	<b>118,95</b>

Tabulka 11: Podrobné ceny součástek řadiče L6470 a desky

drv8825	cena za 1 kus [Kč]			počet	cena za všechny kusy [Kč]		
	500 ks	1 000 ks	5 000 ks		500 ks	1 000 ks	5 000 ks
drv8825	42,85	36,96	36,28	1	42,85	36,96	36,28
R - 1 MOhm, 1/8 W, 1 %	0,57	0,23	0,23	1	0,57	0,23	0,23
C elektrolitický - 100 uF, 20 %, 50 V	3,46	2,94	2,37	1	3,46	2,94	2,37
R - 0,47 Ohm, 100mW, 1%	0,02	0,02	0,02	2	0,03	0,03	0,03
R - 10 kOhm, 1/16 W, 1 %	0,31	0,13	0,08	2	0,62	0,26	0,16
R - 30 kOhm, 1/16 W, 1 %	0,31	0,13	0,08	1	0,31	0,13	0,08
R - 50 kOhm, 1/16 W, 1 %	0,44	0,18	0,13	1	0,44	0,18	0,13
C elektrolitický - 10 uF, 50 V, 20 %	1,85	1,56	1,40	1	1,85	1,56	1,40
C keramický - 100 nF, 10 %, 16 V	0,29	0,23	0,16	3	0,86	0,20	0,03
C keramický - 0,47 uF, 10 V, 10 %	0,49	0,39	0,29	1	0,49	0,39	0,29
kolíková lišta	0,08	0,08	0,08	3	0,23	0,23	0,23
celkem pouze součástky					51,73	43,12	41,23
samotná deska bez MCU					33,98	22,66	11,33
samotná deska s MCU					38,54	27,21	13,60
<b>celkem bez MCU</b>					<b>85,71</b>	<b>65,78</b>	<b>52,56</b>
<b>celkem s MCU (vyjma MCU součástek)</b>					<b>90,27</b>	<b>70,33</b>	<b>54,83</b>

Tabulka 12: Podrobné ceny součástek řadiče drv8825 a desky

drv8847	cena za 1 kus [Kč]			počet	cena za všechny kusy [Kč]		
	500 ks	1 000 ks	5 000 ks		500 ks	1 000 ks	5 000 ks
drv8847	24,03	18,14	18,14	1	24,03	18,14	18,14
R - 0,47 Ohm, 100mW, 1%	0,02	0,02	0,02	2	0,03	0,03	0,03
R - 10 kOhm, 1/16 W, 1 %	0,31	0,13	0,08	1	0,31	0,13	0,08
C keramický - 0,1 uF, 25 V, 10%	0,09	0,09	0,09	1	0,09	0,09	0,09
C keramický - 10 uF, 25 V, 10 %	1,04	0,94	0,83	1	1,04	0,94	0,83
kolíková lišta	0,08	0,08	0,08	3	0,23	0,23	0,23
celkem pouze součástky					25,74	19,56	19,41
samotná deska bez MCU					31,75	22,66	9,07
samotná deska s MCU					36,29	24,95	11,33
<b>celkem bez MCU</b>					<b>57,49</b>	<b>42,22</b>	<b>28,48</b>
<b>celkem s MCU (vyjma MCU součástek)</b>					<b>62,03</b>	<b>44,51</b>	<b>30,74</b>

Tabulka 13: Podrobné ceny součástek řadiče drv8847 a desky

A4988	cena za 1 kus [Kč]			počet	cena za všechny kusy [Kč]		
	500 ks	1 000 ks	5 000 ks		500 ks	1 000 ks	5 000 ks
A4988	44,25	44,25	35,44	1	44,25	44,25	35,44
R - 0,47 Ohm, 100mW, 1%	0,02	0,02	0,02	2	0,03	0,03	0,03
R - 30 kOhm, 1/16 W, 1 %	0,31	0,13	0,08	1	0,31	0,13	0,08
R - 5 kOhm, 1/16 W, 1 %	0,10	0,08	0,08	1	0,10	0,08	0,08
C keramický - 0,1 uF, 100 V, 10 %	0,26	0,18	0,16	2	0,52	0,36	0,31
C elektrolitický - 100 uF, 50 V, 20 %	3,46	2,94	2,37	1	3,46	2,94	2,37
kolíková lišta	0,08	0,08	0,08	3	0,23	0,23	0,23
celkem pouze součástky					48,91	48,03	38,54
samotná deska bez MCU					31,75	22,66	9,07
samotná deska s MCU					36,29	24,95	11,33
<b>celkem bez MCU</b>					<b>80,66</b>	<b>70,69</b>	<b>47,61</b>
<b>celkem s MCU (vyjma MCU součástek)</b>					<b>85,20</b>	<b>72,98</b>	<b>49,87</b>

Tabulka 14: Podrobné ceny součástek řadiče A4988 a desky

Vybavení pro 2. úlohu	Vybavení pro 1. úlohu
Deska X-NUCLEO-IHM02A1 s dvěma řadiči L6470 [13]	Deska X-NUCLEO-IHM03A1 s řadičem PowerStep01 [14]
Vývojová deska NUCLEO-F030R8 [15]	Vývojová deska NUCLEO-F030R8
Dva bipolární krokové motory MICROCON SX16-042N [16]	Bipolární krokový motor PM42S-048 [17]

Tabulka 15: Soupis vybavení pro vzorové úlohy



## PowerStep01Demo Class Reference

---

class is based primarily on a PowerStep01 class [More...](#)

```
#include <PowerStep01Demo.h>
```

### Public Member Functions

---

**PowerStep01Demo** (int motor\_full\_steps\_per\_revolution)

initializes PowerStep01 and DevSPI classes and runs speed up and rotation demonstrations [More...](#)

---

### Private Member Functions

---

void **rotations** ()

demonstrates motor rotations [More...](#)

---

void **speed\_up** ()

demonstrates motor speed up [More...](#)

---

void **rotate\_quarter** ()

rotates motor by 90 ° [More...](#)

---

void **rotate\_full** ()

rotates motor by 360 ° [More...](#)

---

void **go\_home** ()

returns motor to an original position [More...](#)

---

### Private Attributes

---

powerstep01\_init\_u\_t **init**

structure grouping data for PowerStep01 object initialization [More...](#)

---

int **motor\_number\_full\_steps**

number of full motor steps [More...](#)

---

int **steps\_full\_rotation**

number of motor steps to rotate by 360 ° [More...](#)

---

int **steps\_quarter\_rotation**

number of motor steps to rotate by 90 ° [More...](#)

---

int **steps\_half\_rotation**

number of motor steps to rotate by 180 ° [More...](#)

---

### Detailed Description

---

class is based primarily on a PowerStep01 class

Example:

```
// Stepper Motor demo showing quarter, full rotations and acceleration
#include "mbed.h"
#include "PowerStep01Demo.h"

int main() {
    PowerStep01Demo demo(48);
    while(1) {
```

```
}  
}
```

## Constructor & Destructor Documentation

---

### ◆ PowerStep01Demo()

PowerStep01Demo::PowerStep01Demo ( int motor\_full\_steps\_per\_revolution )

initializes PowerStep01 and DevSPI classes and runs speed up and rotation demonstrations

#### Parameters

**motor\_full\_steps\_per\_revolution** number of motor full steps per revolution

## Member Function Documentation

---

### ◆ go\_home()

void PowerStep01Demo::go\_home ( )

private

returns motor to an original position

### ◆ rotate\_full()

void PowerStep01Demo::rotate\_full ( )

private

rotates motor by 360 °

### ◆ rotate\_quarter()

void PowerStep01Demo::rotate\_quarter ( )

private

rotates motor by 90 °

### ◆ rotations()

void PowerStep01Demo::rotations ( )

private

demonstrates motor rotations

### ◆ speed\_up()

void PowerStep01Demo::speed\_up ( )

private

demonstrates motor speed up

## Member Data Documentation

---

### ◆ init

powerstep01\_init\_u\_t PowerStep01Demo::init

private

structure grouping data for PowerStep01 object initialization

### ◆ motor\_number\_full\_steps

int PowerStep01Demo::motor\_number\_full\_steps

private

number of full motor steps

### ◆ steps\_full\_rotation

int PowerStep01Demo::steps\_full\_rotation

private

number of motor steps to rotate by 360 °

### ◆ steps\_half\_rotation

int PowerStep01Demo::steps\_half\_rotation

private

number of motor steps to rotate by 180 °

### ◆ steps\_quarter\_rotation

int PowerStep01Demo::steps\_quarter\_rotation

private

number of motor steps to rotate by 90 °

---

The documentation for this class was generated from the following files:

- [PowerStep01Demo.h](#)
- [PowerStep01Demo.cpp](#)

Obrázek 14: Dokumentace třídy PowerStep01Demo, celá dokumentace je dostupná na přiloženém DVD

## L6470Demo Class Reference

---

class is based mainly on L6470 and XNucleoIHM02A1 classes [More...](#)

```
#include <L6470Demo.h>
```

### Public Member Functions

---

**L6470Demo** (int motor\_full\_steps\_per\_revolution)  
initializes necessary classes and runs demonstration [More...](#)

---

### Private Member Functions

---

void **hard\_stop** (L6470 \*\*motors)  
motor hard stop [More...](#)

---

### Detailed Description

---

class is based mainly on L6470 and XNucleoIHM02A1 classes

Example:

```
// Stepper Motor demo
#include "mbed.h"
#include "L6470Demo.h"

int main() {
    L6470Demo demo(200);
    while(1) {
    }
}
```

### Constructor & Destructor Documentation

---

#### ◆ L6470Demo()

L6470Demo::L6470Demo ( int motor\_full\_steps\_per\_revolution )

initializes necessary classes and runs demonstration

##### Parameters

**motor\_full\_steps\_per\_revolution** number of motor full steps per revolution

### Member Function Documentation

---

#### ◆ hard\_stop()

```
void L6470Demo::hard_stop ( L6470 ** motors ) private

motor hard stop

Parameters
    motors motor control components
```

The documentation for this class was generated from the following files:

- [L6470Demo.h](#)
- [L6470Demo.cpp](#)

Obrázek 15: Dokumentace třídy L6470Demo, celá dokumentace je dostupná na přiloženém DVD

## Seznam použité literatury a zdrojů

1. STMicroelectronics NV. L298 datasheet. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l298.pdf>
2. STMicroelectronics. l6470. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l6470.pdf>
3. Instruments T. DRV8825. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8825.pdf>
4. drv8847. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8847.pdf>
5. Allegro MicroSystems - A4988: DMOS Microstepping Driver with Translator and Overcurrent Protection. [cited 29 Dec 2019]. Available: <https://www.allegromicro.com/en/Products/Motor-Drivers/Brush-DC-Motor-Drivers/A4988>
6. SimilarWeb. [cited 4 Jan 2020]. Available: <https://www.similarweb.com/top-websites/category/e-commerce-and-shopping/marketplace>
7. Prototype PCB - Online PCB Quote - Full feature custom PCB prototype service at low cost - PCBWay. [cited 4 Jan 2020]. Available: <https://www.pcbway.com/orderonline.aspx>
8. A Price Comparison Site for Printed Circuit Boards. [cited 4 Jan 2020]. Available: <https://PCBShopper.com/>
9. Fixing úrokových sazeb na mezibankovním trhu depozit - PRIBOR - Česká národní banka. [cited 4 Jan 2020]. Available: <https://www.cnb.cz/cs/financni-trhy/penezni-trh/pribor/fixing-urokovych-sazeb-na>

-mezibankovnim-trhu-depozit-pribor/index.html

10. China: total number of overseas AliExpress buyers 2018 | Statista. In: Statista [Internet]. [cited 31 Dec 2019]. Available: <https://www.statista.com/statistics/959507/china-total-number-of-overseas-aliexpress-buyers/>
11. High income | Data. [cited 31 Dec 2019]. Available: <https://data.worldbank.org/income-level/high-income>
12. USBasp - USB programmer for Atmel AVR controllers - fischl.de. [cited 3 Jan 2020]. Available: <https://www.fischl.de/usbasp/>
13. X-NUCLEO-IHM02A1. Available: [https://www.st.com/resource/en/data\\_brief/x-nucleo-ihm02a1.pdf](https://www.st.com/resource/en/data_brief/x-nucleo-ihm02a1.pdf)
14. X-NUCLEO-IHM03A1. Available: [https://www.st.com/resource/en/data\\_brief/x-nucleo-ihm03a1.pdf](https://www.st.com/resource/en/data_brief/x-nucleo-ihm03a1.pdf)
15. NUCLEO-F030R8. Available: [https://www.st.com/resource/en/data\\_brief/nucleo-f030r8.pdf](https://www.st.com/resource/en/data_brief/nucleo-f030r8.pdf)
16. MICROCON SX16-042N. [cited 7 Jan 2020]. Available: [http://jan.kostial.sk/data/uploads/docs/cnc/microcon.cz\\_krokove\\_motory\\_sx\\_13-20.pdf](http://jan.kostial.sk/data/uploads/docs/cnc/microcon.cz_krokove_motory_sx_13-20.pdf)
17. PM42S-048 | PM stepping motors - Standard type | Product Category | eMinebea. [cited 7 Jan 2020]. Available: <https://www.eminebea.com/en/product/rotary/steppingmotor/pm/standard/pm42s-048.shtml>