



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# BUDIČ ELEKTROMOTORU PRO LETECKÉ APLIKACE

MOTOR DRIVER FOR AEROSPACE APPLICATIONS

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Kolenský

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zdeněk Kolka

BRNO 2017

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

**Student:** Tomáš Kolenský

**ID:** 174177

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2016/17

**NÁZEV TÉMATU:**

## Budič elektromotoru pro letecké aplikace

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Navrhněte budič elektromotoru 28V/1A včetně ochranných obvodů, který umožní detekovat stav motoru pomocí měření proudu mikroprocesorem (přerušení vodičů, zkrat). Při návrhu se zaměřte na splnění požadavků normy RTCA/DO-160G (napájení, napěťové jehlové impulsy, vyzařování vf energie, ovlivnitelnost přechodovými jevy způsobenými blesky). Budič navrhněte s mikroprocesorem řady ARM.

Navrhněte desku plošného spoje, realizujte přípravek a SW mikroprocesoru a provedte ověření dosažených parametrů.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] RTCA, Inc. RTCA/DO-160G: Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment. December 8, 2010. 542 s.

[2] HOROWITZ, P., HILL, W. The Art of Electronics. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2015.

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 30.5.2017

**Vedoucí práce:** prof. Dr. Ing. Zdeněk Kolka

**Konzultant:**

**prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem budicího obvodu elektromotor 28V/1A pro letecké aplikace. Návrh zahrnuje specifikaci požadavků na napájení, odolnosti a rušení budicího obvodu, dále na návrh bloků ochranné, napájecí, výkonové a řídicí části budicího obvodu. Poslední část je zaměřená na propojení jednotlivých bloků do funkčního celku.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Budící obvod, letecké aplikace, RTCA, elektromotor, blok, zařízení

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with electric excitation circuit 28V/1A for aerospace applications. The proposal involves specifying requirements for power, durability and noise excitation circuit further proposal block trade, power, power and control of the driver circuit. The last part is focused on linking individual blocks into a functional whole.

## **KEYWORDS**

Driver circuit, aerospace applications, RTCA, electric motor, block, device

KOLENSKÝ, T. *Budič elektromotoru pro letecké aplikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2016. 54 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zdeněk Kolka



# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Budič elektromotoru pro letecké aplikace jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Dr. Ing. Zdeňkovi Kolkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b>	<b>viii</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>x</b>
<b>Úvod</b>	<b>11</b>
<b>1 POŽADAVKY NA BUDIČ</b>	<b>12</b>
1.1 Napájení RTCA čl. 16 .....	12
1.2 Napěťové jehlové impulzy RTCA čl. 17 .....	12
1.3 Ovlivnitelnost nízkofrekvenčními signály po napájecím vedení RTCA čl. 18 13	13
1.4 Ovlivnitelnost indukovanými signály RTCA čl. 19 .....	14
1.5 Ovlivnitelnost vysokofrekvenčními signály RTCA čl. 20.....	15
1.6 Vysokofrekvenční rušení RTCA čl. 21.....	15
1.7 Ovlivnitelnost přechodnými jevy způsobenými blesky RTCA čl. 22 ....	16
<b>2 NÁVRH BUDIČE</b>	<b>19</b>
2.1 Blok ochrany .....	19
2.2 Blok napájení .....	22
2.3 Blok výkonové části motoru .....	24
2.4 Blok řízení motoru .....	26
<b>3 REALIZACE NÁVRHU BUDIČE</b>	<b>32</b>
3.1 Návrh DPS budiče .....	32
3.2 Ovládací software pro budič elektromotoru .....	32
3.3 Popis funkcí budiče elektromotoru .....	33
<b>4 OŽIVENÍ ZAPOJENÍ A MĚŘENÍ NA BUDIČI ELEKTROMOTORU</b>	<b>37</b>
4.1 Výsledky měření .....	37
<b>5 Závěr</b>	<b>41</b>
<b>Literatura</b>	<b>42</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>43</b>
<b>A Návrh zařízení</b>	<b>44</b>
A.1 Blok ochrany.....	44

A.2	Blok napájení .....	45
A.3	Blok výkonové části motoru .....	46
A.4	Blok řízení motoru .....	47
<b>B</b>	<b>NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ BUDIČE ELEKTROMOTORU</b>	<b>48</b>
<b>C</b>	<b>OSAZOVACÍ PLÁN DPS BUDIČE ELEKTROMOTORU</b>	<b>49</b>
<b>D</b>	<b>SEZNAM SOUČÁSTEK</b>	<b>50</b>
<b>E</b>	<b>FOTOGRAFIE PŘÍPRAVKU BUDIČE ELEKTROMOTORU</b>	<b>54</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1. Způsob testování odolnosti proti napěťovým jehlovým impulzům [1].	13
Obr. 1.2. Frekvenční charakteristika testovacího rušivého NF signálu [1].	14
Obr. 1.3. Způsob testování odolnosti vůči indukovanému elektrickému poli [1].	15
Obr. 1.4. Maximální úroveň rušivého VF vyzařování pro zařízení kategorie M [1].	16
Obr. 1.5. Tvar testovacího pulzu pro proud 1 typ [1].	17
Obr. 1.6. Tvar testovacího pulzu pro napětí 2 typ [1].	17
Obr. 1.7. Tvar testovacího pulzu pro napětí proud 3 typ [1].	18
Obr. 1.8. Tvar testovacího pulzu pro napětí 4 typ [1].	18
Obr. 2.1. Blokové schéma navrhovaného budiče.	19
Obr. 2.2. První stupeň bloku ochrany.	19
Obr. 2.3. Druhý stupeň bloku ochrany.	22
Obr. 2.4. Zdroj napětí 12 V.	23
Obr. 2.5. Filtr EMI.	23
Obr. 2.6. Zdroj napětí 3.3 V.	24
Obr. 2.7. Filtr EMI na výstupu H-můstku.	25
Obr. 2.8. Zapojení H-můstku.	26
Obr. 2.9. Mikroprocesor STM32F103RBT6 [11].	27
Obr. 2.10. Zdroj referenčního napětí 3.3 V pro mikroprocesor.	27
Obr. 2.11. Odporový dělič pro měření napětí na elektromotoru.	28
Obr. 2.12. Vnitřní zapojení obvodu INA240 a odporový dělič R1, R2 sloužící pro nastavení referenčního napětí [9].	29
Obr. 2.13. Zapojení snímačů proudu INA240 s korekcí chyby způsobené kolísáním napájecího napětí.	29
Obr. 2.14. Ovládací tlačítka.	30
Obr. 2.15. Indikační LED diody a externí paměť EEPROM.	30
Obr. 2.16. Zapojení komunikačního rozhraní RS232.	31
Obr. 2.17. Komunikační rozhraní SWD.	31
Obr. 3.1. Schéma DPS budiče elektromotoru.	32
Obr. 3.2. Nastavení periférií v prostředí STM32CubeMX.	33
Obr. 3.3. Vývojový diagram hlavního programu.	34

Obr. 3.4. Programovací prostředí Keil uVision5. ....	35
Obr. 3.5. Ukázka komunikace přípravku budiče elektromotoru přes rozhraní RS232 ...	35
Obr. 3.6. Hotový přípravek se zapojeným programovacím rozhraním SWD. ....	36
Obr. 4.1. Nástupná hrana výstupního napětí budiče elektromotoru. ....	37
Obr. 4.2. Sestupná hrana výstupního napětí budiče elektromotoru. ....	38
Obr. 4.3. Měření spektra vyzařování mikroprocesoru při nevybuzeném můstku. ....	38
Obr. 4.4. Měření spektra vyzařování při vybuzeném můstku. ....	39
Obr. 4.5. Spektrum pozadí při vypnutém napájecím zdroji. ....	40

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1. Úrovně testovacího napětí a proudu pro výboj do pinu.....	18
Tab. 1.2. Úrovně testovacího napětí a proudu pro výboj do kabelového svazku. ....	18
Tab. 2.1. Hodnoty $I_{PP}$ transilu SMCJ60A pro jednotlivé typy vln. ....	20
Tab. 2.2. Vstupní logické úrovně a spínací úrovně tranzistorů .....	28

# ÚVOD

V dnešní době je řízení elektromotorů realizováno zpravidla pomocí mikroprocesorů a budících integrovaných obvodů, které mají na starost samotné řízení respektive spínání elektromotoru. Volba těchto obvodů poté závisí pouze na dané aplikaci a požadavcích kladených na funkci zařízení.

Cílem této práce je návrh budícího obvodu elektromotoru, který bude použit v leteckých aplikacích. Tento obvod bude napájen ze stejnosměrné sítě letounu, která má obvykle 28V stejnosměrných. Při samotném návrhu je důležité zaměřit se na specifika, která plynou z použití v leteckých aplikacích, respektive z prostředí, ve kterém bude zařízení provozováno. Bude se zejména jednat o vystavování navrhovaného zařízení různým extrémním vlivům a to jak z hlediska napájení, tak z hlediska klimatických vlivů.

Bakalářská práce je zaměřena na požadavky, kladené na navrhované zařízení, jako jsou napájení, napěťové jehlové impulzy, ovlivnitelnost nízkofrekvenčními signály po napájecím vedení, ovlivnitelnost indukovanými signály, ovlivnitelnost vysokofrekvenčními signály, vysokofrekvenční rušení, ovlivnitelnost přechodnými jevy způsobenými blesky. Následně na základě těchto požadavků byl navrhnut budící obvod elektromotoru. Samotný návrh zařízení je rozdělen do bloku ochrany, bloku napájení, bloku výkonové části motoru a bloku řízení motoru. Jednotlivé bloky budiče jsou propojeny do celku, který tvoří přípravek pro ovládání motoru v leteckých aplikacích. Přípravek je umožňuje simulovat stavy motoru, jaké by mohly nastat v běžném provozu. Dále je také schopen měřit napětí a proud na ovládaném motoru a tyto hodnoty odesílat pomocí sériového komunikačního rozhraní.

# 1 POŽADAVKY NA BUDIČ

Navrhovaný budič elektromotoru musí splňovat kritéria podle leteckého předpisu RTCA/DO-160G (dále jen RTCA), aby mohl být použit v leteckých aplikacích. Proto je nutné před samotným návrhem vyspecifikovat požadavky, které jsou na obvod v tomto předpise kladeny. Bude se jednat jen o určitý okruh požadavků, které budou upřesněny v následujících podkapitolách.

## 1.1 Napájení RTCA čl. 16

Napájení navrhovaného zařízení má být 28 V stejnosměrných, to spadá podle leteckého předpisu RTCA do kategorie B. Sem patří zařízení na 14 V nebo 28 V stejnosměrných, která jsou napájena alternátorem s usměrňovačem hnaným motorem, stejnosměrným generátorem, nebo baterií.

Při normálních provozních podmínkách definovaných předpisem RTCA může dojít:

- ke změně vstupního napětí na zařízení v rozmezí od 22.0 V do 30.3 V, při nouzovém režimu 18.0 V
- výpadkům napájení, až do 50 ms
- k napěťovým špičkám 47 V (-0/+2 V) do 5 ms a 40 V (-0/+2 V) do 30 ms
- poklesu napětí na 17 V (-0.7/+0 V)
- při startu motoru může napájecí napětí poklesnout v rozmezí od 10.0 V do 20.5 V až na dobu 35 sekund

Při abnormálních provozních podmínkách definovaných předpisem RTCA může dojít:

- ke změně vstupního napětí na zařízení v rozmezí od 20.5 V do 32.2 V
- při stavu nízkého napájecího napětí se může na zařízení objevit napětí od 0 V do 20.5 V po dobu až 10 minut
- napájecí napětí může poklesnout až na 12 V po dobu 7 sekund
- k napěťovým špičkám 60 V (-0/+3 V) do 100 ms a 40 V (-0/+2 V) do 1 sekundy

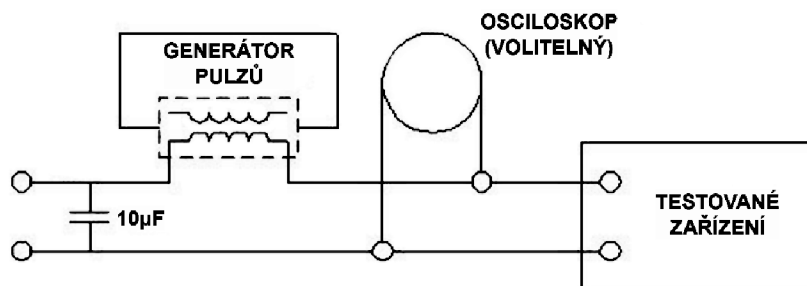
Zařízení musí být schopno pracovat ve stanovených rozsazích napětí a musí splňovat odolnost vůči napěťovým špičkám. Dále by mělo být schopné reagovat na pokles a výpadek napájení.

## 1.2 Napěťové jehlové impulzy RTCA čl. 17

Navrhované zařízení spadá v této oblasti do kategorie A. To podle definice předpisu RTCA znamená, že musí mít velký stupeň odolnosti proti poškození napěťovými jehlovými impulzy.



Při testování by mělo odolat 50 kladným impulzům v periodě jedné minuty a 50 záporným impulzům také v periodě jedné minuty. Doba jednoho impulzu by měla být maximálně 10  $\mu$ s a náběžná hrana tohoto impulzu by neměla být delší jak 2  $\mu$ s při velikosti impulzu 600 V.

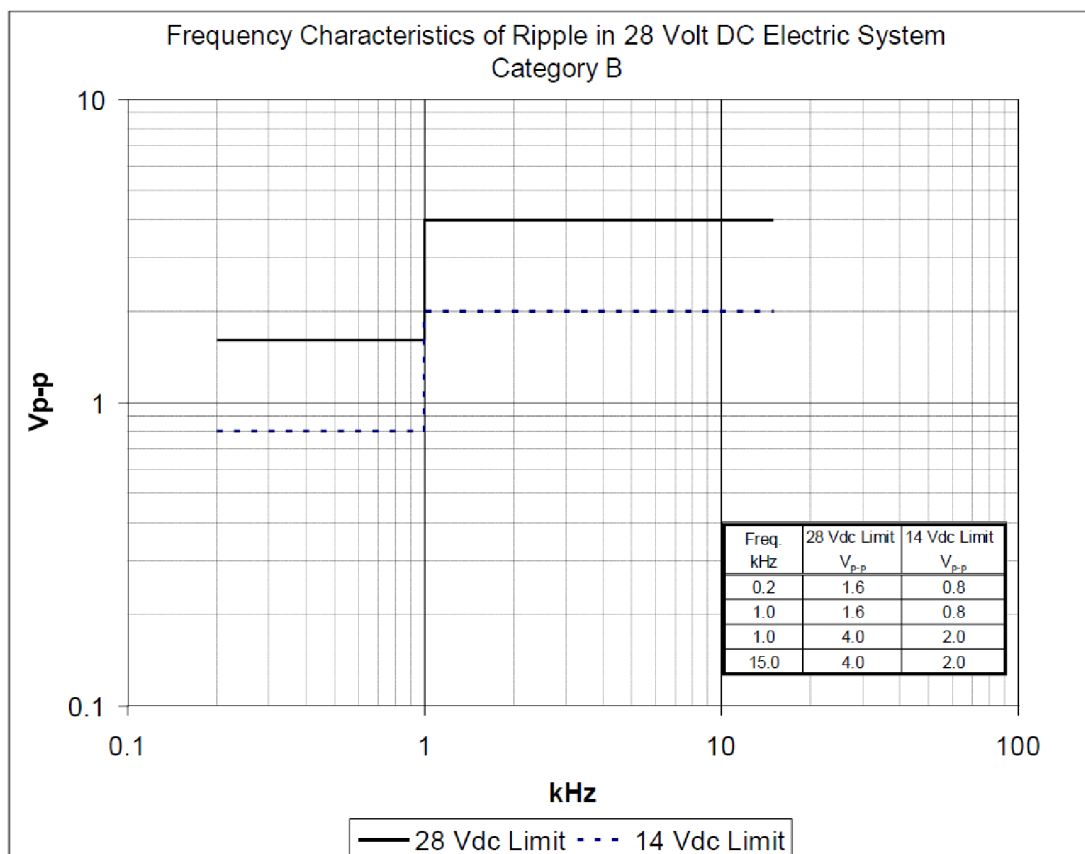


Obr. 1.1. Způsob testování odolnosti proti napět'ovým jehlovým impulzům [1].

### 1.3 Ovlivnitelnost nízkofrekvenčními signály po napájecím vedení RTCA čl. 18

V této oblasti je navrhované zařízení zařazeno do kategorie B a podle předpisu RTCA by mělo být odolné vůči NF signálu při frekvenci 200 Hz až 1 kHz a napětí peak to peak 1.6 V a při frekvence 1 kHz až 15 kHz a napětí peak to peak 4 V, který se objeví na neuzemněném napájecím vodiči.

Jelikož navrhované zařízení nebude mít obvody náchylné na NF rušení a bude vybaveno odrušovacími filtry typu dolní propust na vstupu napájecího napětí 28 V lze předpokládat, že navrhované zařízení nebude ovlivnitelné NF signály. Toto tvrzení bude ověřeno při samotném testování zařízení.



Obr. 1.2. Frekvenční charakteristika testovacího rušivého NF signálu [1].

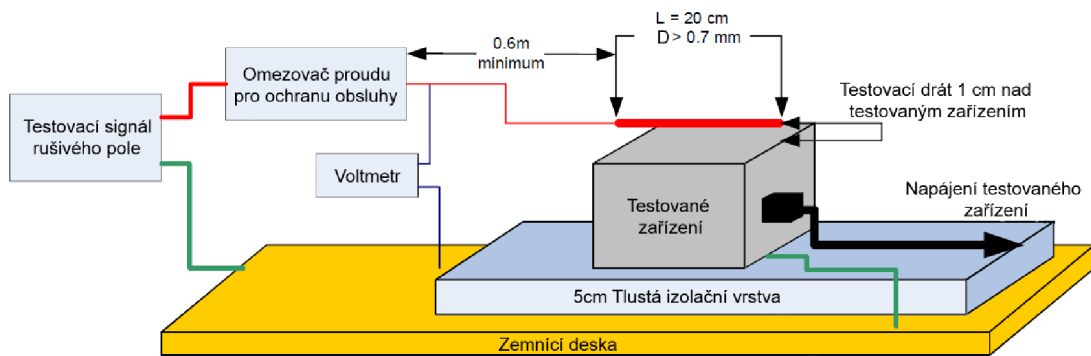
## 1.4 Ovlivnitelnost indukovanými signály RTCA čl. 19

Pro oblast ovlivnitelnosti indukovanými signály je požadovaná kategorie zařízení BC. Dle normy RTCA jsou zařízení v kategorii BC určeny pro instalaci v letecké technice kde jsou napájeny zdrojem s konstantní frekvencí, nebo stejnosměrným zdrojem, což je případ našeho zařízení. Norma dále říká, že zařízení bude provozováno v prostředí, kde bude rušení omezeno na přijatelnou úroveň.

Zařízení musí odolat:

- Magnetickému poli indukovanému do zařízení  $47.14 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$  při 400 Hz
- Elektrickému poli indukovanému do zařízení  $1202.08 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  při 400 Hz

Navrhované zařízení nemá obvody citlivé na zmíněné úrovně indukovaných signálů. Lze proto předpokládat neovlivnitelnost indukovanými signály. Toto tvrzení bude ověřeno při testování navrhovaného zařízení.



Obr. 1.3. Způsob testování odolnosti vůči indukovanému elektrickému poli [1].

## 1.5 Ovlivnitelnost vysokofrekvenčními signály RTCA čl. 20

V oblasti ovlivnitelnosti VF signály spadá navrhované zařízení do kategorie T, která definuje odolnost zařízení vůči signálům z pozemních radarů. Navrhované zařízení má odolat rušivým VF signálům od 100 MHz do 8 GHz.

Navrhované zařízení nemá obvody citlivé na VF signály. Lze proto předpokládat neovlivnitelnost těmito signály. Toto tvrzení bude ověřeno při testování navrhovaného zařízení.

Samotné testování probíhá ve stíněné místnosti kde je umístěno testované zařízení a zdroj rušivého signálu. Tato místnost musí být dokonale odstíněna tak, aby bylo zamezeno zkreslení výsledků měření rušivými signály, které by pronikaly do zařízení s okolí.

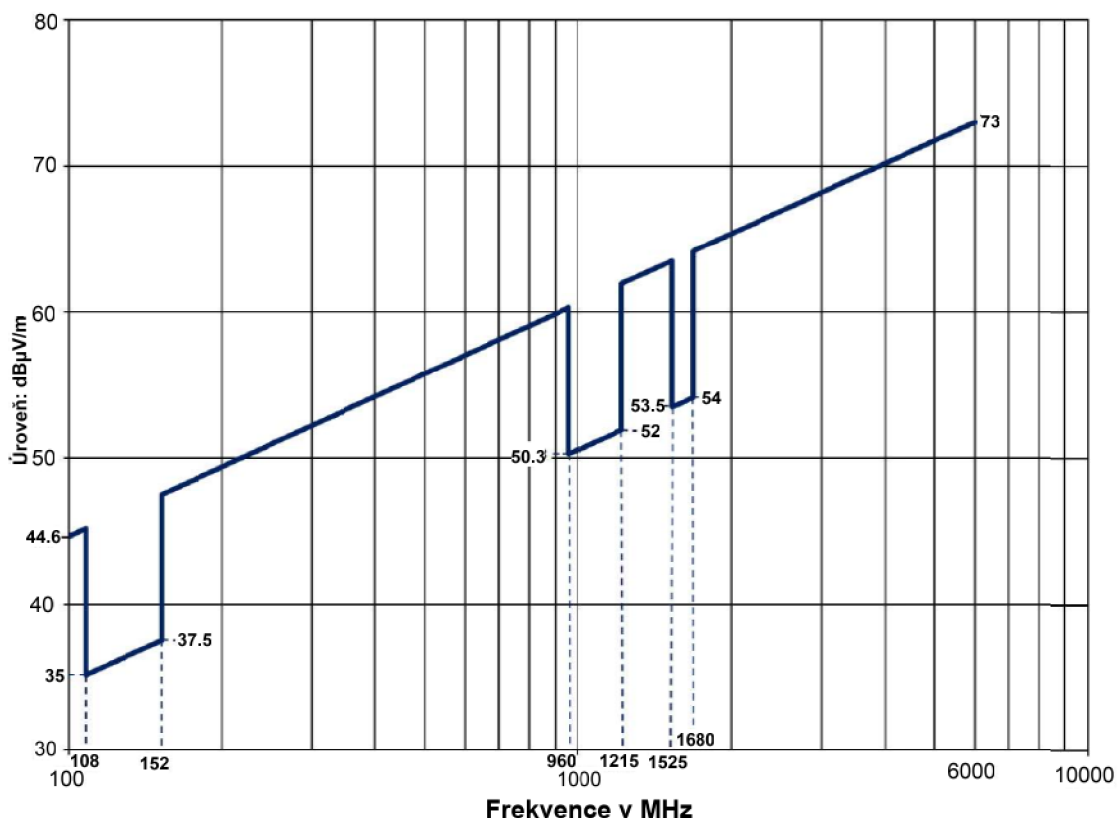
## 1.6 Vysokofrekvenční rušení RTCA čl. 21

Pro VF rušení je navrhované zařízení zařazeno do kategorie M, kam by podle definice RTCA měly spadat zařízení, u kterých je předpokládáno použití v kokpitu nebo prostoru pro cestující a nejsou blízko radiových přijímačů a antén.

Navrhované zařízení nebude pracovat na tak vysokých frekvencích, aby způsobovalo VF rušení, přesto musíme při návrhu dbát, na kvalitní odstínění všech potenciálně rušivých bloků. Zejména se musíme zaměřit na omezení vyzařování do pásem 108-152 MHz dále 960-1215 MHz a 1525-1680 MHz.

Potencionální místa VF rušení navrhovaného zařízení jsou opatřeny filtračními obvody, které by měli zamezit případnému VF rušení.

Měření vysokofrekvenčního rušení probíhá ve stíněné komoře, kde je umístěno testované zařízení a širokopásmová anténa připojená na spektrální analyzátor. V průběhu měření jsou u testovaného zařízení simulovány podmínky jako ve skutečném provozu a jsou zaznamenávány hodnoty změřené spektrálním analyzátozem. Ty jsou poté vyhodnoceny a je stanoveno, zda splnily přípustné limity pro provoz v dané kategorii leteckého vybavení.

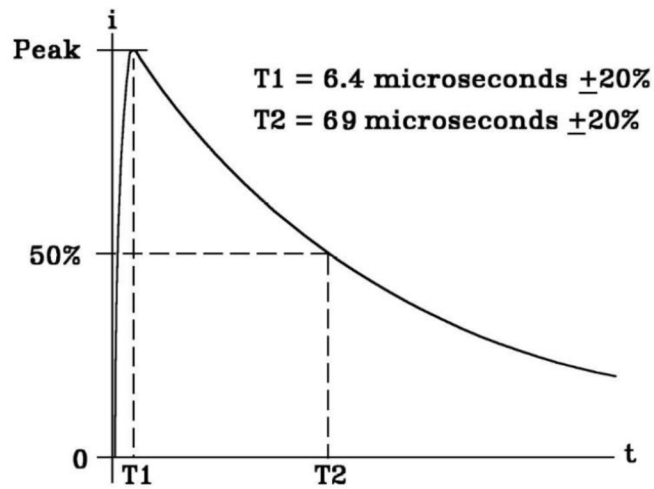


Obr. 1.4. Maximální úroveň rušivého VF vyzařování pro zařízení kategorie M [1].

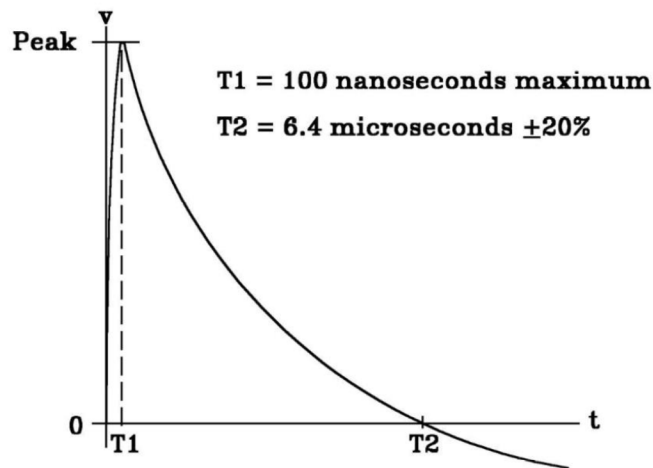
## 1.7 Ovlivnitelnost přechodnými jevy způsobenými blesky RTCA čl. 22

Požadavky na odolnost vůči přechodným jevům způsobenými blesky, jsou dány zkušební normou, která definuje podmínky, za jakých bude zařízení testováno a jaké přechodné jevy způsobené blesky by mělo vydržet.

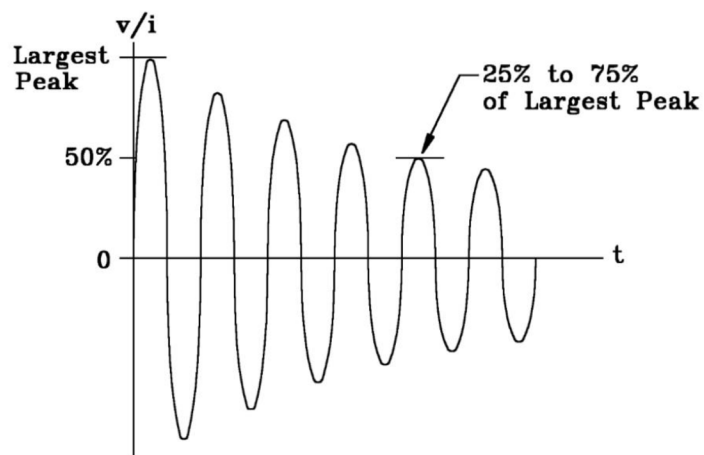
Pro navrhované zařízení je úroveň zkušebních signálů definována jako A2C2XX, což podle leteckého předpisu RTCA znamená, že zařízení musí odolat 250 respektive 125 voltům špičkového napětí a 10 respektive 25 ampérům špičkového proudu pro výboje do pinů a 125 respektive 250 voltům testového napětí a 250 respektive 50 ampérům testového proudu pro úder do kabelového svazku. Průběhy napětí a proudů při testech odolnosti budou mít tvar vlny, který je určen Tab. 1.1. a Tab. 1.2. přičemž tvary vln jsou znázorněny Obr. 1.1., 1.2., 1.3. a 1.4.



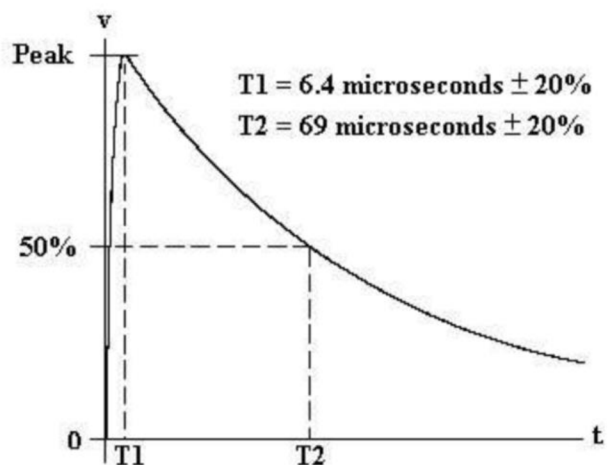
Obr. 1.5. Tvar testovacího pulzu pro proud 1 typ [1].



Obr. 1.6. Tvar testovacího pulzu pro napětí 2 typ [1].



Obr. 1.7. Tvar testovacího pulzu pro napětí proud 3 typ [1].



Obr. 1.8. Tvar testovacího pulzu pro napětí 4 typ [1].

Tab. 1.1. Úrovně testovacího napětí a proudu pro výboj do pinu.

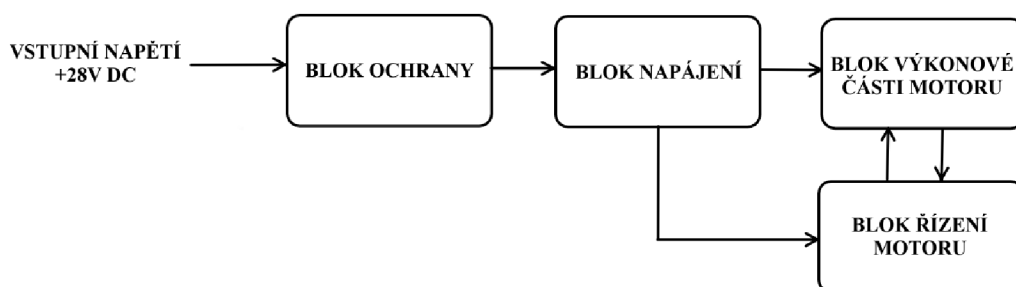
Úroveň testu	Typ vlny	
	3/3	4/1
2	250V/10A	125V/25A

Tab. 1.2. Úrovně testovacího napětí a proudu pro výboj do kabelového svazku.

Úroveň testu	Typ vlny	
	2/1	3/3
2	125V/250A	250V/50A

## 2 NÁVRH BUDIČE

Při návrhu budiče bude nutné zaměřit pozornost především na požadavky a omezení předchozí kapitoly. Samotný návrh bude pojat formou bloků, do kterých budou jednotlivé části budiče rozděleny. Blokovaný návrh je volen z důvodů přehlednosti a případného využití v dalších aplikacích. Navrhované zařízení je rozděleno do čtyř bloků podle schématu Obr. 2.1. Samotný návrh jednotlivých bloků bude rozebrán v následujících podkapitolách, načež vyvrcholením bude celkové propojení bloků do jednoho celku.

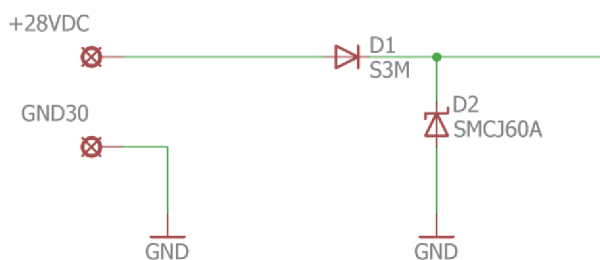


Obr. 2.1. Blokované schéma navrhovaného budiče.

### 2.1 Blok ochrany

Blok ochrany je vstupním blokem napájecího napětí do navrhovaného zařízení. Tento blok plní důležitou úlohu v ochraně řídicích obvodů elektromotoru před krátkodobým přepětím, napěťovými jehlovými impulzy a přechodnými jevy způsobenými blesky. Tento blok má dva stupně ochrany, první hrubou tvořenou usměrňovací diodou a transilem, a druhou jemnou založenou na obvodu od firmy Linear technology LT4363.

První stupeň bloku ochrany kombinuje usměrňovací diodu, sloužící k ochraně proti přepólování napětí na vstupu, s transilem nebo také TVS (Transient Voltage Suppressor) diodou. Transil plní funkci přepětíové ochrany, jedná se v podstatě o speciálně konstruovanou lavinovou Zenerovu diodu, která je extrémně rychlá a je schopna vydržet opakované velké poruchové proudy.



Obr. 2.2. První stupeň bloku ochrany.

Volba hodnot transilu, vhodného pro zvolenou aplikaci, vychází z požadavků normy RTCA na odolnost proti přechodným jevům způsobenými blesky. Při výběru bylo také vycházeno z aplikační poznámky od firmy Microsemi, která udává jak vypočítat hodnoty špičkového proudu pro jednotlivé typy testovacích vln, které mají simulovat vlivy působení blesku na zařízení. Důležité jsou zejména vlivy, které způsobí údery blesků do vstupních pinů zařízení. Výpočet pro vlny typu 3 a 4 je následovný:

$$I_{P3} = \frac{P_P}{P_{PP}} \cdot I_{PP} = \frac{170}{15} \cdot 15.5 = 175.6 \text{ A}, \quad (2.1)$$

$$I_{P4} = \frac{P_P}{P_{PP}} \cdot I_{PP} = \frac{50}{15} \cdot 15.5 = 51.6 \text{ A}, \quad (2.2)$$

kde  $I_{P3}$  a  $I_{P4}$  je špičkový proud pro daný typ vlny,  $P_P$  je špičkový výkon, který lze popsat jako energie vztažená na jeden impuls v joulech dělená dobou trvání impulsu v sekundách,  $P_{PP}$  pulzní špičkový výkon je definován jako okamžitý výkon rozptýlený zařízením pro daný typ pulzu,  $I_{PP}$  je pulzní špičkový proud vybraného transilu (ten je pro transil SMCJ60A 15.5 A). Pro vlnu typu 3 vyšel maximální špičkový proud  $I_{P3} = 175.6 \text{ A}$  po dobu trvání 5  $\mu\text{s}$ . U vlny typu 4 je  $I_{P4} = 51.6 \text{ A}$ , kde tato hodnota může nastat od 6.4  $\mu\text{s}$  do 69  $\mu\text{s}$ . Z důvodů tolerančního rozsahu byla volena nejhorší možná hodnota tedy 83  $\mu\text{s}$ .

Z výpočtů plyne, že zvolený transil SMCJ60A, který má hodnotu pulzního špičkového proudu 15.5 A by měl s dostatečnou rezervou vyhovět specifikovaným požadavkům z kapitoly 1.7. V tabulce Tab. 2.1. jsou doplněny přesné vypočtené hodnoty  $I_{PP}$  transilu SMCJ60A pro jednotlivé typy vln.

Tab. 2.1. Hodnoty  $I_{PP}$  transilu SMCJ60A pro jednotlivé typy vln.

Pracovní napětí	Typ transilu	$I_{PP}$	Ekvivalentní $I_P$ způsobený bleskem podle normy RTCA	
			Typ vlny 3	Typ vlny 4
60 V	SMCJ60A	15.5 A	175.6 A	51.6 A

Druhý stupeň bloku ochrany je založený na obvodu LT4363, tento obvod byl zvolen z důvodu kombinace přepětové a nadproudové ochrany s možností nastavení požadovaného rozmezí napětí a proudu ve, které bude navrhované zařízení pracovat, dále byl zvolen vyšší teplotní rozsah pro vybraný obvod z důvodu použití v extrémních podmínkách leteckého provozu. Zvolený rozsah  $-40^\circ\text{C}$  až  $+125^\circ\text{C}$  by měl zabezpečit bezchybný provoz tohoto obvodu, který je požadován z důvodu ochrany celého zařízení. U navrhovaného budiče je zvolena pracovní oblast v rozmezí 18 V až 36 V pro napětí a 0 A až 2.5 A pro proud. Pokud dojde ke krátkodobému přepětí, obvod funguje jako regulátor napětí a reguluje výstupní napětí na maximální nastavené v tomto případě 36 V, jestliže toto přepětí přetrvává, obvod rozepne tranzistor  $T_1$  aby zamezil jeho zničení a průniku jiného než požadovaného napětí do řídicích obvodů budiče. Doba, po kterou obvod reguluje výstupní napětí a ještě nedojde k rozepnutí tranzistoru  $T_1$  závisí na průběhu vstupního napětí a na době kdy dojde k regulaci výstupního napětí. Doba



regulace pak lze vypočítat podle vztahu (2.3) kde  $C_{TMR}$  je kapacita časovacího kondenzátoru a  $I_{TMR}$  je závislí na vstupním a výstupním napětí. Výpočet pro dobu regulace proudu podle vztahu (2.4) je obdobný.

$$t_{REG} = C_{TMR} \cdot \left( \frac{0.775V}{I_{TMR}} + \frac{100mV}{6\mu A} \right), \quad (2.3)$$

$$t_{LIM} = C_{TMR} \cdot \frac{0.875V}{I_{TMR}}, \quad (2.4)$$

Obvod LT4363 je také schopen indikovat nadproud pomocí  $R_{SNS}$ . V použitém zapojení je maximální dovolený proud 2.5 A, pokud bude tento proud vyšší, dojde opět nejprve k regulaci výstupního proudu a poté k rozepnutí tranzistoru  $T_1$  a zamezení průniku vyššího proudu než je dovolený do dalších bloků zařízení. Hodnotu odporu  $R_{SNS}$  pro zvolený výstupní proud lze vypočítat podle vztahu (2.5) kde  $I_{LIM}$  je limitní proud. Na základě doporučení výrobce je zvolený odpor  $R_{SNS}$  15 m $\Omega$ .

$$R_{SNS} = \frac{50mV}{I_{LIM}} = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{2.5} = 20m\Omega, \quad (2.5)$$

Dále je nutné spočítat odpor R7 pro zvolené podmínky funkce obvodu. Výpočet je proveden dle vztahu (2.6).

$$R7 = \frac{1.275V}{320\mu A} = 3984\Omega, \quad (2.6)$$

Odpor R7 byl zvolen 4020  $\Omega$ , dále je nutné dopočítat odpor R6 dle vztahu (2.7), aby byl dělič napětí pro kontrolu překročení povoleného výstupního napětí kompletní.

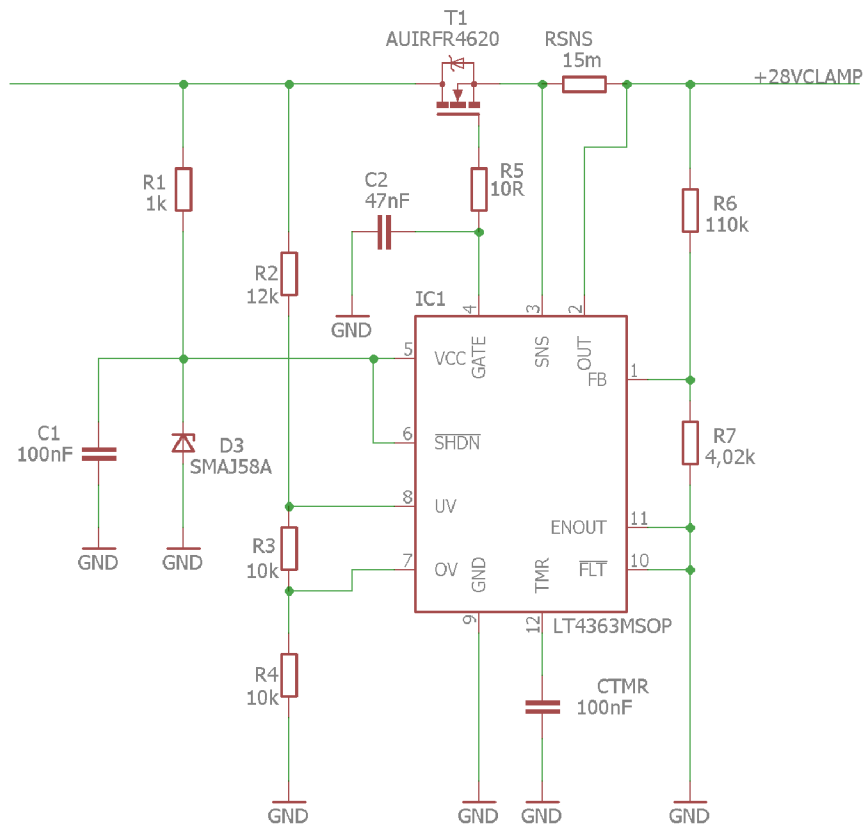
$$R6 = \frac{(U_{OUT\max} - 1.275V) \cdot R7}{1.275V} = \frac{(36 - 1.275V) \cdot 4020}{1.275V} = 109485\Omega, \quad (2.7)$$

Odpor R7 byl zvolen 110 k $\Omega$ . Ověření správnosti návrhu děliče pro maximální napětí na výstupu 36 V, při kterém by na pinu FB mělo být 1.275 V, dle vztahu (2.8).

$$U_{FB} = U_{OUT\max} \cdot \frac{R7}{R7 + R6} = 36 \cdot \frac{4020}{4020 + 110000} = 1.269V, \quad (2.8)$$

Vypočtené hodnoty odporů děliče splňují zadané požadavky na kontrolu maximálního výstupního napětí 36 V. Ostatní součástky jsou zapojeny podle doporučení výrobce.

Tranzistor AUIRFR4620 je dimenzován tak aby snesl maximální napěťovou vlnu, která pronikne přes transil SMCJ60A. Maximální napětí mezi Drain a Source je 200 V, přesto vykazuje tranzistor minimální odpor v sepnutém stavu  $R_{DS(on)} = 0.064 \Omega$ .



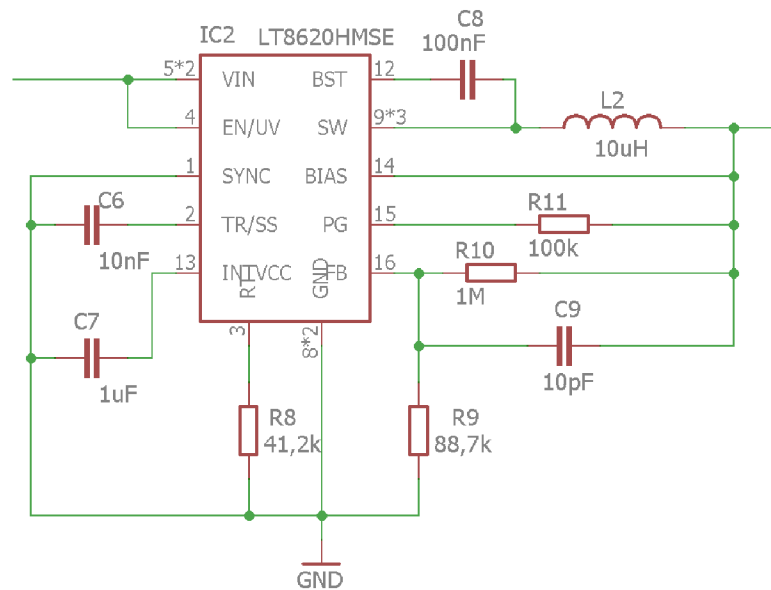
Obr. 2.3. Druhý stupeň bloku ochrany.

## 2.2 Blok napájení

Blok napájení slouží k vytvoření dvou různých napájecích napětí ze vstupního napětí 28 V. Konkrétně se jedná o 3.3 V/0.5 A pro blok řízení motoru a 12 V/2 A pro blok výkonové části motoru. Oba zdroje jsou tvořeny integrovanými DC-DC spínanými regulátory fungujícími jako snižující měniče od firmy Linear technology.

Zdroj pro 12 V je tvořen obvodem LT8620. Na jeho vstupu může být pro zvolenou aplikaci napětí od 12.5 V do 65 V. Zde bude jako vstupní napětí použito 28 V, ve špičce se může objevit napětí až 36 V, což je v příslušném rozmezí, jehož překročení hlídá obvod LT4363 v bloku ochrany. Hodnota výstupního napětí je dána odporovým děličem R10, R9 mezi výstupem SW a pinem FB. Pro dodržení přesného výstupního napětí, je vhodné použít odpory s tolerancí 1%. Z důvodů stability výstupního napětí při malé zátěži zdroje, je vhodné volit hodnoty odporů děliče větší. Proud protékající děličem se poté chová jako proud zátěží a tím zvyšuje účinnost zdroje při malém zatížení. Výpočet odporového děliče je dán dle vztahu (2.9), kde je hodnota odporu  $R9 = 88.7 \text{ k}\Omega$  zvolena a hodnota  $V_{OUT} = 12 \text{ V}$  je rovna požadovanému výstupnímu napětí.

$$R10 = R9 \cdot \left( \frac{V_{OUT}}{0.970} - 1 \right) = 88.7 \cdot 10^3 \cdot \left( \frac{12}{0.970} - 1 \right) = 1008619 \Omega = 1 \text{ M}\Omega, \quad (2.9)$$



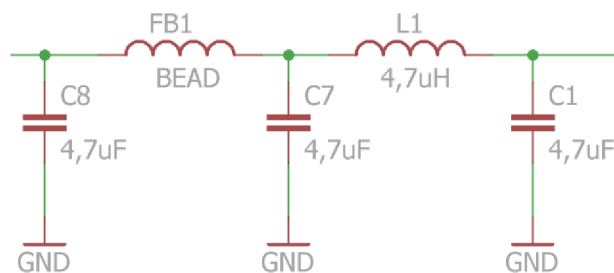
Obr. 2.4. Zdroj napětí 12 V.

Dále je nutné zvolit hodnotu odporu R8, který udává hodnotu spínací frekvence zdroje. Ta je v rozmezí od 200 kHz do 2.2 MHz. Hodnota spínací frekvence je podle doporučení výrobce pro aplikace s výstupním napětím 12 V udávána jako 1 MHz. Výpočet hodnoty odporu R8 udává vztah (2.10).

$$R_T = \frac{46.5}{f_{sw}} - 5.2 = \frac{46.5}{1 \cdot 10^6} - 5.2 = 41.2k\Omega, \quad (2.10)$$

Zapojení obvodu je provedeno podle doporučení výrobce a na vstupu je doplněno o filtr zajišťující nízké vyzařování EMI obvodu. EMI neboli elektromagnetické rušení, které je signál generovaný zdrojem rušení přenášený prostřednictvím elektromagnetické vazby do rušených systémů. Mezní frekvenci použitého filtru EMI lze vypočítat ze vztahu (2.11). Mezní frekvence filtru vychází na 33.8 kHz.

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{4.7 \cdot 10^{-6} \cdot 4.7 \cdot 10^{-6}}} = 33.8kHz, \quad (2.11)$$



Obr. 2.5. Filtr EMI.

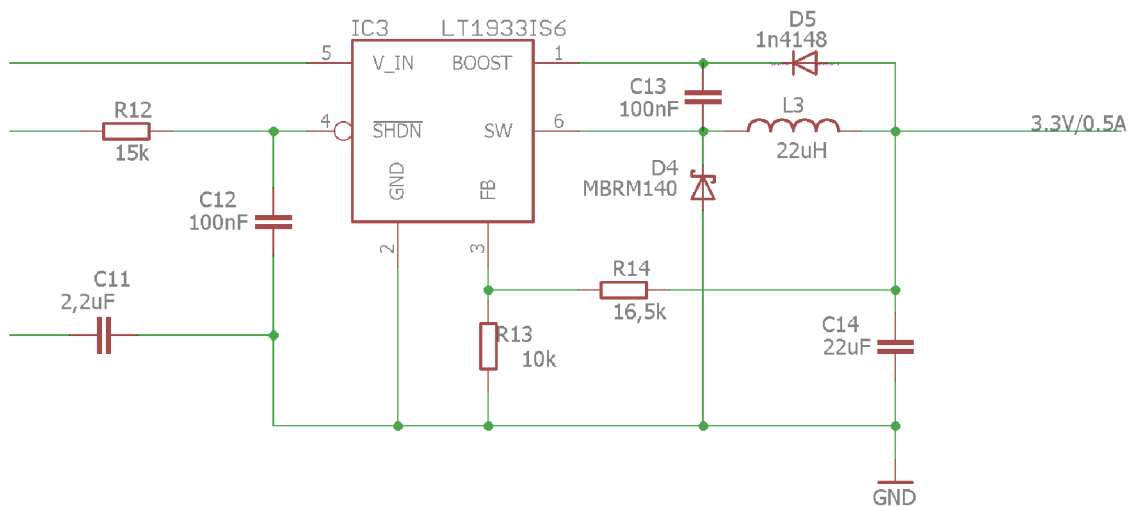
Druhý zdroj 3.3 V je založen na obvodu Linear technology LT1933. Vstupní napětí je zde bráno z výstupu zdroje 12 V, přičemž vstupní rozsah vstupního napětí obvodu LT1933 je od 4.5 V do 36 V. Hodnota výstupního napětí je dána odporovým děličem R14 a R13. Vypočet je dán vztahem (2.12), kde je odpor R13 volen a hodnota výstupního napětí  $V_{OUT}$  je rovna požadovanému výstupnímu napětí.

$$R14 = R13 \cdot \left( \frac{V_{OUT}}{1.245} - 1 \right) = 10 \cdot 10^3 \cdot \left( \frac{3.3}{1.245} - 1 \right) = 16506 \Omega = 16.5 k\Omega, \quad (2.12)$$

Hodnota tlumivky L3 je na základě výpočtu ze vztahu (2.13), kde  $V_{OUT}$  je požadované výstupní napětí a  $V_D$  je úbytek napětí na diodě D5. Výsledkem je přibližný odhad indukčnosti tlumivky v  $\mu H$ . Na základě toho výsledku je vybrána tlumivka doporučená výrobcem obvodu s nejbližší vyšší indukčností.

$$L3 = 5 \cdot (V_{OUT} + V_D) = 5 \cdot (3.3 + 0.4) = 18.5 \mu H, \quad (2.13)$$

Obvod byl zapojen na základě doporučení výrobce s tím, že pro zajištění tzv. měkkého startu výrobce doporučuje doplnit aplikaci o kombinaci rezistoru R12 o hodnotě 15 k $\Omega$  a kondenzátoru C12 o hodnotě 100 nF na vstupní bráně  $\overline{SHDN}$ , tato úprava zajistí pozvolný náběhový proud a zamezí případnému poškození obvodu při jeho sepnutí.



Obr. 2.6. Zdroj napětí 3.3 V.

## 2.3 Blok výkonové části motoru

Třetím blokem je blok výkonové části motoru. Tento blok má na starosti samotné spínání motoru. Je tvořen dvěma obvody LT1336 od firmy Linear technology, které ovládají H-můstek, do kterého je připojen samotný elektromotor.

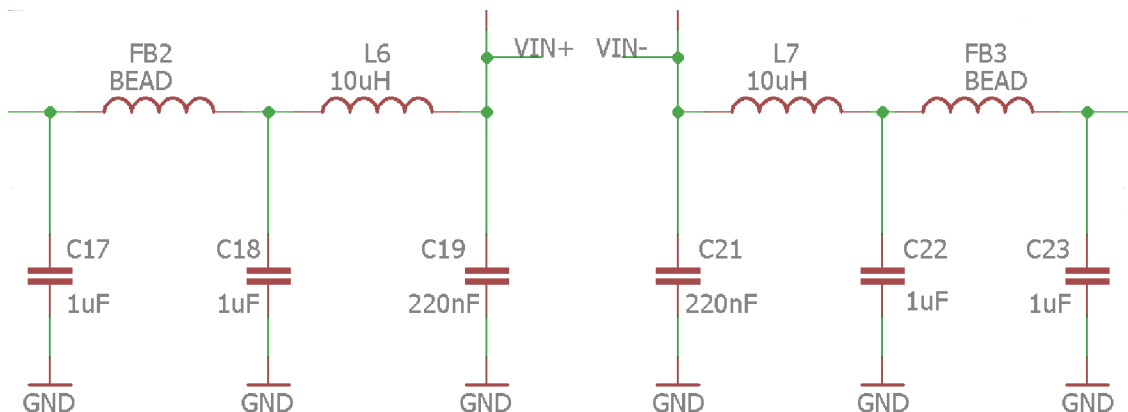
Obvody LT1336 slouží ke spínání výkonových tranzistorů MOSFET typu IRFZ44

s kanálem N, ze kterých je tvořen H-můstek. Tranzistory MOSFET mají výhodu v tom, že při sepnutém režimu mají minimální odpor. U použitých tranzistorů je hodnota tohoto odporu  $R_{DS(on)} = 0.0175 \Omega$ . Díky této hodnotě jde v podstatě o dokonalý spínač, který snese velké proudy. Maximální proud tranzistorem je  $I_D = 49 \text{ A}$ . K otevření hradla je potřebný náboj  $63 \text{ nC}$ , který zajišťuje obvod LT1336 pomocí integrované nábojové pumpy. Volba tranzistoru vychází z doporučení výrobce obvodu LT1336 pro aplikaci spínání H-můstku.

Obvody jsou napájeny  $12 \text{ V}$  z bloku napájení a jsou ovládány mikroprocesorem ARM z bloku řízení motoru. Výhodou těchto obvodů je integrovaná nábojová pumpa pro stejnosměrné operace, respektive pro spínání tranzistorů MOSFET. Další výhodou obvodu LT1336 je možnost nezávislého spínání jednotlivých tranzistorů H-můstku, přičemž každý obvod LT1336 může spínat dva tranzistory. Ve zvolené aplikaci je řízení spínání tranzistorů prováděno pomocí mikroprocesoru ARM, který pomocí logické úrovně „H“ nebo „L“ řídí spínání jednotlivých tranzistorů, respektive zadává příkazy pro obvod LT1336, který toto spínání provádí.

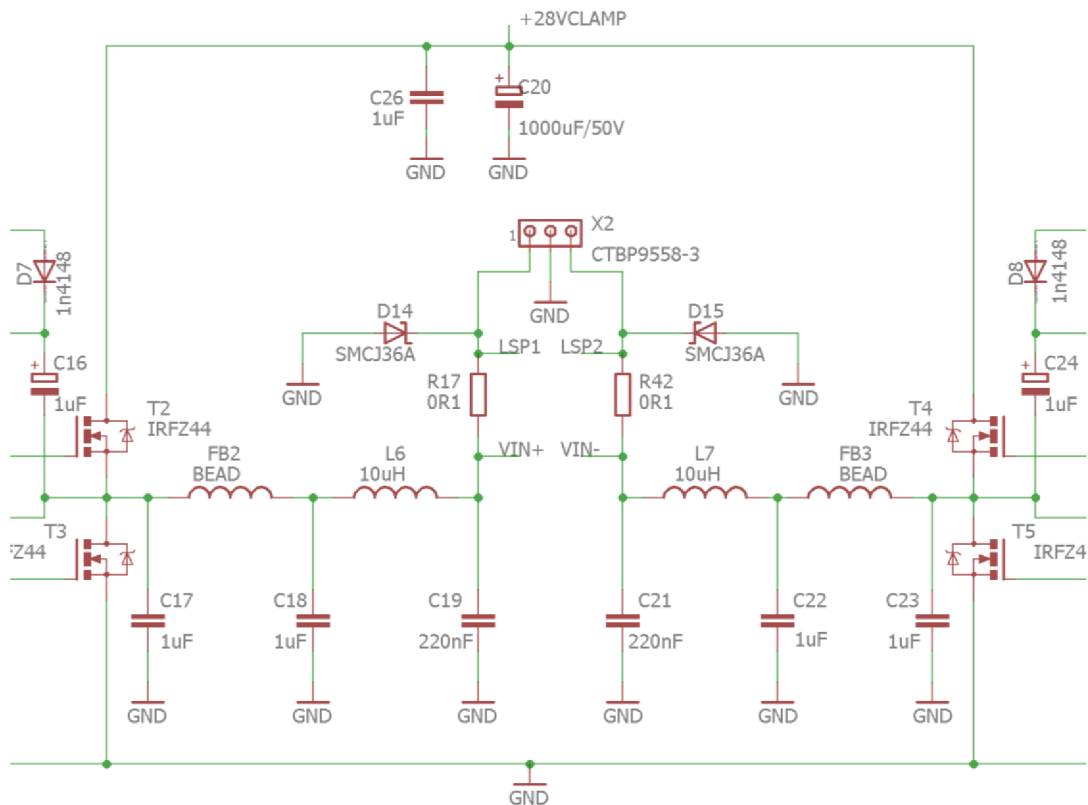
H-můstek je tvořen čtyřmi tranzistory typu MOSFET. Jde v podstatě obvod, který umožňuje spínat zátěž, ve zvoleném případě elektromotor, která má jiné napětí, obvykle vyšší, než řídicí obvody. Volba H-můstku pro spínání elektromotoru je vhodná z důvodu možností ovládání směru otáčení elektromotoru a jeho brždění při vypnutí. U navrhovaného zařízení jsme H-můstek doplněn o filtr, který zajistí nízké EMI při operacích s elektromotorem. Mezní frekvenci použitého filtru EMI je dána vztahem (2.14) a vychází na  $107.3 \text{ kHz}$ .

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{10 \cdot 10^{-6} \cdot 220 \cdot 10^{-9}}} = 107.3 \text{ kHz}, \quad (2.14)$$



Obr. 2.7. Filtr EMI na výstupu H-můstku.

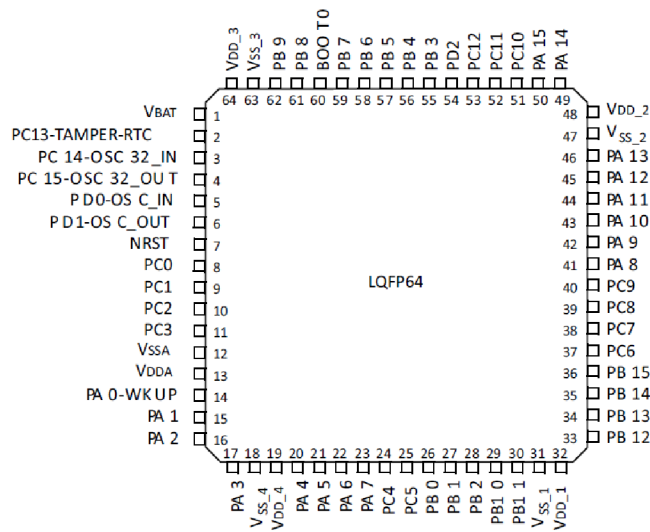
Vstupy LSP1 a LSP2 jsou opatřeny transily SMCJ36A, které zlepšují odolnost zařízení vůči přechodným jevům způsobenými blesky. H-můstek je připojen na napětí  $28 \text{ V}$  z bloku ochrany, tedy na napětí hlídáno obvodem LT4363, který má na starost udržet vstupní napětí v přípustných mezích tedy  $18 \text{ V}$  až  $36 \text{ V}$ .



Obr. 2.8. Zapojení H-můstku

## 2.4 Blok řízení motoru

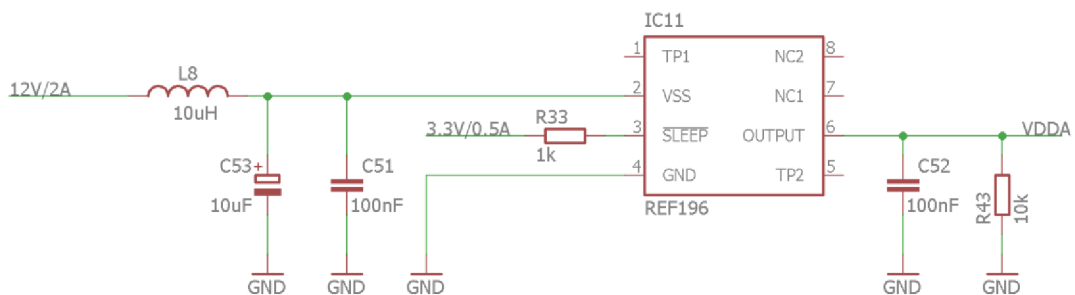
Blok řízení motoru je založen na mikroprocesoru s architekturou ARM od firmy STMicroelectronics STM32F103RBT6, který ovládá elektromotor a kontroluje napětí a proud na jeho vstupu. Mikroprocesor je napájen napětím 3.3V z bloku napájení. Mikroprocesor středních výkonů STM32F103RBT6 obsahuje vysoce výkonné jádro RISC ARM Cortex™ -M3 s frekvencí 72MHz, vysokorychlostní paměť (paměť Flash až 128 kbitů a SRAM až 20 kbitů), širokou škálu Vstupů / výstupů a periférií připojených ke dvěma APB sběrnicím. Tento mikroprocesor nabízí dva 12bitové ADC převodníky, tři univerzální 16bitové časovače a jeden časovač PWM, stejně jako standardní a pokročilé komunikační rozhraní: až dvě I2C a SPI, tři USART, USB a CAN.



Obr. 2.9. Mikroprocesor STM32F103RBT6 [11].

Blok řízení také obsahuje komunikační rozhraní RS232, které umožňuje komunikaci s mikroprocesorem, dále ovládací a indikační prvky, rozšiřující paměť EEPROM a v neposlední řadě obvod pro měření proudu na vstupu elektromotoru, navíc je tento blok doplněn o zdroj referenčního napětí REF196 od firmy Analog devices, který zajišťuje referenční napětí 3.3 V pro analogovou část mikroprocesoru. Tento zdroj je doplněn pro zvětšení přesnosti ADC převodníku integrovaného v mikroprocesoru.

Zdroj referenčního napětí REF196 je připojen na zdroj napětí 12 V. Tento zdroj má pevně nastavenou hodnotu výstupního napětí na 3.3V. Rozsah vstupního napětí je od 0.3 V do +18 V. Zapojení je provedeno dle doporučení výrobce, na výstupu je navíc doplněn odpor R43, který má zajistit zátěž zdroje i při nulovém odběru VDDA mikroprocesoru, tím je dosaženo stabilního výstupního napětí.



Obr. 2.10. Zdroj referenčního napětí 3.3 V pro mikroprocesor.

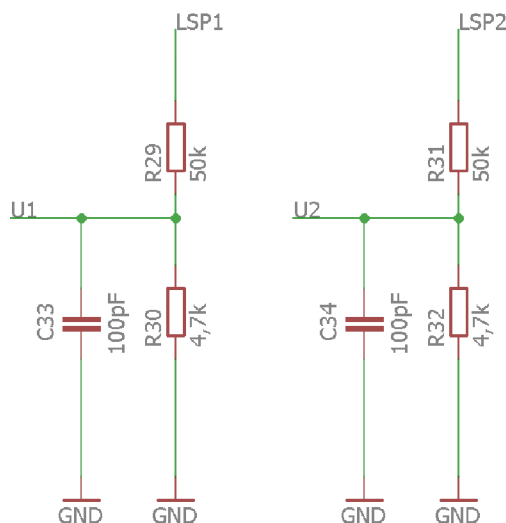
Samotný mikroprocesor STM32F103RBT6 má za úkol ovládat spínání H-můstku a to tak že vysílá příkazy ve formě logických úrovní „L“ (vypnuto) nebo „H“ (sepnuto) na vstup INTOP a INBOTTOM obvodů LT1336 po vodičích H1,H2,H3 a H4. Na základě určité kombinace vstupních úrovní viz Tab. 2.2. dochází ke spínání tranzistorů v H-můstku, s tím že výstup TGATEDR řídí horní tranzistor (T2 a T4) a BGATEDR řídí spodní tranzistor (T3 a T5).

Tab. 2.2. Vstupní logické úrovně a spínací úrovně tranzistorů

INTOP	INBOTTOM	TGATEDR	BGATEDR
L	L	L	L
L	H	L	H
H	L	H	L
H	H	L	L

Dalším úkolem mikroprocesoru je pomocí vnitřních AD převodníků měřit napětí a proud na vstupech elektromotoru. Napětí je měřeno na vstupech LSP1 a LSP2 s využitím odporového děliče viz Obr. 2.11. připojeného na vstupy mikroprocesoru. Dělicí poměr je nastavený, na základě doporučení výrobce tak, aby při maximálním možném napětí 36 V, které by se mohlo na elektromotoru objevit, nedošlo k poškození vstupu ADC převodníku a toto napětí by ještě bylo možné změřit. Napětí na děliči, se zvolenou rezervou 1 V vypočítané podle vztahu (2.15) při 37 V je toto napětí 3.179 V. Při 28 V je pak na děliči 2.405 V.

$$U_D = U \cdot \frac{R_{30}}{R_{30} + R_{29}} = 37 \cdot \frac{4.7 \cdot 10^3}{4.7 \cdot 10^3 + 50 \cdot 10^3} = 3.179V, \quad (2.15)$$

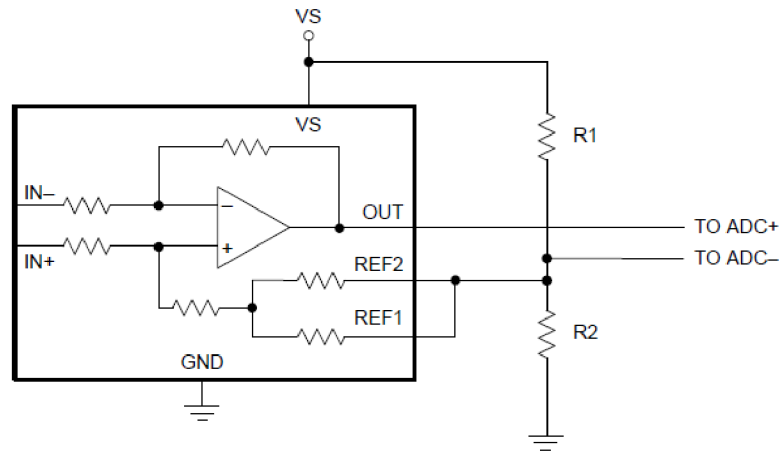


Obr. 2.11. Odporový dělič pro měření napětí na elektromotoru.

Měření proudu neprovádí přímo mikroprocesor, ale dvojice obvodů INA240A2 od firmy Texas Instruments. Obvod INA240 je proud snímající zesilovač. Je schopný měřit proud na zátěži v rozsazích napětí -4 V až +80 V. Maximální chyba měření udávaná výrobcem je 0.20 % z měřené hodnoty. Výhodou tohoto obvodu je malý odběr proudu a tolerance vstupního napětí od 2.7 V do 5.5 V. Pro přesné měření je důležitá co největší stabilita tohoto napětí, dále je možné zajistit přesnost měření volbou vhodného zapojení. Zapojení použité v navrhovaném přípravku je zobrazeno na Obr. 2.12., vychází z doporučení výrobce, pokud není použito napájení obvodu z referenčního zdroje napětí. Dělič R1, R2 na výstupu má zabezpečuje referenční napětí pro ADC převodník

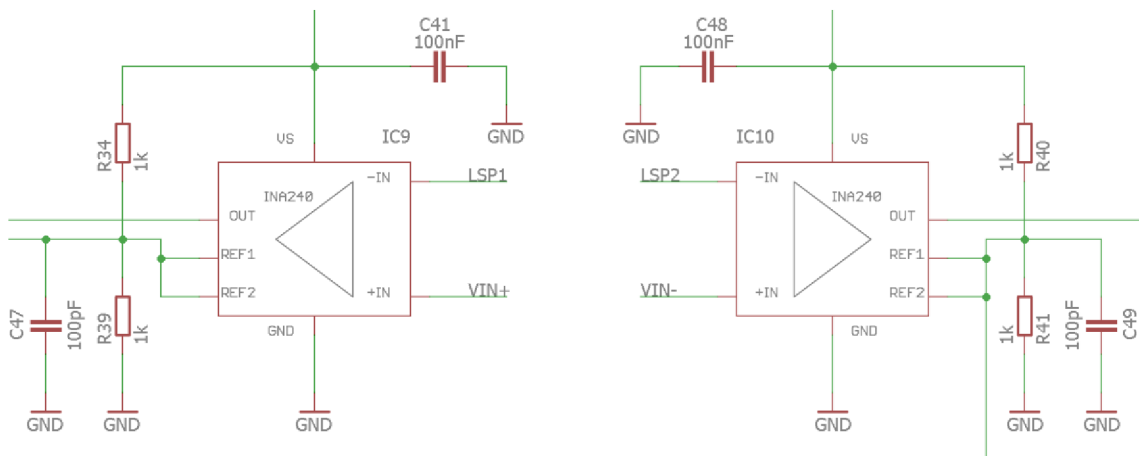


mikroprocesoru.



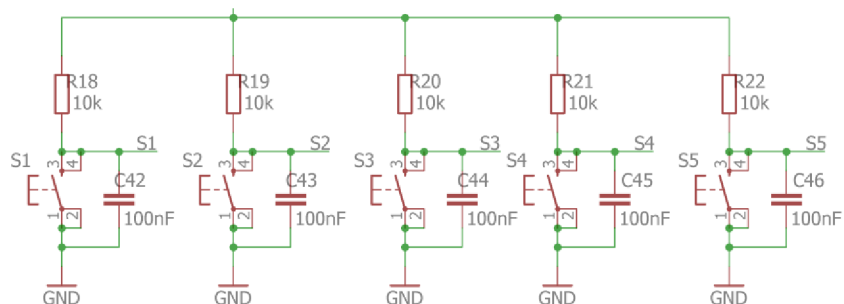
Obr. 2.12. Vnitřní zapojení obvodu INA240 a odporový dělič R1, R2 sloužící pro nastavení referenčního napětí [9].

Obvody INA240 měří úbytek napětí na odporech R17 a R42 pomocí operačního zesilovače se ziskem 50 (v závislosti na použité řadě obvodu). Výstup zesilovače OUT je přiveden na ADC převodník uvnitř mikroprocesoru, který provede přepoččet napětí na proud. Zvolené zapojení na Obr. 2.13. umožňuje bipolární snímání proudu elektromotorem. Zapojení je opatřeno napěťovými děliči tvořenými odpory R34, R39 a R40, R41 doplněným o kondenzátory C47 a C49.



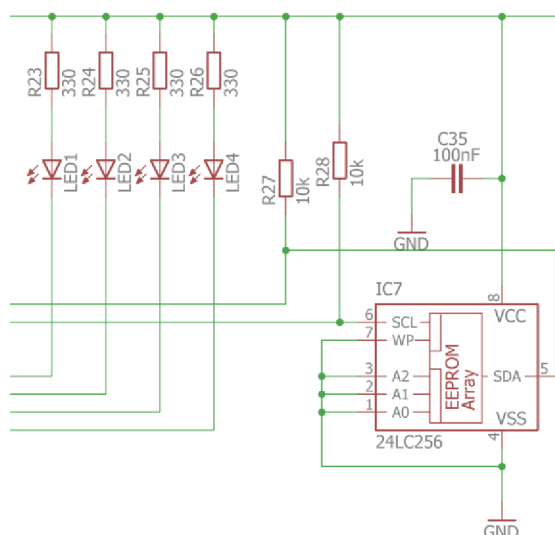
Obr. 2.13. Zapojení snímačů proudu INA240 s korekcí chyby způsobené kolísáním napájecího napětí.

K mikroprocesoru je také připojeno pět tlačítek. Ty budou využity v průběhu testování přípravku ke spuštění různých režimů elektromotoru jako například k otáčení vlevo a vpravo nebo také ke spuštění testu kdy bude elektromotor vykonávat sérii pracovních cyklů. To bude zejména důležité při různých provozních testech navrhovaného zařízení.



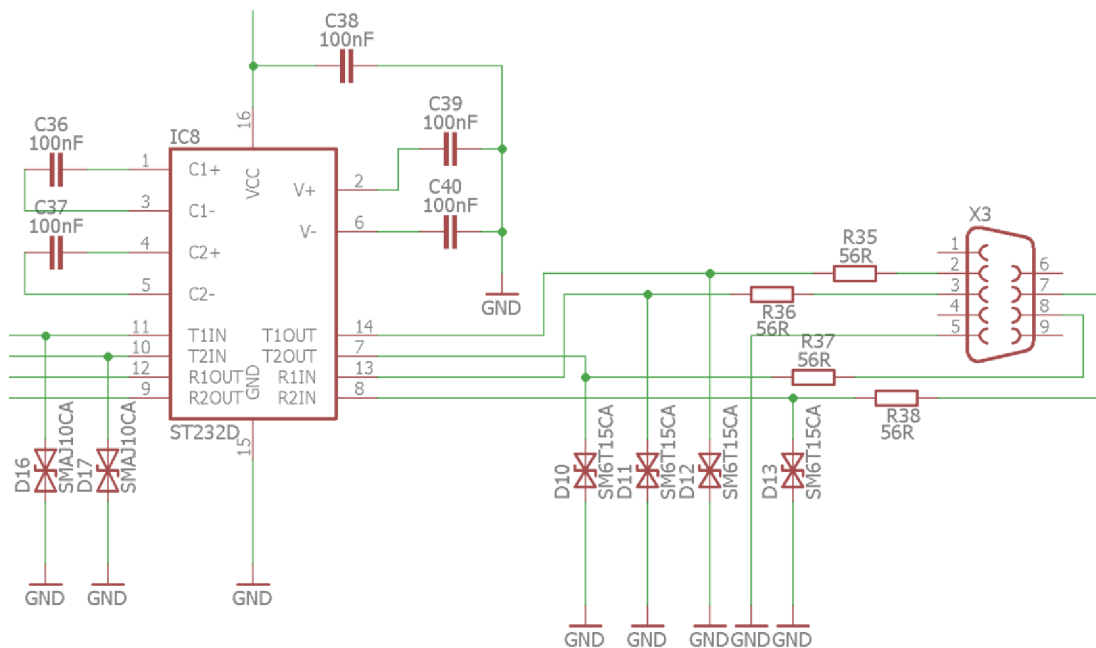
Obr. 2.14. Ovládací tlačítka.

Jako indikační prvek jsou použity čtyři LED diody. Ty budou sloužit ke kontrole stavu přípravku a chodu elektromotoru. K mikroprocesoru je též připojena externí EEPROM paměť 24LC256-I/SN firmy Microchip o velikosti 256 Kbit rozšiřující interní paměť mikroprocesoru.



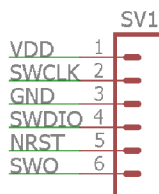
Obr. 2.15. Indikační LED diody a externí paměť EEPROM

Jako poslední prvek je připojeno komunikační rozhraní RS232 s obvodem od firmy STMicroelectronics ST3232BDR sloužící ke komunikaci s mikroprocesorem. Jako ochrana vstupu rozhraní proti napěťovým špičkám, slouží transily SM6T15CA, které mají typickou kapacitu přechodu zhruba 300pF. Dále je navíc výstup mikroprocesoru TX a RTS opatřen ochrannými transily SM6T10CA s typickou kapacitou přechodu 500pF. Maximální přípustné napětí na vstupu R1IN a R2IN obvodu ST3232BDR je  $\pm 25$  V, zamezení překročení tohoto napětí zabezpečují právě transily SM6T15CA.



Obr. 2.16. Zapojení komunikačního rozhraní RS232

Pro komunikaci mikroprocesoru s programovacím rozhraním slouží řada pinů SV1, na kterou jsou vyvedeny všechny potřebné komunikační a napájecí vývody mikroprocesoru. Ty umožňují sériové programování neboli SWD.



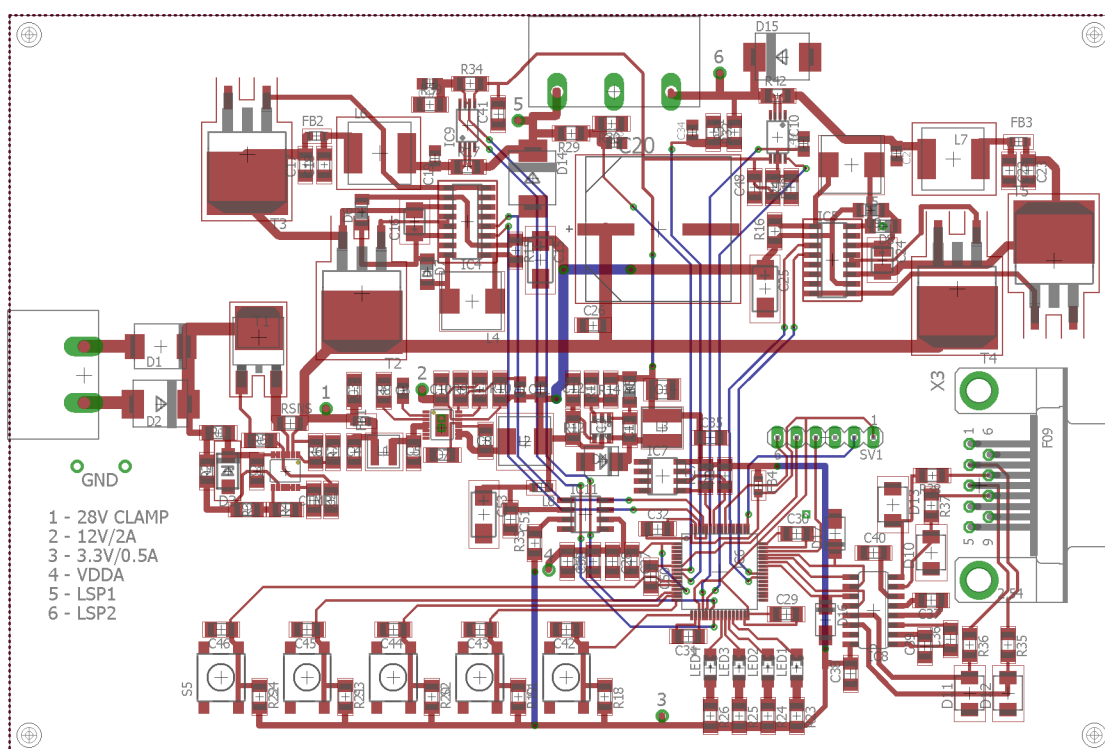
Obr. 2.17. Komunikační rozhraní SWD.

## 3 REALIZACE NÁVRHU BUDIČE

Tato kapitola se věnuje samotnému sestavení budiče a vytvoření softwaru pro jeho řízení. Jádrem budiče je mikroprocesor STM32F103RBT6, který ovládá výkonovou část budiče elektromotoru. Při programování řídicího mikroprocesoru bylo využito prostředí STM32CubeMX pro fyzické nastavení periférií a program Keil uVision5, jako kompilátor výsledného kódu.

### 3.1 Návrh DPS budiče

Po kontrole správnosti navrhovaného budiče bylo možné na základě navrženého schématu zapojení vytvořit schéma DPS samotného budiče. Tento návrh byl vytvářen v programu EAGLE 7.6.0.



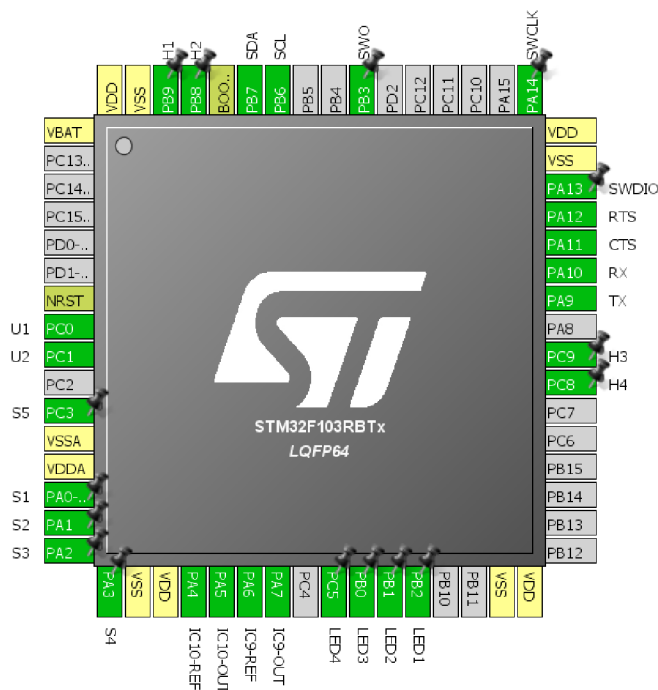
Obr. 3.1. Schéma DPS budiče elektromotoru.

Deska je navrhována jako testovací a vývojová. Je opatřena čtyřmi indikačními LED diodami a pěti tlačítky pro ovládání naprogramovaných funkcí motoru. Dále je vybavena konektorem DSUB-9 pro rozhraní RS232, které slouží ke komunikaci s mikroprocesorem. Na místech důležitých pro měření navrženého zapojení jsou vyvedeny měřicí piny 1 až 6.

### 3.2 Ovládací software pro budič elektromotoru

Jádrem budiče elektromotoru je mikroprocesor od firmy STMicroelectronics

architektury typu ARM. Pro jeho programování bylo použito prostředí STM32CubeMX, které generuje kostru samotného programu. Výhodou tohoto programu je snadné nastavení potřebných vstupů a výstupů pomocí jednoduchého grafického návrhu. A dále snadné nastavení potřebných periférií jako ADC převodníku, rozhraní RS232, I2C a způsobu komunikace mikroprocesoru s programovacím rozhraním.

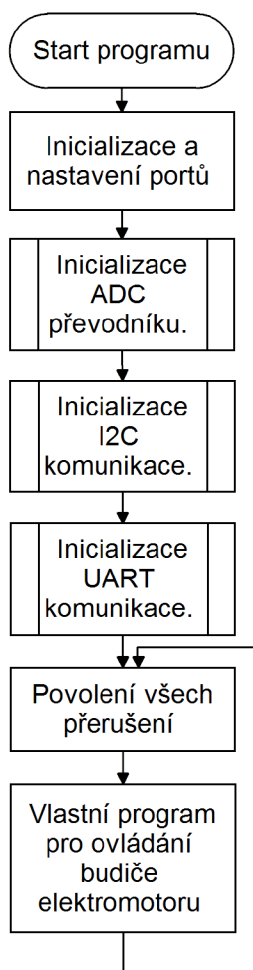


Obr. 3.2. Nastavení periférií v prostředí STM32CubeMX.

Výstupem programu STM32CubeMX je kostra programu, do které je nutné doplnit uživatelskou část kódu. S takto vygenerovanou kostrou pracuje program Keil uVision5. Tento program slouží i k samotné kompilaci programu pro mikroprocesor. Výhodou tohoto programovacího nástroje je přesné definování částí uživatelského kódu respektive částí, kam je uživatelský kód vkládán.

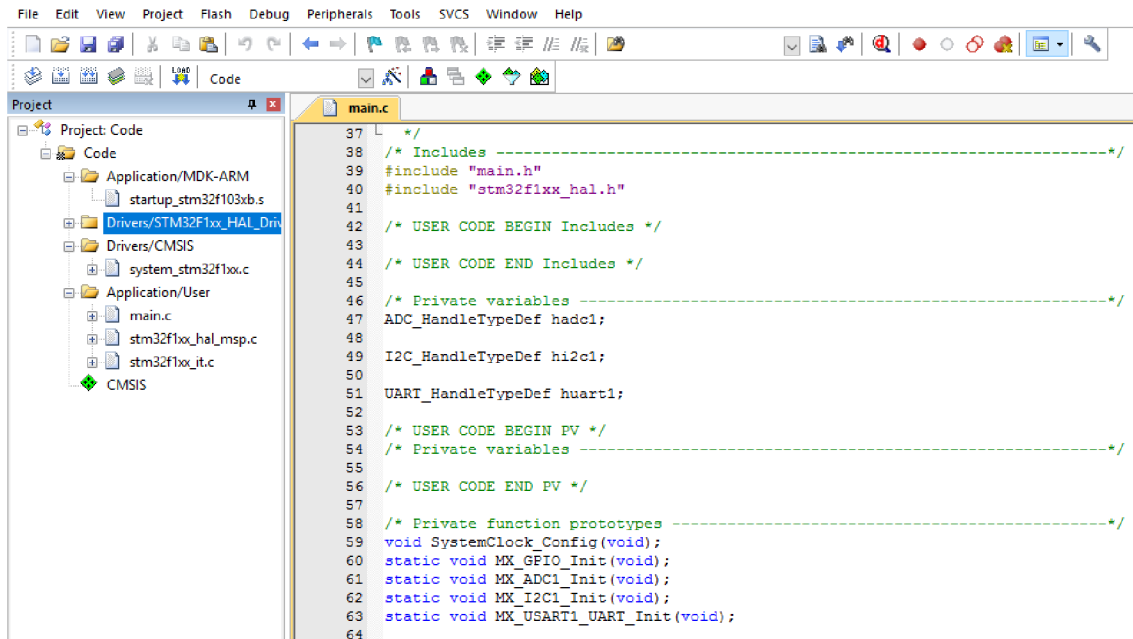
### 3.3 Popis funkcí budiče elektromotoru

Pro účely testování přípravku byl vytvořen jednoduchý program, který umožňuje ovládat elektromotor pomocí tlačítek. Ten má simulovat reálnou činnost přípravku v součinnosti s elektromotorem. Obslužný program je vytvořen v programovacím prostředí Keil uVision5, který pracuje se základní kostrou vytvořenou programem STM32CubeMX.



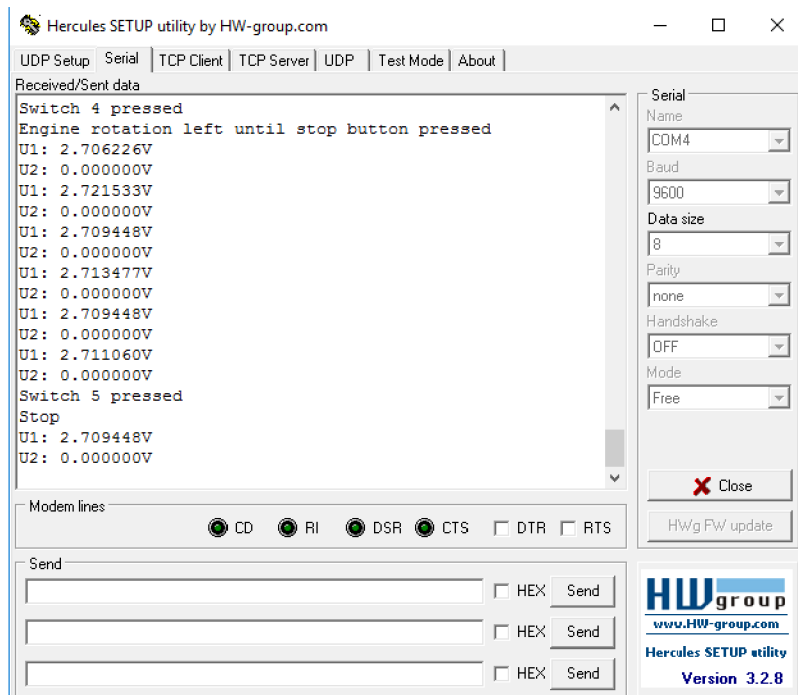
Obr. 3.3. Vývojový diagram hlavního programu.

Přípravek budiče elektromotoru může měřit napětí a proud připojeným elektromotorem. Údaje o změřených hodnotách je možné zobrazit přes rozhraní RS232, nebo je uložit do přídavně paměti EEPROM. Díky pěti tlačítkům připojených k řídicímu mikroprocesoru je možné simulovat potřebné režimy chodu elektromotoru, nebo ovládat další naprogramované funkce jako například zahájení komunikace na rozhraní RS232 či ukládání změřených hodnot do paměti. Přípravek je také opatřen čtyřmi LED diodami, které slouží k indikaci stavů definovaných v obslužném programu. Může jít například o signalizaci směru chodu elektromotoru, průběh komunikace na rozhraní RS232 nebo závadu na elektromotoru.



Obr. 3.4. Programovací prostředí Keil uVision5.

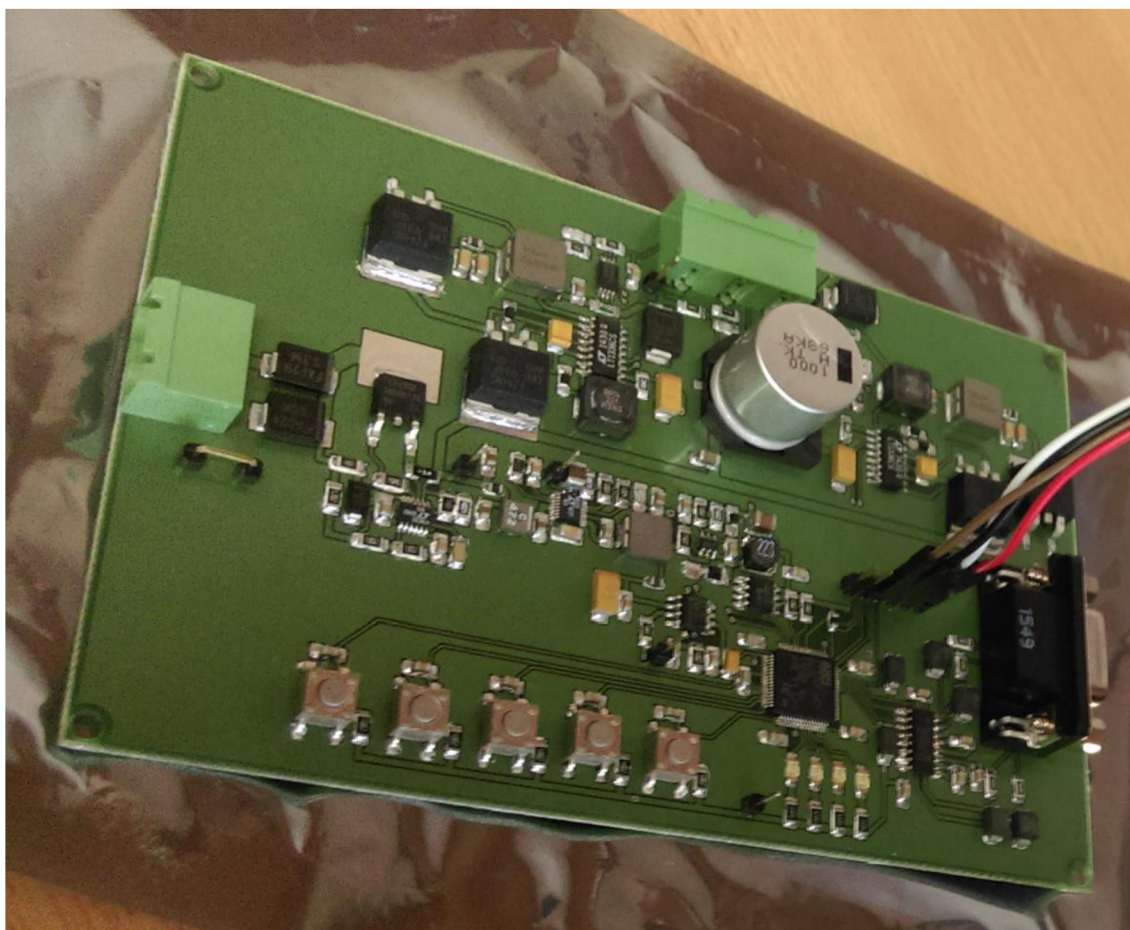
Díky přehlednému programovacímu prostředí Keil uVision5 je možná snadná úprava programu ovládající budič elektromotoru. Hlavním cílem programové části návrhu budiče, byla možnost měření napětí a proudů elektromotorem a vysílání údajů o těchto veličinách pomocí rozhraní RS232. Na Obr. 3.5. je zobrazena komunikace mezi přípravkem a terminálem. Přípravek budiče elektromotoru vysílá stavy elektromotoru a měřené hodnoty napětí.



Obr. 3.5. Ukázka komunikace přípravku budiče elektromotoru přes rozhraní RS232.



Programování řídicího mikroprocesoru přípravku budiče elektromotor je prováděno pomocí programovacího rozhraní SWD. Komunikace SWD probíhá sériovým způsobem. Aby byla zajištěna zvýšená bezpečnost přenosu, tak se ve vysílaném řetězci bitů vysílá Start bit, Parity bit i Stop bit. Komunikace probíhá pomocí čtení a zápisů do registrů v ARM jádře. Každá komunikace je uvedena hlavičkou, která se následně potvrdí ze strany ARM a pak komunikace pokračuje buď vysíláním ze strany debuggeru, pokud se zapisuje do registru, nebo vysíláním ze stranu ARM, pokud se jedná o čtení z registru.



Obr. 3.6. Hotový přípravek se zapojeným programovacím rozhraním SWD.



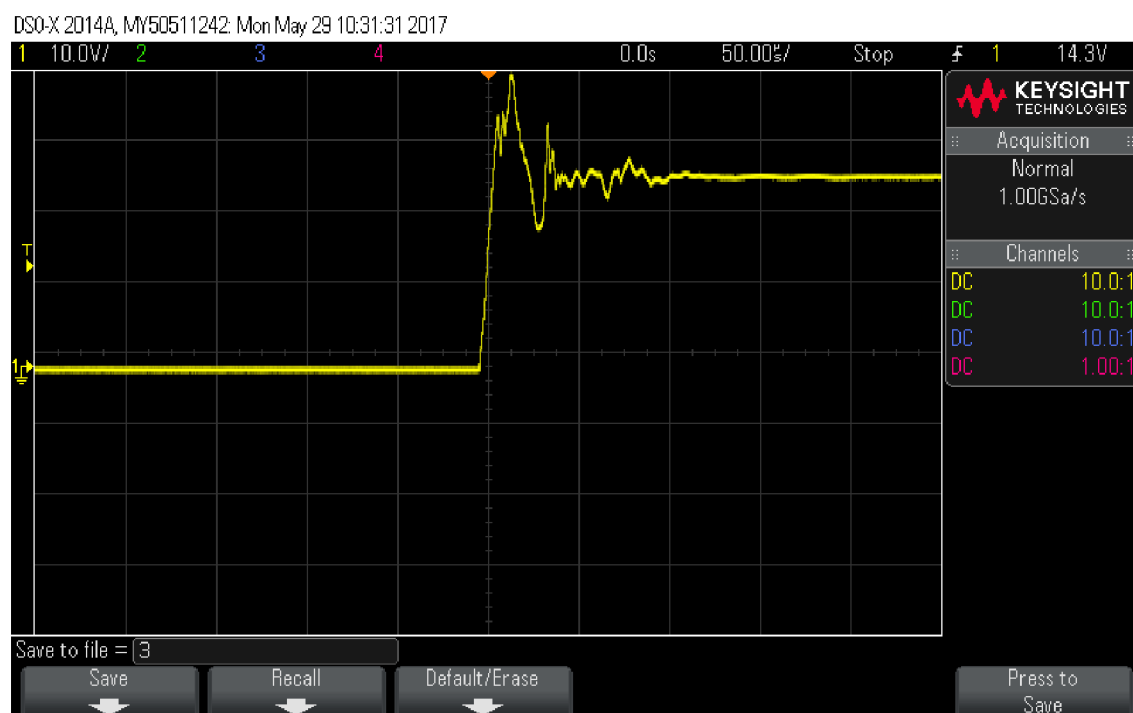
## 4 OŽIVENÍ ZAPOJENÍ A MĚŘENÍ NA BUDIČI ELEKTROMOTORU

Navržený přípravek budiče elektromotoru pro letecké aplikace byl vyroben dle schémat a návrhů desky plošných spojů, které jsou v přílohách této práce. Schémata a DPS byla vytvořena v programu EAGLE ve verzi 7.6.0. Plošný spoj je navržen pro dvouvrstvou cuprexitovou desku. Řídící mikroprocesor byl naprogramován přes programovací rozhraní SWD programátorem ST-LINK V2.

### 4.1 Výsledky měření

V následující podkapitole jsou popsány výsledky z měření na oživeném přípravku budiče elektromotoru pro letecké aplikace.

Na Obr. 4.1. je znázorněn průběh náběžné hrany na výstupu H-můstku. Nástupná hrana vykazuje zákmity. Můstek je příliš rychlý (krátká hrana), což vybudí zákmity výstupního filtru a vlastně i odrazy na vedení a vinutí motorku. Řešením tohoto problému by bylo zpomalení náběžné hrany na přijatelnou úroveň, tak aby nevznikaly zákmity při sepnutí H-můstku.



Obr. 4.1. Nástupná hrana výstupního napětí budiče elektromotoru.

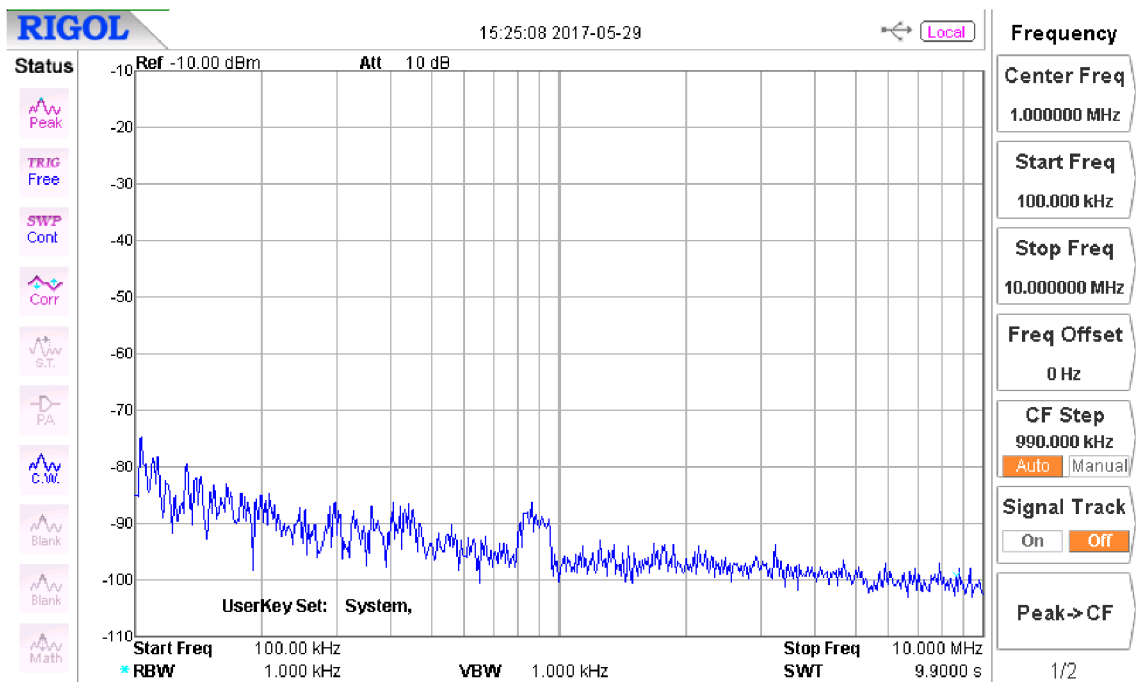
Na Obr. 4.2. je zobrazen průběh sestupné hrany na výstupu H-můstku. Průběh má plynulý přechod ze sepnutého do vypnutého stavu a v tomto případě nevykazuje výstup H-můstku žádné zákmity.

DSO-X 2014A, MY50511242: Mon May 29 10:35:31 2017



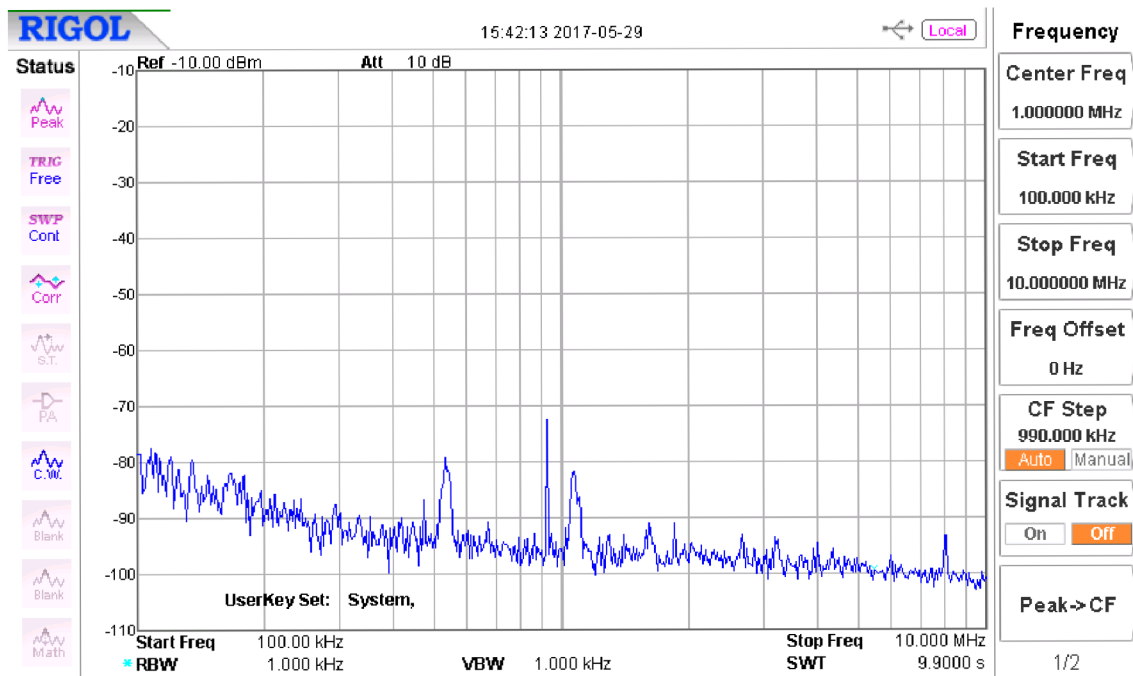
Obr. 4.2. Sestupná hrana výstupního napětí budiče elektromotoru.

Na Obr. 4.3. je zachyceno spektrum vyzařování mikroprocesoru při stavu kdy není buzen H-můstek. Vyzařování samotného mikroprocesoru je zanedbatelné a při porovnání charakteristiky s charakteristikou měřeného pozadí na Obr. 4.5. je vidět pouze slabé vyzařování v pásmu 800 kHz až 950 kHz.



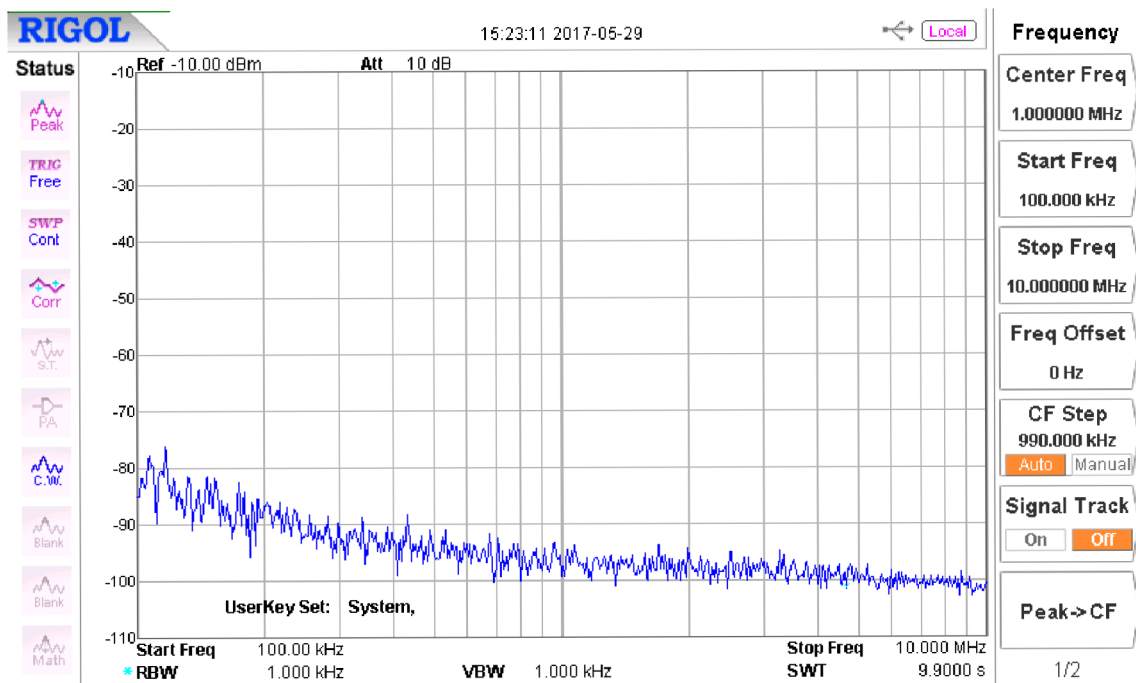
Obr. 4.3. Měření spektra vyzařování mikroprocesoru při nevybuzeném můstku.

Na Obr. 4.4. je zobrazené spektrum vyzařování při vybuzeném H-můstku. Je zřetelné slabé vyzařování. Ve spektru je vidět vliv měniče (bootstrap) ve výkonovém bloku budiče, který slouží ke spínání tranzistorů H-můstku. Nejvýraznější je vyzařování okolo kmitočtů zhruba 550 kHz a 1.1 MHz.



Obr. 4.4. Měření spektra vyzařování při vybuzeném můstku.

Na Obr. 4.5. je zobrazeno spektrum pozadí při vypnutém napájecím zdroji. Jedná se o vedené emise – proud. Údaj je v dBA – decibel nad ampérem,  $-120\text{dBA} = 1\mu\text{A}$ .



Obr. 4.5. Spektrum pozadí při vypnutém napájecím zdroji.

## 5 ZÁVĚR

Výsledkem této bakalářské práce je návrh budiče elektromotoru pro letecké aplikace. Práce je logicky koncipována od stanovení požadavků na budič daných předpisem RTCA/DO-160G až po samotnou realizaci přípravku budiče elektromotoru.

Hlavním cílem projektu bylo navrhnout budič elektromotoru 28V/1A včetně ochranných obvodů, který umožní detekovat stav motoru pomocí měření mikroprocesorem.

Při samotném návrhu bylo nutné počítat s omezeními danými příslušnou leteckou normou. Proto bylo nutné logicky rozdělit návrh do jednotlivých bloků, které na sebe funkčně navazují, ale je možné je snadno modifikovat bez nutnosti zásahů do dalších bloků zařízení. V první řadě bylo nutné zajistit ochranu celého zařízení před zkratem a vlivy nepřímých úderů blesků. Dále bylo nutné zajistit napájení řídicích obvodů a přidavných obvodů budiče. A nakonec navrhnout samotnou výkonovou část budiče pro spínání elektromotoru.

Pro ovládání budiče a měření byl vybrán mikroprocesor s architekturou ARM. Ten má na starosti ovládání budících obvodů spínajících H-můstek, který dále provádí měření napětí a proudu na výstupu přípravku. Informace o měření a stavech budiče je možné zobrazit pomocí rozhraní RS232.

Obslužný program pro ovládání byl vyvinut v programovacím prostředí Keil uVision5 a je možné ho snadno upravit podle potřeb prováděného měření a testování hotového přípravku.

Dle návrhu byl zhotoven a vyzkoušen přípravek budiče elektromotoru. Schémata, návrhy plošných spojů, osazovací plán desky plošných spojů a seznam použitých součástek jsou umístěny v příloze.

Při měření nebyly zjištěny výrazné odchylky od požadovaných parametrů kladených na budič. Výsledky měření jsou popsány v kapitole 4.

Výsledkem práce je funkční řešení hardwaru budiče elektromotoru a software pro mikroprocesor dle zadání bakalářské práce.

# LITERATURA

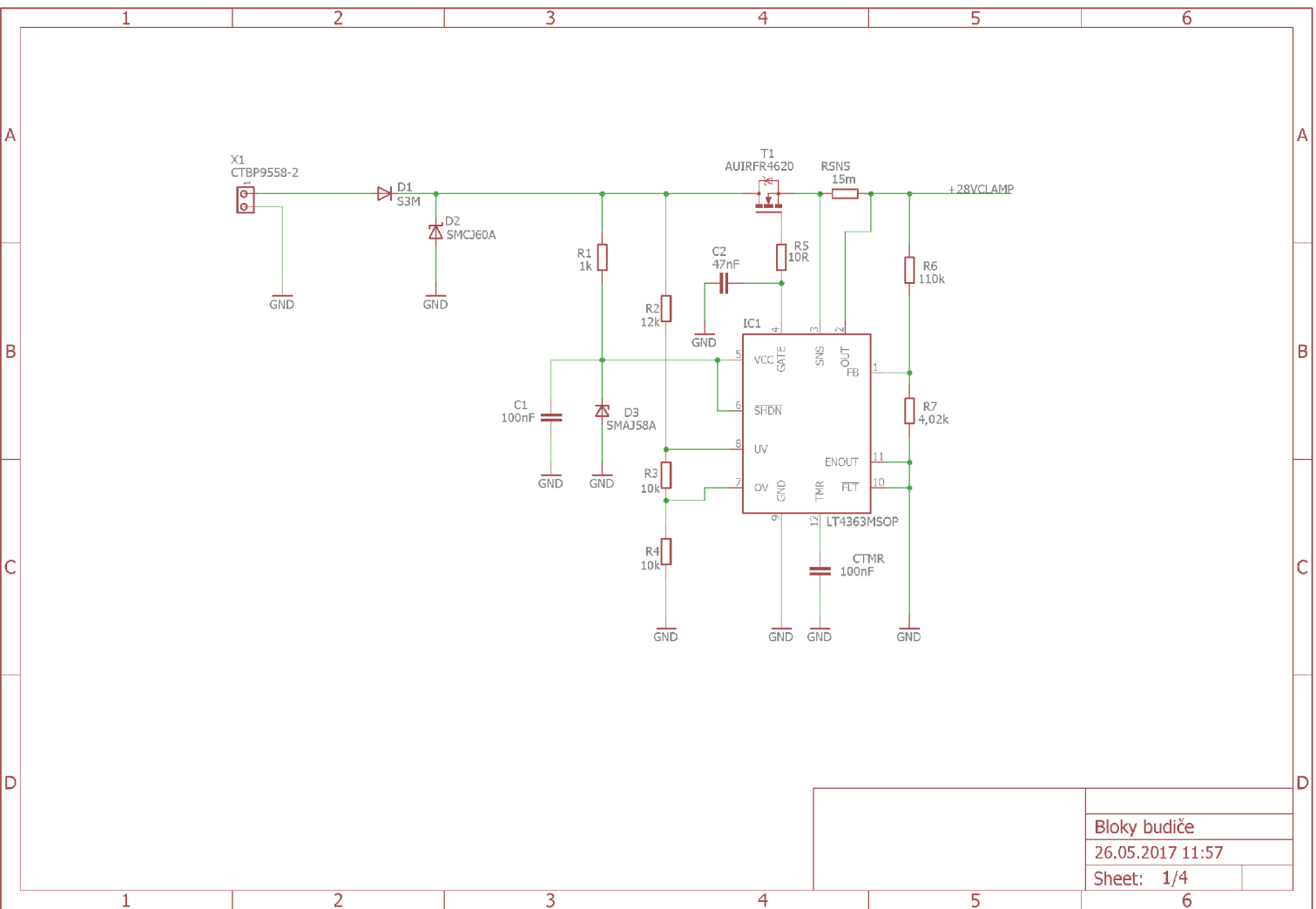
- [1] RTCA DO-160G. Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment. 1. Washington, DC: RTCA, Inc., 2010.
- [2] HOROWITZ, P., HILL, W. The Art of Electronics. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2015.
- [3] LT4363 - High Voltage Surge Stopper with Current Limit [online]. In: 2011, s. 24 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/4363fb.pdf>
- [4] LIGHTNING PROTECTION FOR AIRCRAFT ELECTRICAL POWER AND DATA COMMUNICATION SYSTEMS [online]. In: 2006, s. 20 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: [http://www.microsemi.com/document-portal/doc\\_view/14682-lightning-protection-for-aircraft-electrical-systems](http://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/14682-lightning-protection-for-aircraft-electrical-systems)
- [5] LT1933 - 600mA, 500kHz Step-Down Switching Regulator in SOT-23 [online]. In: 2007, s. 20 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1933fe.pdf>
- [6] LT8620 - 65V, 2A Synchronous Step-Down Regulator with 2.5 $\mu$ A Quiescent Current [online]. In: 2016, s. 26 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/8620fa.pdf>
- [7] LT1336 - Half-Bridge N-Channel Power MOSFET Driver with Boost Regulator [online]. In: 1996, s. 20 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1336fa.pdf>
- [8] 256K I2C™ CMOS Serial EEPROM [online]. In: 2013, s. 42 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20001203U.pdf>
- [9] INA240 High- and Low-Side, Bidirectional, Zero-Drift, Current-Sense Amplifier with Enhanced PWM Rejection [online]. In: 2016, s. 35 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina240.pdf>
- [10] 3 to 5.5 V, low-power, up to 400 kbs RS-232 drivers and receivers [online]. In: 2016, s. 20 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/group1/40/2c/7f/62/3a/3f/47/3c/CD00002253/files/CD00002253.pdf/jcr:content/translations/en.CD00002253.pdf>
- [11] Medium-density performance line ARM®-based 32-bit MCU with 64 or 128 KB Flash, USB, CAN, 7 timers, 2 ADCs, 9 com. interfaces [online]. In: 2015, s. 117 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/33/d4/6f/1d/df/0b/4c/6d/CD00161566.pdf/files/CD00161566.pdf/jcr:content/translations/en.CD00161566.pdf>

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

ADC	Analog-to-digital converter, Analogově digitální převodník,
APB	Advanced Peripheral Bus, sběrnice sdružující ostatní periferie,
ARM	Advanced RISC Machine,
CAN	Controller Area Network, sběrnice,
DC	Direct current, stejnosměrný proud,
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory, elektricky mazatelná paměť typu ROM,
EMI	Electromagnetic interference, elektromagnetické rušení,
I2C	Inter-Integrated Circuit, multi-masterová počítačová sériová sběrnice,
LED	Light-Emitting Diode, dioda emitující světlo,
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor,
PWM	Pulse Width Modulation, Pulzně šířková modulace,
RISC	Reduced Instruction Set Computing, procesor s redukovanou instrukční sadou,
rms	Root mean square, efektivní hodnota napětí nebo proudu,
RTS	Request to Send, požadavek na vysílání,
SPI	Serial Peripheral Interface, sériové periferní rozhraní,
SRAM	Static Random Access Memory, statická paměť,
SWD	Serial Wire Debug, sériové programovací rozhraní,
TVS	Transient Voltage Suppressor,
TX	transit, odeslat,
USART	Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter, Synchronní / asynchronní sériové rozhraní,
USB	Universal Serial Bus, univerzální sériová sběrnice,
VF	Vysokofrekvenční,

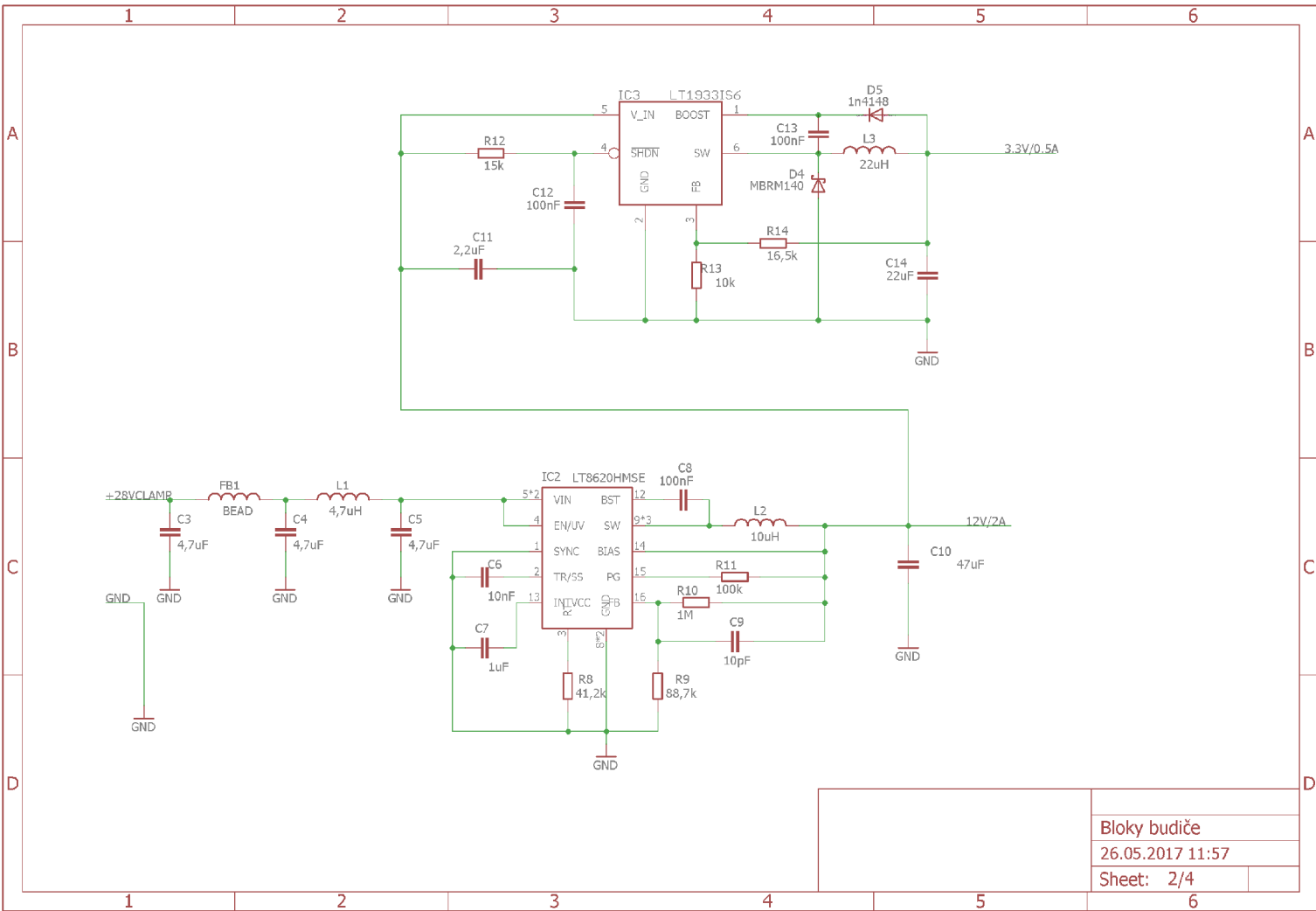
# A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

## A.1 Blok ochrany

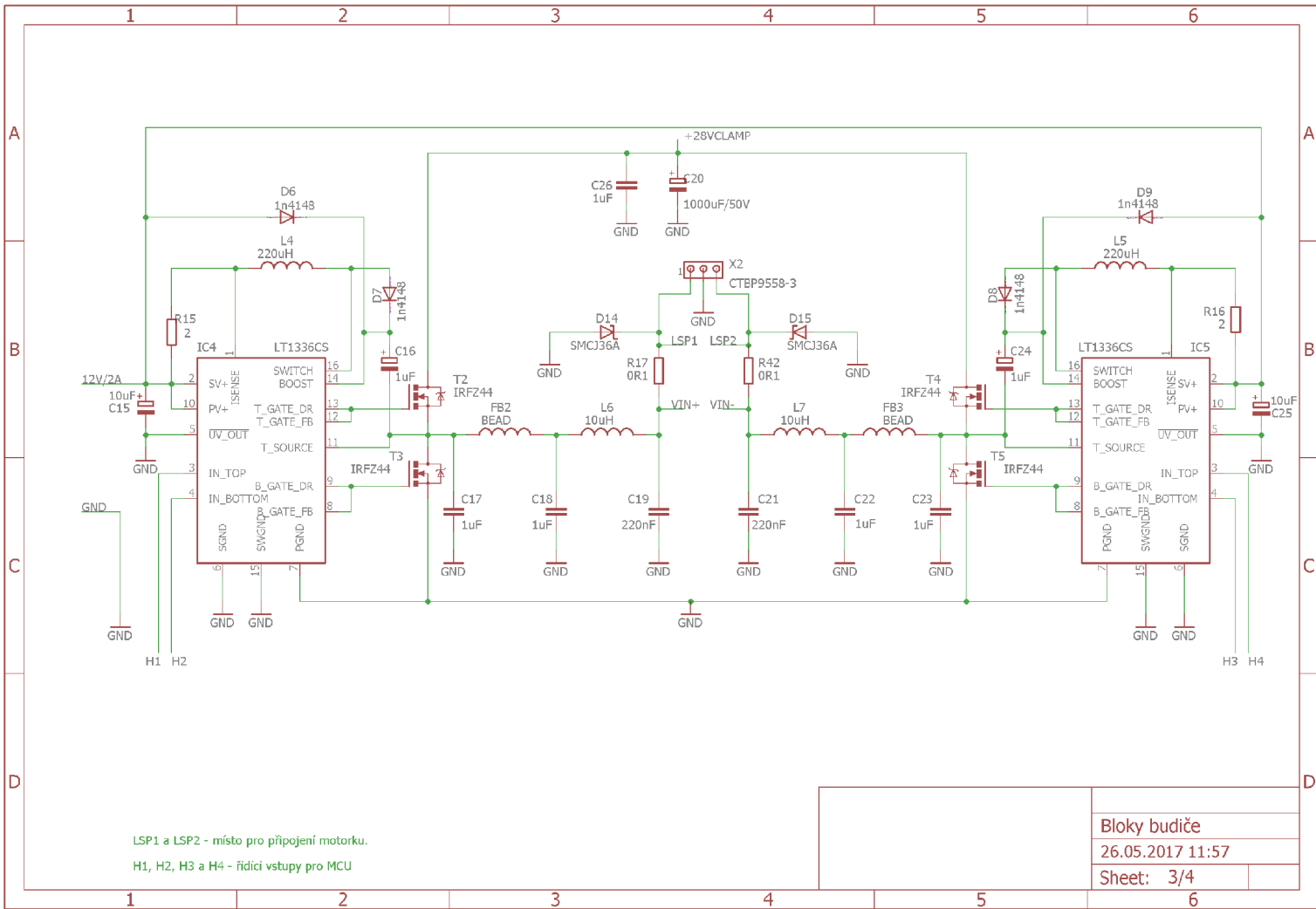




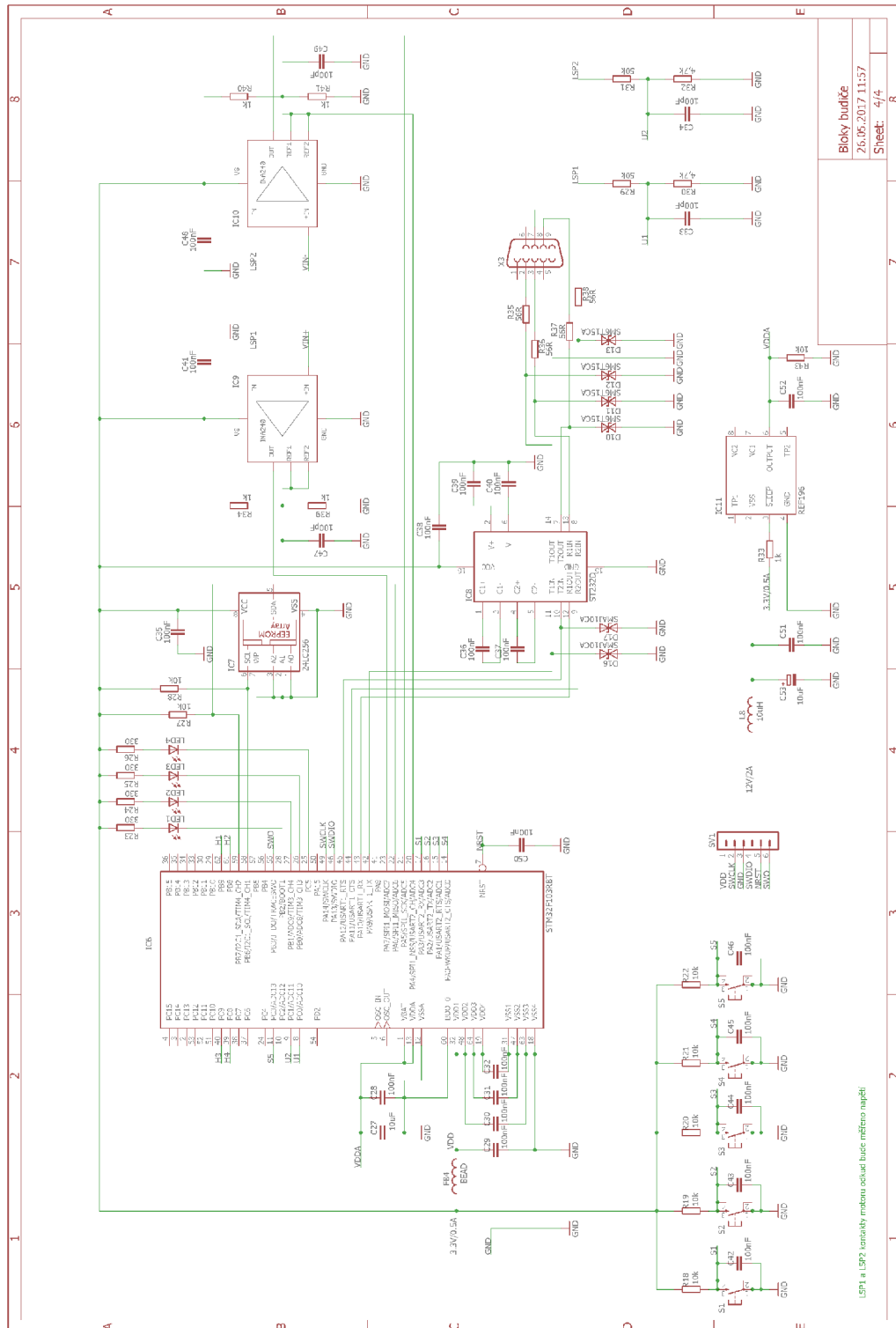
## A.2 Blok napájení



### A.3 Blok výkonové části motoru

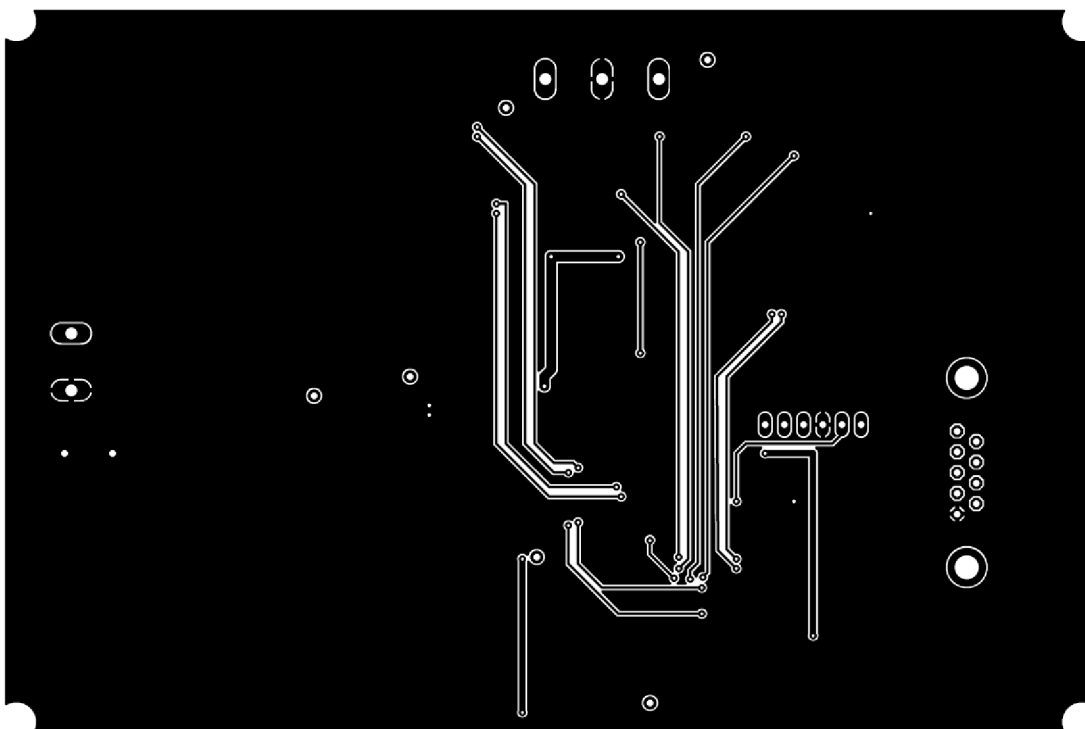
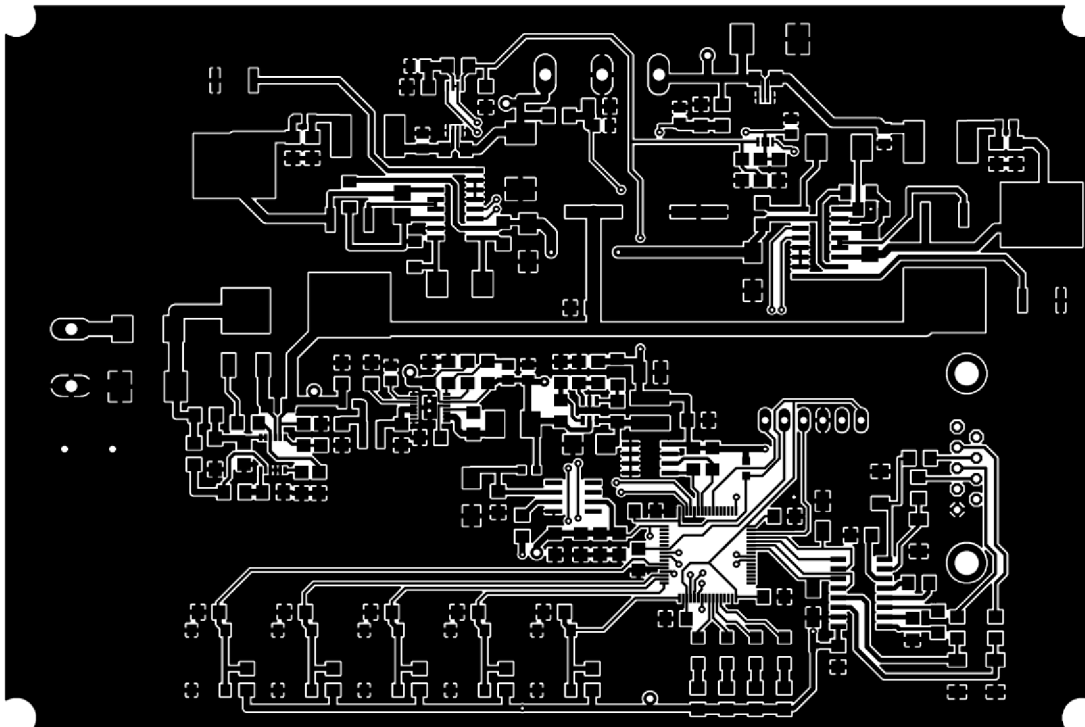


# A.4 Blok řízení motoru

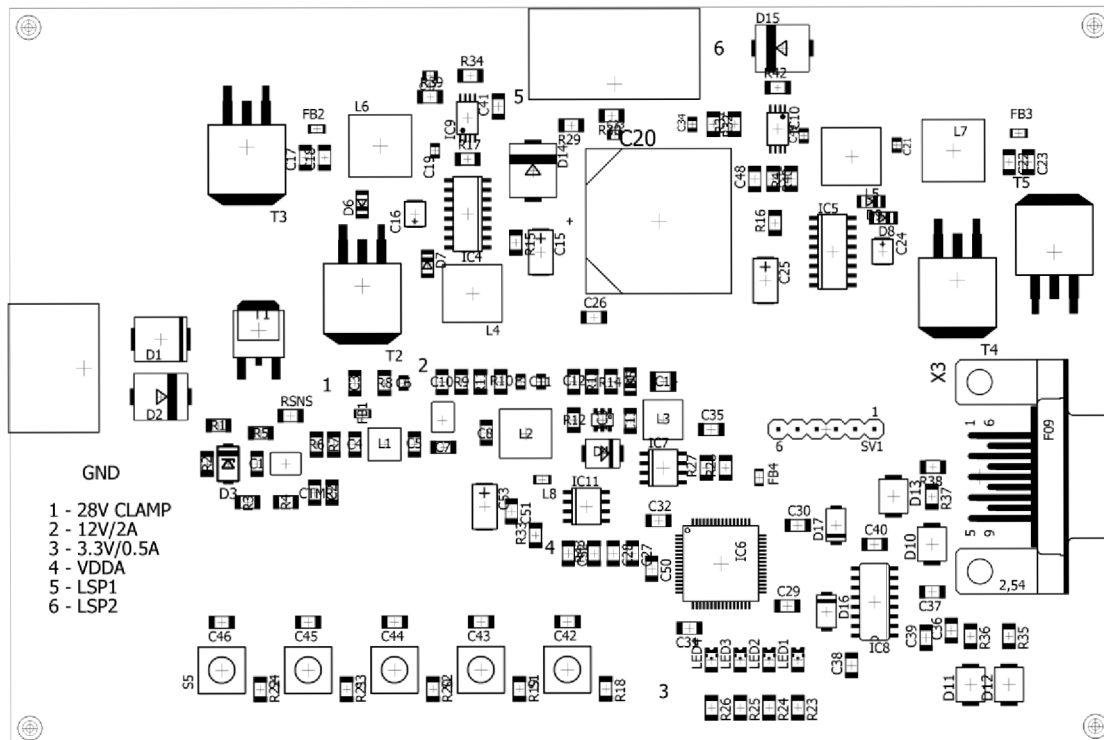


LS1 a LS2 kontakty motoru osadit buďe měřeno najetí

## B NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ BUDIČE ELEKTROMOTORU



# C OSAZOVACÍ PLÁN DPS BUDIČE ELEKTROMOTORU



## D SEZNAM SOUČÁSTEK

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
IC1	LT4363HMS-2	MSOP-12	Hot Swap Kontrolé
IC2	LT8620HMSE	MSOP-16	DC-DC Spínaný Buck Step Down Regulátor
IC3	LT1933IS6	TSOT-23-6	DC-DC Spínaný Buck Step Down Regulátor
IC4	LT1336CS	SOIC-16	Dvojitý budič MOSFETu
IC5	LT1336CS	SOIC-16	Dvojitý budič MOSFETu
IC6	STM32F103RBT6	LQFP-64	Mikroprocesor
IC7	24LC256-I/SN	SOIC-8	Paměť EEPROM
IC8	ST3232BDR	SOIC-16	Linkový Přijímač RS232
IC9	INA240A2PWR	TSSOP-8	Proud Snímající Zesilovač
IC10	INA240A2PWR	TSSOP-8	Proud Snímající Zesilovač
IC11	REF196GSZ	NSOIC-8	Napěťová Reference
SW1	FSM2JSMLTR	SMD	Taktilní Spínač
SW2	FSM2JSMLTR	SMD	Taktilní Spínač
SW3	FSM2JSMLTR	SMD	Taktilní Spínač
SW4	FSM2JSMLTR	SMD	Taktilní Spínač
SW5	FSM2JSMLTR	SMD	Taktilní Spínač
D1	S3M	DO-214AB	Výkonová Dioda
D2	SMCJ60A	DO-214AB	Transil
D3	SMAJ58A	DO-214AC	Transil
D4	MBRM140T1G	DO-216AA	Schottkyho Usměrňovač
D5	1N4148WS	SOD-323	Malá Signálová Dioda
D6	1N4148WS	SOD-323	Malá Signálová Dioda
D7	1N4148WS	SOD-323	Malá Signálová Dioda
D8	1N4148WS	SOD-323	Malá Signálová Dioda
D9	1N4148WS	SOD-323	Malá Signálová Dioda
D10	SM6T15CA	DO-214AA	Transil
D11	SM6T15CA	DO-214AA	Transil
D12	SM6T15CA	DO-214AA	Transil
D13	SM6T15CA	DO-214AA	Transil
D14	SMCJ36A	DO-214AB	Transil
D15	SMCJ36A	DO-214AB	Transil
D16	SMA6J10CA	DO-214AC	Transil
D17	SMA6J10CA	DO-214AC	Transil
LED1	KPT-3216EC	SMD	Červená LED dioda
LED2	KPT-3216EC	SMD	Červená LED dioda
LED3	KPT-3216EC	SMD	Červená LED dioda
LED4	KPT-3216EC	SMD	Červená LED dioda
T1	AUIRFR4620	TO-252AA	MOSFET Tranzistor

T2	IRFZ44NSPBF	TO-263	MOSFET Tranzistor
T3	IRFZ44NSPBF	TO-263	MOSFET Tranzistor
T4	IRFZ44NSPBF	TO-263	MOSFET Tranzistor
T5	IRFZ44NSPBF	TO-263	MOSFET Tranzistor
FB1	-	0805	Ferrite Bead
FB2	-	0805	Ferrite Bead
FB3	-	0805	Ferrite Bead
FB4	-	0805	Ferrite Bead
L1	4,7 $\mu$ H	-	Výkonový Induktor pro Povrchovou Montáž
L2	10 $\mu$ H	-	Výkonový Induktor pro Povrchovou Montáž
L3	22 $\mu$ H	-	Výkonový Induktor pro Povrchovou Montáž
L4	220 $\mu$ H	-	Radiální cívka
L5	220 $\mu$ H	-	Radiální cívka
L6	10 $\mu$ H	-	Výkonová tlumivka
L7	10 $\mu$ H	-	Výkonová tlumivka
L8	10 $\mu$ H	0805	Vysokofrekvenční Induktor
R1	1k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R2	12k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R3	10k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R4	10k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R5	10 $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R6	110k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R7	4,02k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R8	41,2k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R9	88,7k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R10	1M $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R11	100k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R12	15k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R13	10k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R14	16,5k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R15	2 $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R16	2 $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R17	100m $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R18	10k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R19	10k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R20	10k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R21	10k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R22	10k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R23	330 $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R24	330 $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R25	330 $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R26	330 $\Omega$	R1206	SMD rezistor

R27	10k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R28	10k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R29	50k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R30	4,7k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R31	50k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R32	4,7k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R33	1k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R34	1k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R35	56 $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R36	56 $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R37	56 $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R38	56 $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R39	1k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R40	1k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R41	1k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R42	100m $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R43	10k $\Omega$	R1206	SMD rezistor
R <sub>SNS</sub>	15m $\Omega$	R1206	SMD rezistor
C1	100nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C2	47nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C3	4,7 $\mu$ F	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C4	4,7 $\mu$ F	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C5	4,7 $\mu$ F	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C6	10nF	0805	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C7	1 $\mu$ F	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C8	100nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C9	10pF	0805	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C10	47 $\mu$ F	1210	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C11	2,2 $\mu$ F	0805	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C12	100nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C13	100nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C14	22 $\mu$ F	1210	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C15	10 $\mu$ F	2312	Tantalový kondenzátor
C16	1 $\mu$ F	1411	Tantalový kondenzátor
C17	1 $\mu$ F	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C18	1 $\mu$ F	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C19	220nF	0805	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C20	1000 $\mu$ F	-	Elektrolytický kondenzátor
C21	220nF	0805	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C22	1 $\mu$ F	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C23	1 $\mu$ F	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C24	1 $\mu$ F	1411	Tantalový kondenzátor
C25	10 $\mu$ F	2312	Tantalový kondenzátor
C26	1 $\mu$ F	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C27	10 $\mu$ F	1206	Tantalový kondenzátor



C28	100nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C29	100nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C30	100nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C31	100nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C32	100nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C33	100pF	0805	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C34	100pF	0805	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C35	100nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C36	100nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C37	100nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C38	100nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C39	100nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C40	100nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C41	100nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C42	100nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C43	100nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C44	100nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C45	100nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C46	100nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C47	100pF	0805	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C48	100nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C49	100pF	0805	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C50	100nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C51	100nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C52	100nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
C53	10 $\mu$ F	2312	Tantalový kondenzátor
C54	10 $\mu$ F	1206	Tantalový kondenzátor
C <sub>TMR</sub>	100nF	1206	Vícevrstvý Keramický Kondenzátor
X1	CTBP9558/2	-	Svorkovnice
X2	CTBP9558/3	-	Svorkovnice
X3	DSUB-9	-	D Sub Konektor
SV1	-	-	Konektor Deska-Deska

## E FOTOGRAFIE PŘÍPRAVKU BUDIČE ELEKTROMOTORU

