

Západočeská univerzita v Plzni  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Řídící jednotka pro kvadrotorovou helikoptéru

Plzeň, 2015

Bc. Milan Petržilka

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů.

V Plzni dne 11. května 2015

Bc. Milan Petržilka

## **Anotace**

Práce se zabývá vývojem řídicí jednotky pro kvadrotorovou helikoptéru. První část popisuje princip funkce kvadrotorové helikoptéry. Následuje popis konstrukce vlastního stroje. Třetí část je věnována realizaci funkčního vzorku řídicí jednotky pro řízení autonomního letu včetně BLDC měničů. Čtvrtá část popisuje princip činnosti softwaru. Závěr zhodnocuje finanční náklady na stavbu stroje a možnosti dalšího rozšíření.

## **Klíčová slova**

Kvadrotorová helikoptéra, řídicí jednotka, BLDC motor, BLDC měnič, bezsenzorový.

## **Abstract**

The thesis is focused on flight control unit for a quadrotor helicopter development. The first part describes how the quadrotor helicopter works. The following part describes the construction of the quadrotor helicopter. Third part is dedicated to the construction of flight control unit circuit including BLDC inverters. Next part describes the software functionality. Last part evaluates the construction price and possibility of future improvements.

## **Keywords**

Quadrotor helicopter, control unit, BLDC motor, BLDC inverter, sensorless.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Popis funkce kvadrotorové helikoptéry</b>	<b>2</b>
2.1	Popis letounu . . . . .	2
2.2	Historie . . . . .	2
<b>3</b>	<b>Konstrukce stroje</b>	<b>4</b>
3.1	Křížový rám . . . . .	4
3.2	Motory . . . . .	4
3.3	Ostatní komponenty . . . . .	5
3.4	Hmotnostní analýza . . . . .	5
<b>4</b>	<b>Návrh řídicího systému</b>	<b>6</b>
4.1	Požadavky na hardware . . . . .	6
4.1.1	Klimatická odolnost . . . . .	6
4.1.2	Zdroj energie . . . . .	6
4.1.3	Komunikace a ovládání . . . . .	6
4.1.4	Bezpečnost . . . . .	6
4.2	Detailní řešení navrženého řídicího systému . . . . .	6
4.2.1	Definice procesorové platformy . . . . .	6
4.2.2	Definice klíčových komponent . . . . .	7
4.2.3	Blokové schéma zapojení . . . . .	8
4.2.4	Mechanické provedení plošného spoje . . . . .	9
4.2.5	Napájecí zdroje . . . . .	9
4.2.6	Procesor . . . . .	9
4.2.7	Budič BLDC motoru . . . . .	12
4.2.8	Ethernet . . . . .	19
4.2.9	GPS přijmač a magnetometr . . . . .	19
4.2.10	Senzor zrychlení a úhlové rychlosti . . . . .	19
4.3	Výpočet střední doby mezi poruchami . . . . .	21
4.4	Software . . . . .	22
4.4.1	Použití operačního systému reálného času FreeRTOS . . . . .	22
4.4.2	Struktura programu v řídicí jednotce . . . . .	22
4.4.3	Software pro časovač N2HET . . . . .	23
4.4.4	Dálkové řízení . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>27</b>
<b>A</b>	<b>Schéma zapojení jednotky</b>	<b>30</b>



<b>B Plošný spoj</b>	<b>43</b>
<b>C Fotografie</b>	<b>44</b>

# Použité zkratky

BLDC	Brushless DC, bezkartáčový stejnosměrný motor
CAN	Controller area network, automobilová sběrnice
A/D	převodník z analogového signálu na digitální
SPI	Serial peripheral interface, sériová sběrnice
LDO	Low dropout regulator, lineární regulátor napětí s nízkým úbytkem
RPM	Revolutions per minute, otáčky za minutu
I2C	Inter-integrated circuit, sériová sběrnice
PWM	Pulse width modulation, pulzně šířková modulace
GPIO	General purpose input and output, vstupy a výstupy pro všeobecné použití
DC/DC	stejnosměrný měnič napětí
N2HET	High end timer, časovač procesoru
FLASH	nevolatilní paměť s libovolným přístupem
RAM	Random access memory, volatilní paměť s libovolným přístupem
JTAG	Joint test action group, standard definovaný normou IEEE 1149.1
IMU	Inertial measurement unit, inerciální senzorová jednotka
GPS	Global positioning system, globální polohovací systém
FIT	Failures in time, střední doba do poruchy
MTBF	Mean time between failure, střední doba do poruchy

# Seznam obrázků

2.1	Kvadrotorová helikoptéra s označením směru rotace motorů. Zdroj: [1] . . .	2
2.2	Kvadrotorová helikoptéra "flying octopus". Zdroj: [1] . . . . .	3
3.1	BLDC motor AXI 4120/20 GOLD LINE od firmy AXI Model Motors. . . .	5
4.1	Blokové schéma zapojení řídicí jednotky pro kvadrotorovou helikoptéru. . .	8
4.2	Blokové schéma procesoru TMS570LS3137 [4]. . . . .	10
4.3	Konfigurace periferie MibSPI v prostředí HALCoGen. . . . .	11
4.4	Sekvence pro čtení hlavních dat ze senzoru IMU. Zdroj: [7] . . . . .	11
4.5	Typické zapojení integrovaného obvodu A4960. Zdroj: [2] . . . . .	12
4.6	Průběh napětí na gate spodního tranzistoru BLDC měniče během vypínání.	13
4.7	Průběh napětí na gate spodního tranzistoru BLDC měniče během zapínání.	13
4.8	Průběh napětí na bočniku pro měření proudu BLDC motoru o hodnotě 0,0025 Ω při 1400 ot/min. . . . .	15
4.9	Měření celkového proudu zařízení z baterie při zkoušce maximálních otáček BLDC motoru na bočniku v sérii s baterií o hodnotě 0,005 Ω. . . . .	15
4.10	Měření celkového proudu zařízení z baterie při zkoušce maximálních otáček BLDC motoru na bočniku v sérii s baterií o hodnotě 0,005 Ω. . . . .	16
4.11	Napětí na fázi BLDC měniče. . . . .	17
4.12	Graf závislosti tahu na otáčkách motoru. . . . .	18
4.13	Graf závislosti otáček motoru na PWM. . . . .	18
4.14	Plošný spoj s červeně vyznačenými signály rozhraní MII. . . . .	19
4.15	Modul GPS-GLONASS s GPS přijmačem a magnetometrem od firmy PITLAB. 20	
4.16	Senzor ADIS16445 od firmy Analog Devices. Zdroj: [7] . . . . .	20
4.17	Ilustrace běhu procesů v operačním systému reálného času FreeRTOS. . .	22
4.18	Struktura programu v řídicí jednotce. . . . .	23
4.19	Běh programu v časovači N2HET Zdroj: [4]. . . . .	24
4.20	Program FlightControl pro ovládání stroje vytvořený v jazyce C#. . . .	26
A.1	Schéma řídicí jednotky, list 1. . . . .	31
A.2	Schéma řídicí jednotky, list 2. . . . .	32
A.3	Schéma řídicí jednotky, list 3. . . . .	33
A.4	Schéma řídicí jednotky, list 4. . . . .	34
A.5	Schéma řídicí jednotky, list 5. . . . .	35
A.6	Schéma řídicí jednotky, list 6. . . . .	36
A.7	Schéma řídicí jednotky, list 7. . . . .	37
A.8	Schéma řídicí jednotky, list 8. . . . .	38
A.9	Schéma řídicí jednotky, list 9. . . . .	39
A.10	Schéma řídicí jednotky, list 10. . . . .	40
A.11	Schéma řídicí jednotky, list 11. . . . .	41

A.12 Schéma řídicí jednotky, list 12. . . . .	42
B.1 Plošný spoj řídicí jednotky. . . . .	43
C.1 Detail plošného spoje řídicí jednotky pro řízení kvadrotorové helikoptéry, který je umístěný v elektroinstalačním boxu stroje. . . . .	44
C.2 Kvadrotorová helikoptéra připevněná na testovacím stanovišti. . . . .	45
C.3 Kvadrotorová helikoptéra. . . . .	45

# Seznam tabulek

4.1	Tabulka určující počty součástí a parametry FIT. . . . .	21
5.1	Tabulka s finančními náklady. . . . .	27

# 1 Úvod

Cílem této práce je seznámit čtenáře s konstrukcí řídicí jednotky pro kvadrotorovou helikoptéru, která je doprovázena stavbou vlastního stroje.

S rozvíjejícími se elektronickými součástkami jsou multirotory snadno dostupnými a oblíbenými zejména vzhledem k velkému množství využití. Stroj je možno osadit kamerou, s jejíž pomocí lze velmi levně pořizovat letecké záběry ať už pro amatérské, tak pro profesionální využití např. bezpečnostními složkami.

V první kapitole se čtenář dočte o principu činnosti kvadrotorové helikoptéry a o pokusu o její realizaci v historii.

Ve druhé kapitole se čtenář dozví o konstrukci kvadrotorové helikoptéry, zejména o zohotovení křížového rámu, parametrech motorů a váze stroje.

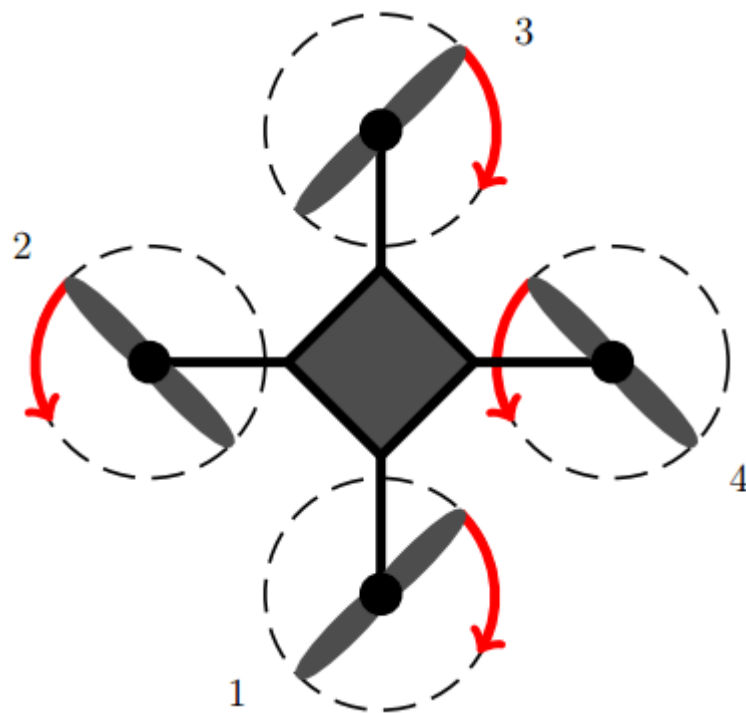
Ve třetí kapitole se čtenář dočte o návrhu řídicího systému. Nejprve bude seznámen se základními požadavky na hardware s ohledem na klimatickou odolnost, zdroj energie a způsob komunikace se strojem. Poté bude následovat definice klíčových komponent řídicí jednotky. Dále bude seznámen s detaily použitého procesoru a s popisem použití BLDC budiče, ethernetového transceiveru a senzorů. Ke konci této kapitoly se čtenář dočte o výpočtu střední doby mezi poruchami řídicí jednotky.

Ve čtvrté kapitole se čtenář dočte o softwaru řídicí jednotky. Bude mu vysvětlen princip činnosti použitého operačního systému a detailní použití pokročilého časovače N2HET. V další části se dozví o softwaru pro ovládání stroje včetně podrobného seznamu přenášených dat.

## 2 Popis funkce kvadrotorové helikoptéry

### 2.1 Popis letounu

Kvadrotorová helikoptéra (nazývána též kvadroptéra či kvadrotor) je druh multirotorové helikoptéry, který je poháněný pomocí čtyř rotorů. Základní stavba kvadrotorové helikoptéry se skládá z křížového rámu a čtyř identických rotorů umístěnými na konci ramen kříže. Sousedící vrtule jsou opačné orientace a tím je umožněna říditelnost helikoptéry v prostoru.



Obrázek 2.1: Kvadrotorová helikoptéra s označením směru rotace motorů. Zdroj: [1]

### 2.2 Historie

V roce 1922 si americká armáda objednala stavbu kvadrotorové helikoptéry. Zakázku obdržel ruský imigrant George de Bothezat. Stroj nazývaný „flying octopus“ absolvoval několik úspěšných letů. Nakonec byl ale projekt přerušen kvůli malému výkonu, neobratnosti stroje, velikosti finančních nákladů a zájmů o vírníky (autogyra)[1]. Vetšimu zájmu

o kvadrotorové helikoptéry se dostává až v poslední době, kdy neustále klesající ceny moderních mikroprocesorů a ostatních elektronických součástek umožňují úplnou autonomní kontrolu letu.



Obrázek 2.2: Kvadrotorová helikoptéra "flying octopus". Zdroj: [1]



## 3 Konstrukce stroje

Základní úvaha o robustnosti stroje vycházela z požadavku na velikost umožňující snadnou konstrukci a užitečný celkový tah motorů v řádu kilogramů. Konstrukce velmi lehkých a malých strojů vyžaduje velký důraz na preciznost a efektivitu provedení. Při konstrukci většího stroje je možno počítat s větší rezervou tahu motorů a tím i větší toleranci k hmotnostně méně efektivní konstrukci. Díky tomu je možné použít ke stavbě snadno dostupné materiály.

### 3.1 Křížový rám

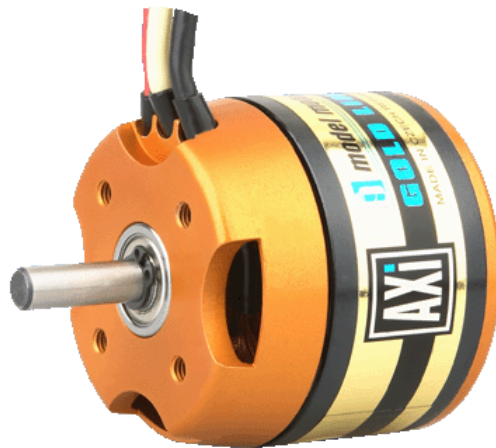
Základní konstrukce kvadrotorové helikoptéry vychází z rámu ve tvaru kříže, který musí být lehký a zároveň dostatečně pevný. Pro stavbu rámu byl zvolen hliníkový profil čtvercového tvaru s drážkami. Délka ramena kříže je 74 cm. Po celé délce byly do profilu vyvrtány díry, které zajistily jeho odlehčení, aniž by byla výrazně snížena pevnost. Ramena byla následně sestavena do kříže pomocí hliníkových profilů ve tvaru písmene L.

### 3.2 Motory

Stroj vyžaduje pro svůj provoz 4 výkonné motory, které jsou v kombinaci s vrtulemi schopny vyvinout dostatečný tah. Proto byly vybrány BLDC motory řady AXI 4120/20 GOLD LINE od firmy AXI Model Motors s následujícími parametry:

- otáčky/volt	465 ot/min $V^{-1}$ ,
- počet článků baterie	5-6 Li-Pol,
- max. účinnost	87%,
- proud při maximální účinnosti	13 - 37 A ( $> \%$ ),
- proud naprázdno při napětí 10 V	1,5 A,
- vnitřní odpor vinutí	82 $\Omega$ ,
- rozměry (průměr x délka)	49,8 x 55,5 mm,
- průměr hřídele	6 mm,
- váha motoru včetně kabelů	320 g.

Pro dosažení nejvyšší účinnosti výrobce doporučuje použít vrtuli o rozměrech 15"  $\times$  8", která má zajistit tah 3,5 N při maximálních otáčkách. V daném případě byla použita vrtule od firmy Fiala Propellers o doporučeném rozměru.



Obrázek 3.1: BLDC motor AXI 4120/20 GOLD LINE od firmy AXI Model Motors.

### 3.3 Ostatní komponenty

Aby bylo možno se strojem bez poškození vrtulí vzhledem k náklonu při malé výšce vzlétat a přistávat, byl stroj opatřen podvozkem o výšce 25 cm. Vzhledem k požadované klimatické odolnosti elektroniky definované v 4.1.1 je stroj vybaven plastovou elektroinstalační krabicí o rozměrech  $25 \times 20 \times 15$  mm, která obsahuje řídicí jednotku a zařízení pro bezdrátovou komunikaci. Dále je stroj opatřen plastovými díly, které byly vyrobeny pomocí tzv. „3D tiskárny“. Tyto díly slouží k uchycení modulu s GPS přijmačem a magnetometrem 30 cm nad úrovní křížového rámu, aby nedocházelo k ovlivňování magnetometru elektronikou a motory. Plastové díly byly též využity pro umístění HAL čidel, které snímají reálné otáčky motorů.

### 3.4 Hmotnostní analýza

Stroj je sestaven z následujících dílů o hmotnostech:

- hliníkové profily křížového rámu	1253 g,
- motory	1280 g,
- baterie	829 g,
- přídatné reflektory	300 g,
- podvozek	325 g,
- ostatní	1264 g.

Celková pohotovostní hmotnost stroje činí 5251 g.

## 4 Návrh řídicího systému

### 4.1 Požadavky na hardware

#### 4.1.1 Klimatická odolnost

Předpokládá se, že stroj bude schopný provozu za deště a v teplotách automotive prostředí (od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $85^{\circ}\text{C}$ ). Je tedy nutné zajistit, aby byla veškerá elektronika chráněna proti působení vody a vlhkosti. Při prudké změně teploty by mohlo dojít k orosení elektroniky a tím k selhání celého řídicího systému. Tento scénář může nastat v případě přenesení stroje z prostoru s výrazně nižší teplotou do prostoru s vyšší teplotou.

#### 4.1.2 Zdroj energie

Jako zdroj energie je použita baterie Li-Pol Hyperion G3 CX 25C s kapacitou 5000 mAh a šesti články. Maximální stálý vybíjecí proud činí 125 A a špičkový vybíjecí proud 225 A. Zařízení musí být funkční v rozsahu napětí od 18 V do 25,2 V.

#### 4.1.3 Komunikace a ovládání

Ovládání stroje musí být bezdrátové s minimálním dosahem 100 metrů všemi směry. Maximální přípustná doba odezvy stroje je 100 ms.

#### 4.1.4 Bezpečnost

Kvadrotorová helikoptéra v případě selhání jednoho motoru neumožňuje let se zbývající motory a stroj se stává neovladatelným. Je tedy nutné stroj uvést do bezpečného stavu vypnutím všech motorů. Dalším možným rizikem je nefunkčnost článku baterie, proto je vhodné monitorovat jejich napětí, aby bylo možno v případě problému včas let ukončit.

## 4.2 Detailní řešení navrženého řídicího systému

### 4.2.1 Definice procesorové platformy

Definice procesorové platformy je zásadní pro celý návrh. Při výběru je nutno zahrnout následující kritéria, která musí procesor splňovat:

- plovoucí aritmetika,
- velikost RAM paměti na čipu,
- velikost programové paměti na čipu,
- ethernet radič,

- SPI periferie 2x,
- programovatelný časovač,
- bezpečnostní funkce,
- výpočetní výkon alespoň 120MIPS.

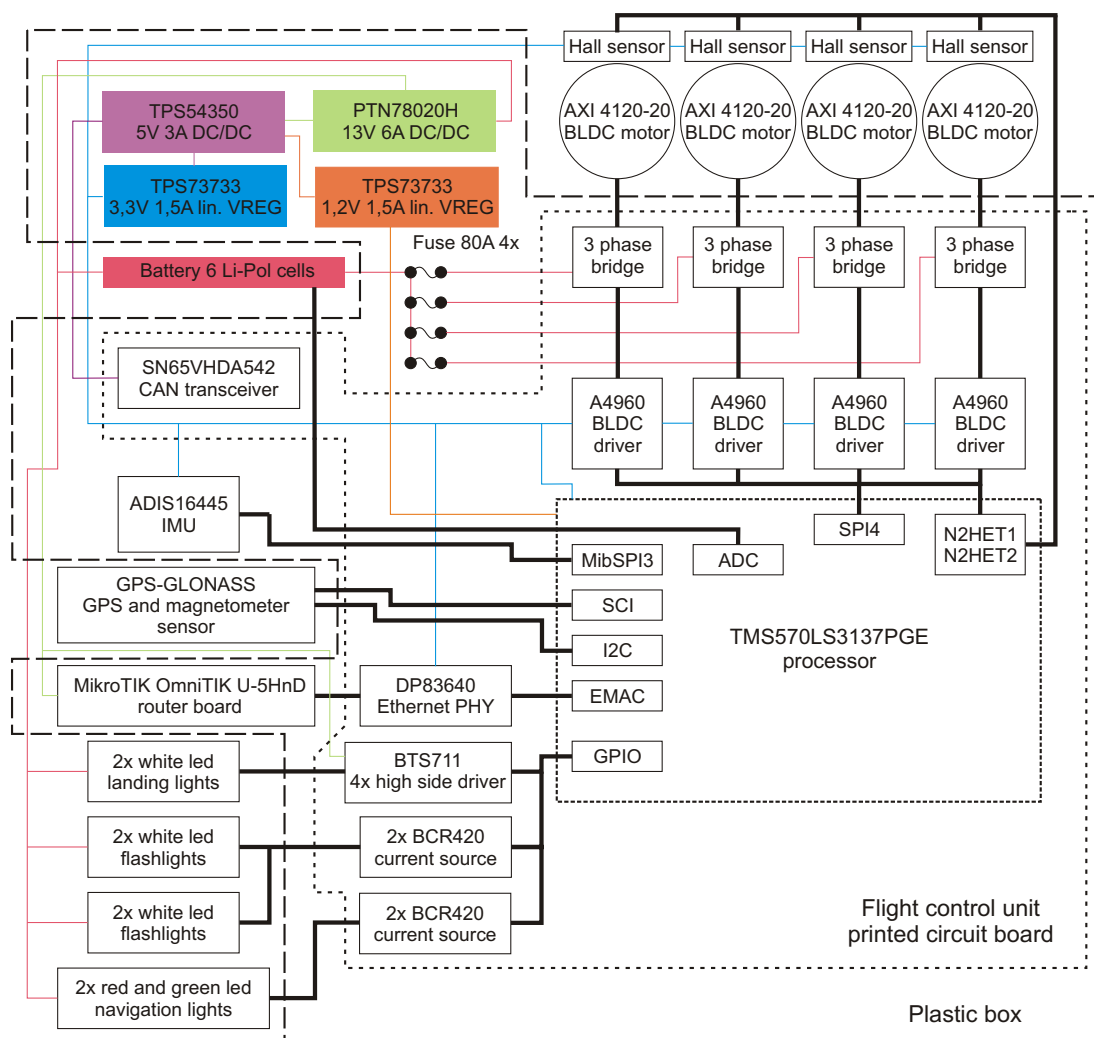
Za nejvhodnější byla označena procesorová platforma TMS570LS3137 od Texas Instruments s bezpečnostním jádrem Cortex-R4. Procesor podporuje širokou řadu bezpečnostních funkcí a je tedy vhodný pro aplikaci vyžadující zvýšenou bezpečnost. Tyto funkce mohou být využity jako potenciální rozšíření budoucího softwaru. V této práci z důvodu časové náročnosti jejich implementace využity nebyly.

## 4.2.2 Definice klíčových komponent

Vzhledem k již definované procesorové platformě je možno přikročit k definici klíčových komponent. Jako klíčové komponenty lze podle důležitosti sestupně označit:

- napájecí zdroje,
- 4 budiče BLDC motoru
- senzor zrychlení se třemi stupni volnosti,
- senzor úhlové rychlosti se třemi stupni volnosti,
- ethernet radič,
- 5GHz WiFi access point MikroTik OmniTIK U-5HnD,
- magnetometr se třemi stupni volnosti,
- GPS přijmač,
- 4 proudové zdroje pro poziční a navigační LED do 100 mA,
- barometr,
- CAN transceiver,
- převodník USB-to-UART,
- inteligentní 2. kanálový spínač horní skupiny s maximálním proudem do 3 A,
- LED reflektory pro orientaci.

### 4.2.3 Blokové schéma zapojení



Obrázek 4.1: Blokové schéma zapojení řídicí jednotky pro kvadrotorovou helikoptéru.

#### 4.2.4 Mechanické provedení plošného spoje

Plošný spoj o rozměrech 220 mm x 114 mm byl navržen v programu Eagle. Využívá 4 vrstvy s plátováním 70 micro. Deska je vyrobena z materiálu FR4 o síle 2 mm. Návrh plošného spoje viz příloha B.

#### 4.2.5 Napájecí zdroje

S ohledem na definované klíčové komponenty lze již rozhodnout o zdrojích napětí na desce řídicího systému. Jako první úroveň je použit modul DC/DC měniče PTN78020H. Pracovní napětí na vstupu vyhovuje rozsahu pracovního napětí na baterii. Výstupní napětí je nastaveno na 13 V s maximálním možným proudovým zatížením 6 A.

Následuje DC/DC měnič TPS54350 s výstupním napětím 5 V a s maximálním možným proudovým zatížením 3 A. Pro napájení procesoru je využit lineární stabilizátor TPS73701 s výstupním napětím 1,2 V a TPS73733 s výstupním napětím 3,3 V. Maximální zatížitelnost těchto lineárních stabilizátorů je 1 A. Referenci pro A/D převodník o napětí 3,3 V zajišťuje lineární stabilizátor REG1117. Napájení senzorů zrychlení, úhlové rychlosti a digitální části BLDC budičů je realizováno pomocí další instance lineárního stabilizátoru TPS73733. Všechny zmíněné součásti pochází ze sortimentu firmy Texas Instruments.

#### 4.2.6 Procesor

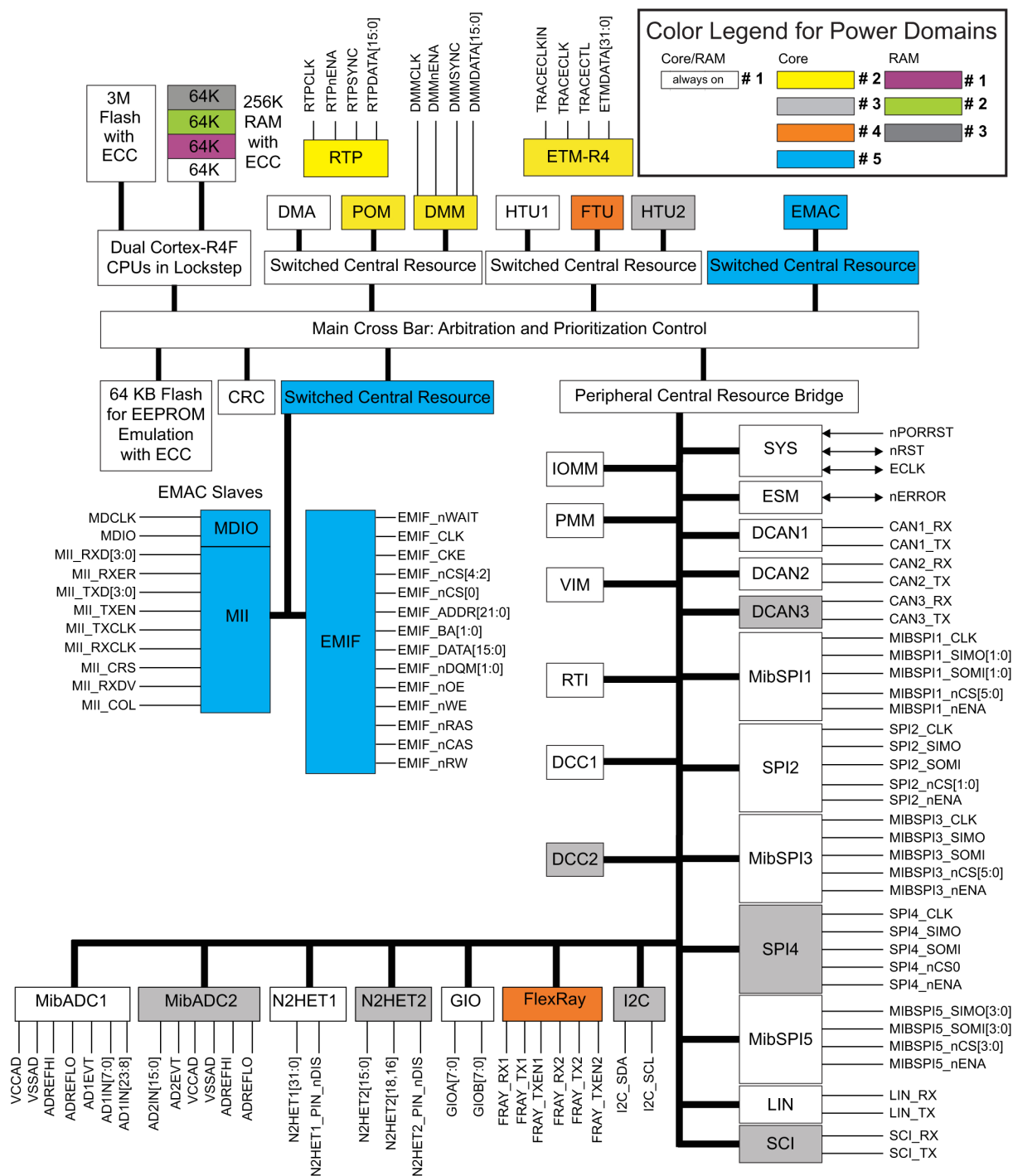
Procesor TMS570LS3137 v pouzdře LQFP144 disponuje jádrem Cortex-R4 s FPU. Rychlost procesoru je 1,6 MIPS/MHz a při frekvenci 180 MHz poskytuje až 288 MIPS. TMS570LS3137 podporuje zarovnění Big-endian, je vybaven 3MB integrovanou pamětí Flash a 256KB RAM.

Nastavení procesoru a periférií probíhá primárně přes program HALCoGen (Hardware Application Layer Code Generator), jehož výstupem jsou veškeré iniciační kódy a funkce main. Tyto kódy jsou následně v programu Code Composer Studio kompilovány včetně dalšího rozšíření programu programátorem.

#### Časovač N2HET

TMS570LS3137 je vybaven inteligentním časovačem N2HET, který poskytuje sofistikované funkce pro řízení aplikací v reálném čase. Časovač využívá mikroprogramového automatu s redukovanou instrukční sadou, kterým je možno ovládat I/O piny. Lze tak například generovat PWM modulaci, využívat capture nebo compare vstupy. Je zvláště dobrý pro aplikace, které potřebují snímat mnoho senzorů a řídit mnoho akčních členů. Programování mikroprogramového automatu probíhá přes program HET IDE, který umožňuje program kompilovat a simulovat. Výstupem programu HET IDE jsou 2 soubory v jazyce C, které jsou importovány do prostředí HALCoGen. Vygenerovaná konfigurace pro procesor nyní obsahuje spouštěcí sekvenci, která program pro N2HET při startu procesoru automaticky spustí.

V řídicí jednotce je časovač N2HET využit pro zachycení periody pulzů čidla otáček motoru a ke generování PWM modulace pro řízení otáček motoru o 540 krocích.

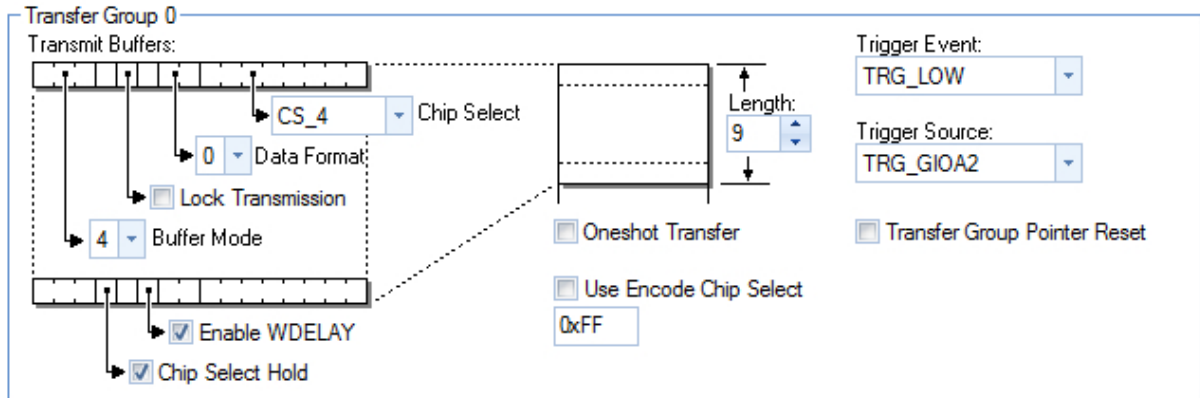


Obrázek 4.2: Blokové schéma procesoru TMS570LS3137 [4].

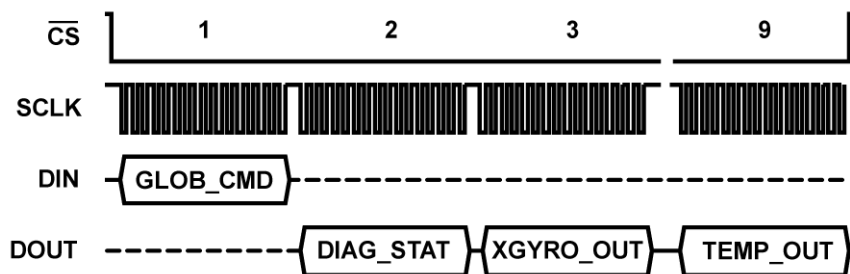
## Multi-buffered SPI

Periferie Multi-buffered SPI (MibSPI) je inteligentní periferie, která usnadňuje složité a mnohanásobné přenosy po SPI. Základní výhodou je v možnosti využití tzv. přenosových skupin, což je pole dat, které je možno vysílat a přijímat v různých předdefinovaných formátech. Příklad použití určuje obrázek 4.3, který obsahuje nastavení přenosu pro senzor IMU v programu HALCoGen. Přenosová skupina disponuje bufferem s devíti přijímacími a vysílacími bajty. Senzor při novém vzorkování dat vyše pulz na pin procesoru GIOA2.

To spustí přenos bufferu, kde první vyslaný bajt z procesoru určí požadavek čtení všech dat o zrychlení a úhlové rychlosti ze senzoru (Obr. 4.4).



Obrázek 4.3: Konfigurace periferie MibSPI v prostředí HALCoGen.



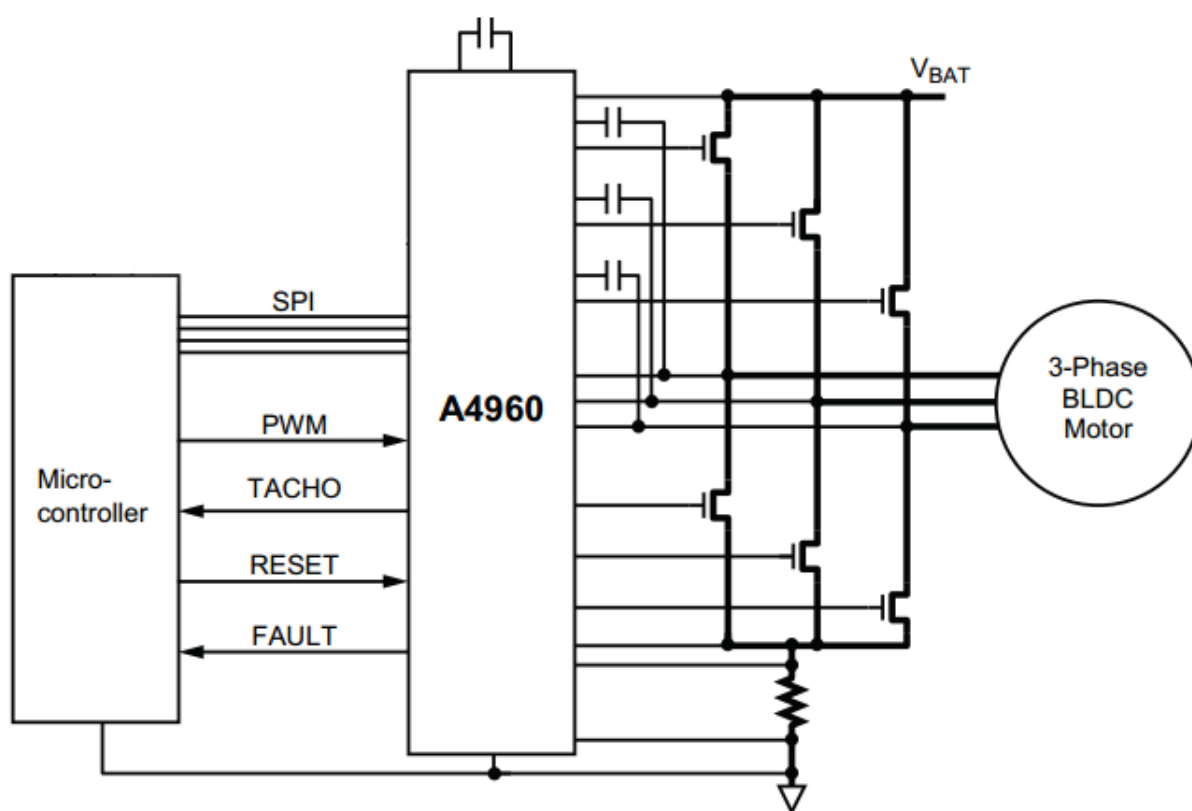
Obrázek 4.4: Sekvence pro čtení hlavních dat ze senzoru IMU. Zdroj: [7]

Jakmile je přenos dokončen, jsou přijatá data pomocí DMA přenosu přesunuta z paměti MibSPI do systémové paměti. Následně jsou zpracována aplikační vrstvou řídicí autonomní let.



## 4.2.7 Budič BLDC motoru

Jednou z nejdůležitějších klíčových komponent je integrovaný obvod zajišťující buzení bezsensorových BLDC motorů. Po zvážení všech kladů a záporů byl vybrán obvod A4960 od firmy Allegro MicroSystems. Tento integrovaný obvod zajišťující třífázové bezsensorové řízení motoru pomocí externích výkonových tranzistorů N-MOSFET je vybaven integrovanou diagnostikou a programovatelným omezením proudu. Je tedy možné diagnostikovat podpětí, překročení teploty a závady na výkonových tranzistorech. K diagnostice a nastavení parametrů pro bezsensorovou komutaci je možno přistupovat pomocí sběrnice SPI. Ovládání otáček motoru probíhá pomocí PWM signálu s výrobcem doporučenou frekvencí střídavy 18 KHz. Integrovaný obvod též disponuje digitálním signálem určujícím reálnou rychlost rotoru.



Obrázek 4.5: Typické zapojení integrovaného obvodu A4960. Zdroj: [2]

### Výkonové tranzistory

Integrovaný obvod využívá 6 externích výkonových tranzistorů N-MOSFET IRFS7437-7PPbF. Tyto tranzistory jsou zapojeny v topologii tří polomůstek. Mezi nejdůležitější parametry tranzistorů lze v dané aplikaci zařadit:

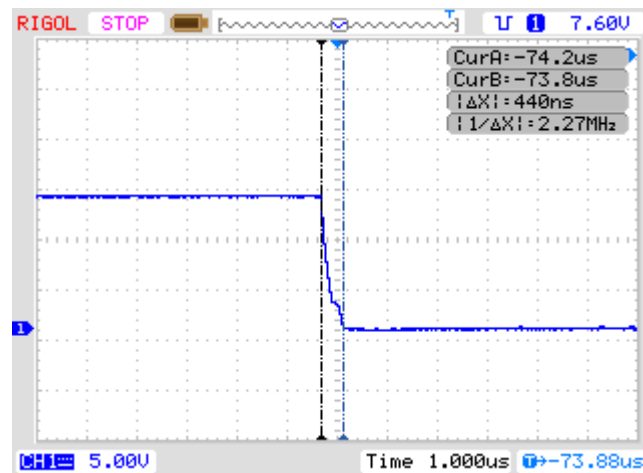
- $U_{DS} = 40 \text{ V}$ ,
- $I_D(\text{limit pouzdra}) = 240 \text{ A}$ ,
- $C_{iss} = 10250 \text{ pF}$ ,
- $R_{DS(\text{on})} = 0,7 \text{ m}\Omega$ ,
- $R_{G \text{ int}} = 2,2 \Omega$ .

Maximální možné napětí  $U_{DS}$  je udáváno bez rezervy a nesmí být překročeno ani ve špičkách. Je proto vhodné zapojení dimenzovat s rezervou. Pokud by bylo maximální napětí překročeno, dojde k proražení tranzistoru a k selhání celého stroje. Pozornost je nutné věnovat i celkové vstupní kapacitě gate. Tranzistor je třeba dostatečně rychle budit, aby nedošlo k jeho selhání. Rychlost buzení ovlivňují rezistory v sérii s gate tranzistoru. Regulace proudu na gate je nutná s ohledem na EMC obvodu a na skutečnosti, že spojením budiče a gate vznikne RLC obvod, který může při malé hodnotě  $R$  kmitat. Tento jev může též způsobit selhání tranzistoru.

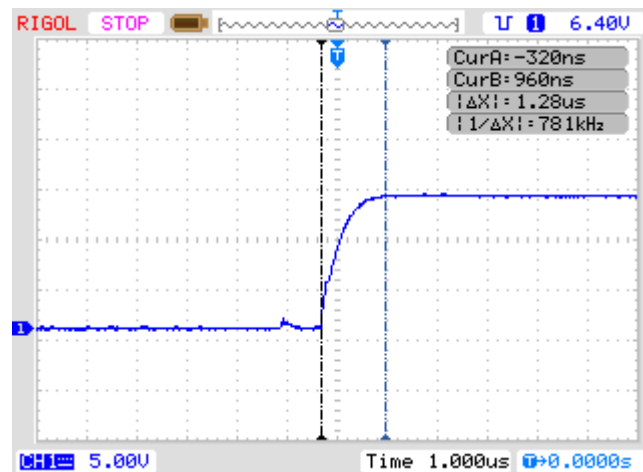
V dané aplikaci nebylo vzhledem k omezené možnosti chlazení využito žádné přídavné omezení proudu na gate a byly ponechány pouze výstupní impedance budiče. Tyto hodnoty jsou vzhledem k teplotě obvodu v rozsahu:

- $R_{DS(on)}$  horní v rozsahu 9 - 27  $\Omega$ ,
- $R_{DS(on)}$  spodní v rozsahu 1,8 - 7  $\Omega$ .

Je však nutné pracovat i s vnitřním odporem gate tranzistoru  $R_{G\ int}$ .



Obrázek 4.6: Průběh napětí na gate spodního tranzistoru BLDC měniče během vypínání.



Obrázek 4.7: Průběh napětí na gate spodního tranzistoru BLDC měniče během zapínání.

Obrázky 4.6 a 4.7 znázorňují napětí na gate tranzistoru během zapínání a vypínání. Měření probíhalo při pokojové teplotě a teplotě čipu budiče 42 °C. Průběh napětí odpovídá parametrům RC obvodu, kde R je výstupní impedance budiče společně s odporem gate tranzistoru a C kapacita hradla tranzistoru. Následující výpočet určuje teoretické hodnoty doby přechodových jevu na gate tranzistoru při spínání za nejhorších podmínek.

$$t_{\text{on}} \approx 5(R_{DS_{\text{on}}} + R_G)C_{iss} = 5 \cdot (27 + 2) \cdot 10250 \cdot 10^{-12} = 1486\text{ns}$$

$$t_{\text{off}} \approx 5(R_{DS_{\text{on}}} + R_G)C_{iss} = 5 \cdot (7 + 2) \cdot 10250 \cdot 10^{-12} = 461\text{ns}$$

Skutečná naměřená hodnota času zapnutí tranzistoru  $t_{\text{on}}$  je 1280 ns a hodnota času vypnutí tranzistoru  $t_{\text{off}}$  je 472 ns. Parametr  $R_{DS(\text{on})}$  má vliv zejména na teplotní ztráty tranzistoru. V dané aplikaci se teplota tranzistorů při maximálních otáčkách motoru a pokojové teplotě stabilizuje na 45 °C.

### Omezení proudu

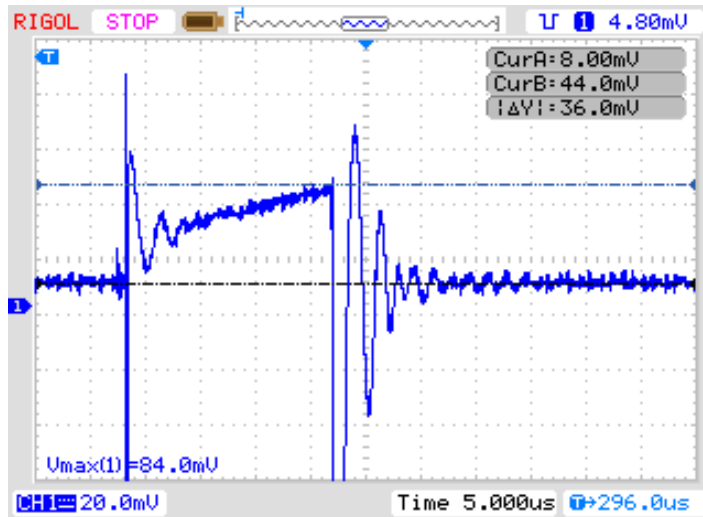
Budič umožňuje použít nastavitelné omezení proudu motoru pomocí snímání napětí na bočnicku zapojeného do série se všemi třemi polomůstkami. V daném případě jsou použity 2 paralelně zapojené výkonové rezistory o výsledné hodnotě 0,0025 Ω. Napětí z bočnicku je přivedeno na terminály budiče CSP a CSM, které jsou připojeny na interní operační zesilovač o hodnotě zesílení 10. Zesílený rozdíl napětí na bočnicku je přiveden na komparátor společně s hodnotou napětí  $V_{\text{RI}}$ , která je nastavitelná pomocí registrů přes rozhraní SPI. Budič umožňuje nastavit hodnotu napětí  $V_{\text{RI}}$  pro start a běh za normálních podmínek. V případě překročení maximální hodnoty proudu jsou horní tranzistory vypnuty a dolní tranzistory zapnuty po dobu nastavitelnou pomocí registru. Během této doby se proud motoru snižuje se strmostí závislou na indukčnosti motoru a impedancí tranzistorů měniče. Je zcela nezbytné nastavit dostatečný čas ke snížení proudu, aby nedošlo k nasycení vinutí a velkému nárůstu proudu. Následující výpočet znázorňuje výpočet proudového omezení pro běh za normálních podmínek,

$$I_{\text{TRIP}} \approx \frac{V_{\text{RI}}}{A_V \times R_{\text{SENSE}}} = \frac{1,5}{10 \times 0,0025} = 80\text{A} \quad (4.1)$$

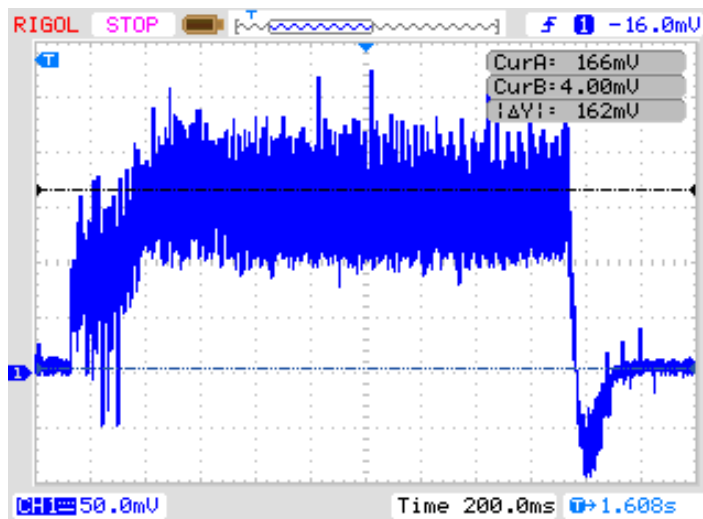
kde

- $A_V$  je zesílení vnitřního operačního zesilovače,
- $R_{\text{SENSE}}$  je odpor bočnicku,
- $V_{\text{RI}}$  je nastavitelná hodnota napětí pro komparátor a
- $I_{\text{TRIP}}$  je hodnota omezení proudu.

Obrázek 4.8 znázorňuje průběh napětí na bočnicku. Počáteční špička při náběhu proudu je způsobena dobou zotavení diod mezi drain a source piny tranzistorů. Tyto proudové špičky by mohly být budičem vyhodnoceny jako překročení maximálního proudu na fázích motoru, a proto jsou pro detekci maximálního proudu maskovány po čas nastavitelný registrem.



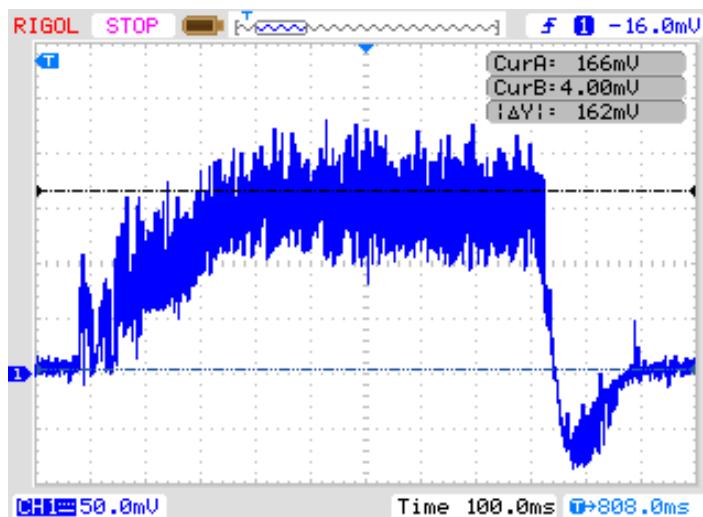
Obrázek 4.8: Průběh napětí na bočníku pro měření proudu BLDC motoru o hodnotě  $0,0025 \Omega$  při 1400 ot/min.



Obrázek 4.9: Měření celkového proudu zařízení z baterie při zkoušce maximálních otáček BLDC motoru na bočníku v sérii s baterií o hodnotě  $0,005 \Omega$ .

Pro identifikaci proudové zátěže baterie při maximálních otáčkách jednoho motoru byl do série s baterií umístěn bočník o hodnotě  $0,005 \Omega$ . Obrázek 4.9 znázorňuje průběh napětí na bočníku během náběhu na maximální otáčky motoru a jeho následného vypnutí. Střední hodnota maximálního proudu je 32,4 A, ve špičkách hodnota dosahuje 52,4 A.

Na obrázku 4.10 je průběh napětí na totožném bočníku, avšak za bočníkem je v tomto případě připojen kondenzátor Epcos B41580-A5479-M s kapacitou  $47000 \mu\text{F}$  a maximálním napětím 25 V. V důsledku použití kondenzátoru došlo k výraznému omezení proudových špiček z baterie. Střední hodnota maximálního proudu je stále 32,4 A, avšak ve špičkách hodnota dosahuje již pouze 46 A.



Obrázek 4.10: Měření celkového proudu zařízení z baterie při zkoušce maximálních otáček BLDC motoru na bočniku v sérii s baterií o hodnotě  $0,005 \Omega$ .

## Diagnostika závad

Budič disponuje následující integrovanou diagnostikou závad a indikací:

- indikace příliš nízkého napájecího napětí,
- indikace "právě zapnuto",
- blížící se kritická teplota integrovaného obvodu budiče,
- vypnutí budiče v důsledku vysoké teploty integrovaného obvodu,
- ztráta synchronizace BEMF,
- závada na bootcapu A,
- závada na bootcapu B,
- závada na bootcapu C,
- závada na tranzistoru fáze A horní skupiny,
- závada na tranzistoru fáze A dolní skupiny,
- závada na tranzistoru fáze B horní skupiny,
- závada na tranzistoru fáze B dolní skupiny,
- závada na tranzistoru fáze C horní skupiny,
- závada na tranzistoru fáze C dolní skupiny.

S výjimkou dvou počátečních indikací mohou být tyto chyby uživatelem jednotlivě aktivovány. Důsledkem aktivace je možná detekce chyby po sériovém rozhraní a případné následné okamžité zastavení motoru samotným budičem. Závada na tranzistoru je detekována pomocí registrem nastavitelného prahu napětí, který je porovnáván s napětím mezi drain a source tranzistoru po jeho zapnutí a vypnutí.

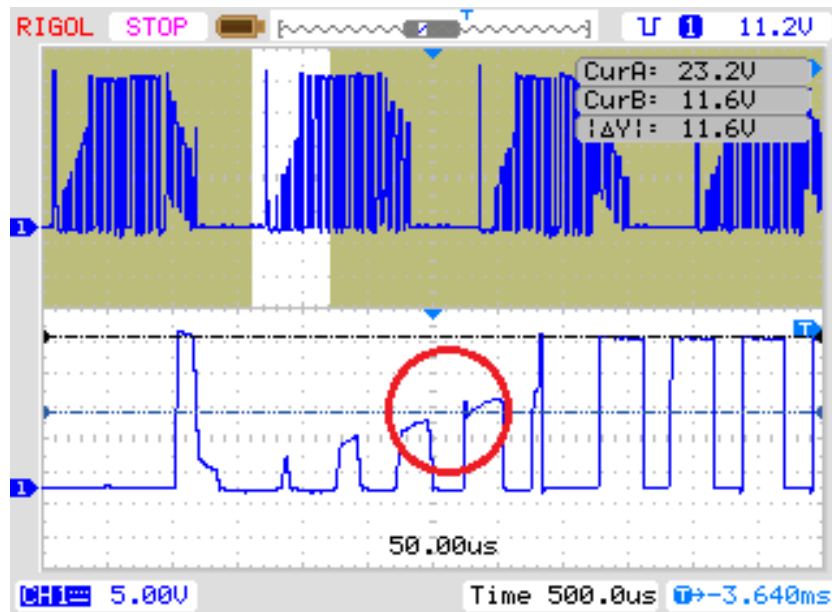
Software řídicí jednotky využívá detekci všech zmíněných závad. V případě detekce závady se stroj v případě letu uvede do bezpečného stavu, což znamená zastavení všech motorů.

## Řízení otáček motoru

Budič motoru disponuje logickým vstupem, který umožňuje lineární regulaci otáček motoru PWM modulací o výrobcem doporučené frekvenci 18 KHz. Signál PWM je v proce-

soru generován časovačem N2HET a lze ho regulovat v 540 krocích. Graf 4.13 znázorňuje otáčky motoru v závislosti na střídě PWM.

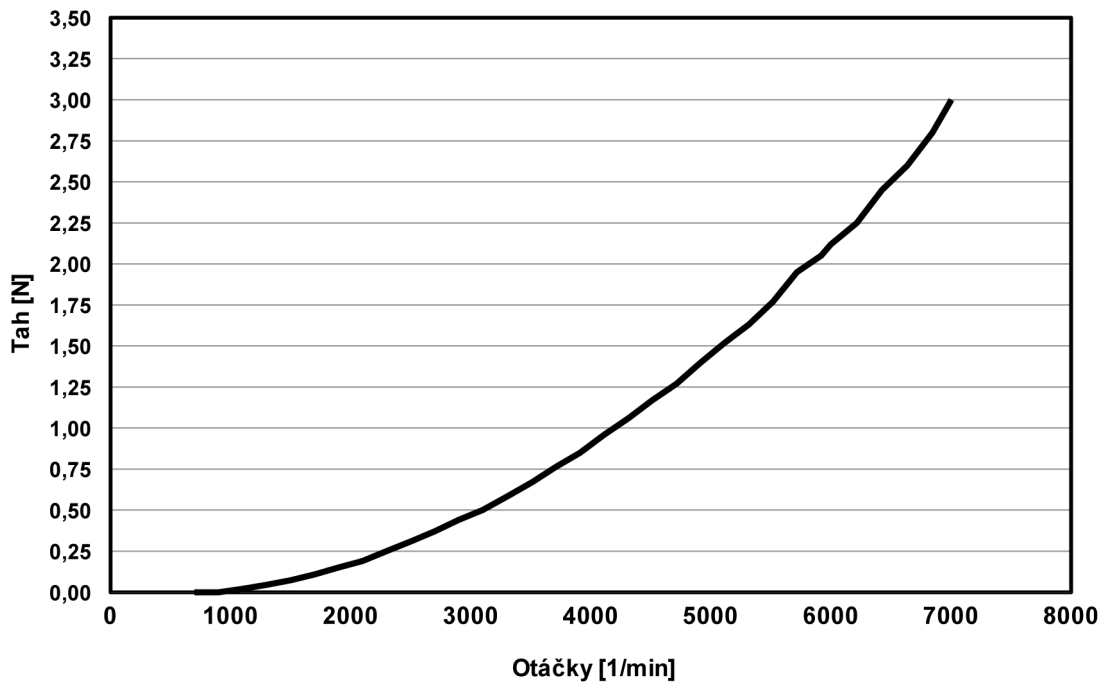
Regulace otáček probíhá v uzavřené smyčce za pomoci PID regulátoru. Zpětnou vazbu informující o reálných otáčkách motoru lze zajistit pomocí logického výstupu budiče. Periodu mezi změnou logické hodnoty je možno využít pro výpočet reálné rychlosti motoru. Využití této zpětné vazby se však ukázalo jako problematické, neboť měřené otáčky, které dosahují reálných hodnot až 7000 ot/min byly měřeny s chybou  $\pm 1000$  ot/min. Signál v určitých časových oknech využívá detekci průchodu napětí fáze motoru polovičním napájecím napětím, která je zkusena v důsledku PWM modulace 4.11.



Obrázek 4.11: Napětí na fázi BLDC měniče.

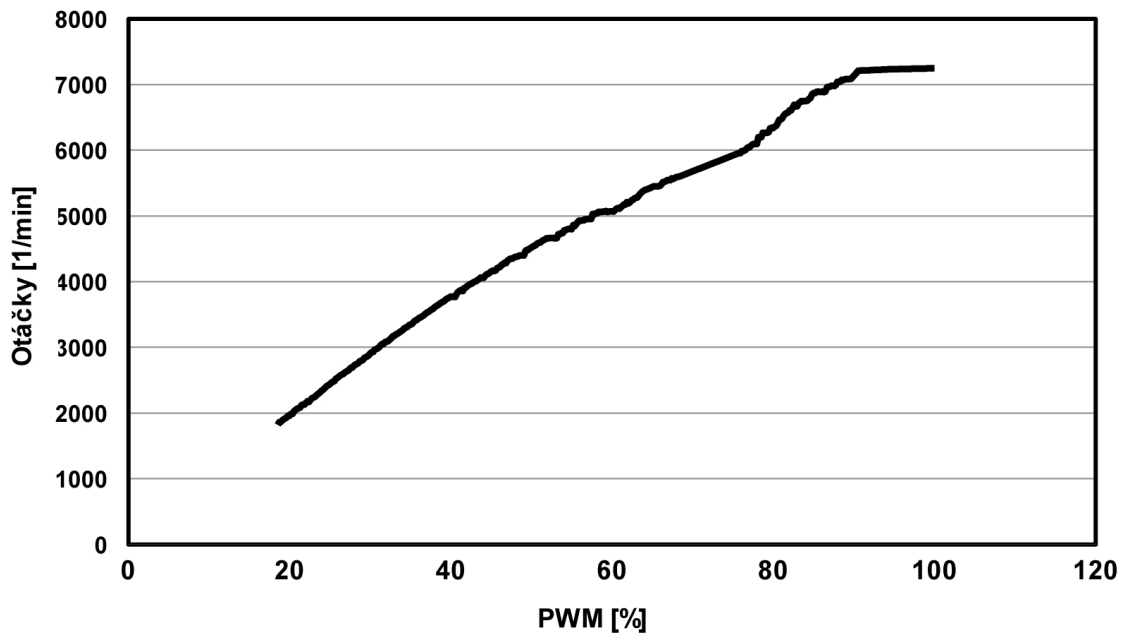
Přesnějšího měření bylo dosaženo umístěním HAL senzoru A1120EUA-T od firmy Allegro do blízkosti rotoru. Tyto senzory detekují změny magnetického pole v okolí rotoru s permanentními magnety. Z period logických impulzů přivedených do časovače procesoru N2HET lze vypočítat okamžité otáčky motoru.

**Tah motoru s vrtulí 15" x 8"**



Obrázek 4.12: Graf závislosti tahu na otáčkách motoru.

**Otáčky motoru s vrtulí 15" x 8"**

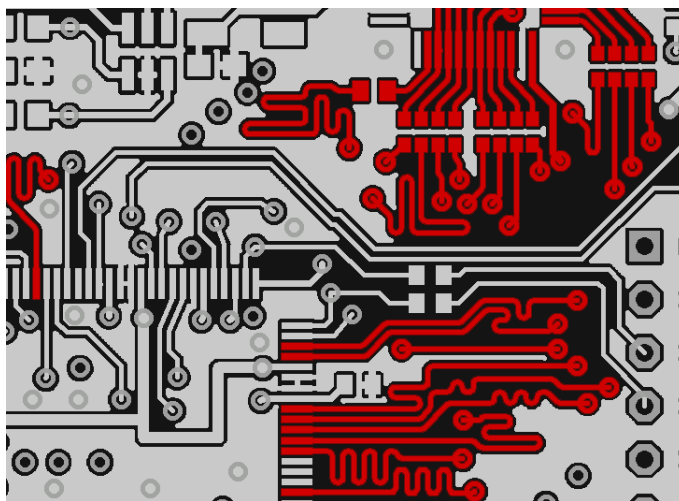


Obrázek 4.13: Graf závislosti otáček motoru na PWM.

## 4.2.8 Ethernet

Řídicí jednotka využívá ke komunikaci s pilotem přenos dat po 5 GHz WiFi. Pomocí konektorů RJ-45 a UTP kabelu je připojen plošný spoj se zařízením MikroTIK OmniTIK U-5HnD, které je umístěno v plastovém boxu stroje. Pilot využívá laptop s připojeným joystickem, kterým ovládá stroj. Pomocí programu FlightControl (4.4.4) má pilot k dispozici veškeré potřebné údaje pro bezpečné ovládání stroje.

Řídicí jednotka obsahuje Ethernet řadič DP83640 od firmy Texas Instruments. Tento integrovaný obvod je připojen k procesoru přes komunikační rozhraní MII, které se skládá z 15 signálů. Signály je nutné navrhnout stejně dlouhé, s nejkratší možnou vzdáleností a minimálním počtem prokovů.



Obrázek 4.14: Plošný spoj s červeně vyznačenými signály rozhraní MII.

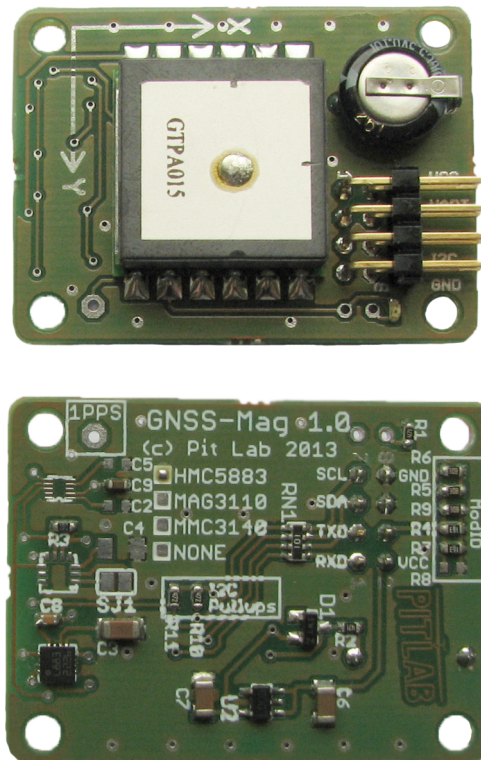
## 4.2.9 GPS přijmač a magnetometr

Umístění magnetometru na stroji vyžaduje zvýšenou pozornost z důvodu možného ovlivňování měřených dat magnetickým polem výkonové části stroje. Jelikož by bylo nezbytné pro integrovaný obvod magnetometru navrhnout samostatný plošný spoj, bylo rozhodnuto o použití modulu pod obchodním názvem GPS-GLONASS od firmy PITLAB. Tento modul obsahuje magnetometr HMC5883L od firmy Honeywell a GPS přijmač s chipsetem MTK3333. Magnetometr je připojen pomocí I2C sběrnice, která je vyvedená z řídicí jednotky dráty. GPS modul pro komunikaci s řídicí jednotkou využívá RS-232 o rychlosti 9600 baud. Po důkladném zvážení bylo vyloučeno významné bezpečnostní riziko při provozu stroje související s možnou ztrátou dat způsobenou prodlouženým vedením sběrnice I2C a datové linky RS-232.

## 4.2.10 Senzor zrychlení a úhlové rychlosti

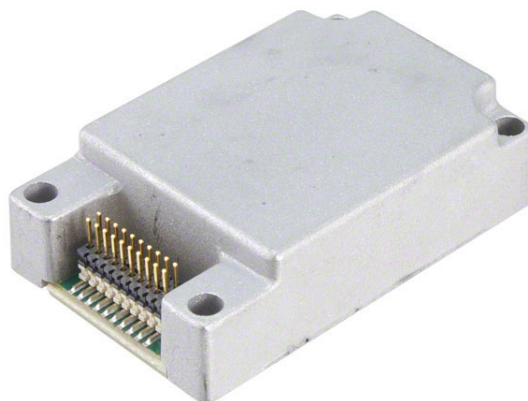
Data ze senzoru zrychlení a úhlové rychlosti (IMU) jsou naprosto nezbytná pro správnou funkci kvadrotorové helikoptéry. Tříosý akcelerometr a gyroskop společně s magnetometrem zajišťuje vstupní data pro výpočet odhadu vektoru stavu stroje (poloha, rychlost, orientace a změna orientace). Po důkladném zvážení byl zvolen senzor ADIS16445 od firmy Analog Devices, který je vybaven diagnostikou a jednoduchým rozhraním komunikujícím





Obrázek 4.15: Modul GPS-GLONASS s GPS přijmačem a magnetometrem od firmy PITLAB.

po sběrnici SPI. Senzor je dodáván jako modul v hliníkovém pouzdru o rozměrech 24,1 x 37,7 x 10,8 mm s konektorem s dvaceti piny 4.16. Obnovovací frekvence dat je s použitím interních hodin až 819.2 Hz. Senzor disponuje logickým signálem Data ready, který při každé obnově měřených dat vytvoří pulz, který je zpracován jako spouštění přenosu periferie MiBSPi.



Obrázek 4.16: Senzor ADIS16445 od firmy Analog Devices. Zdroj: [7]

### 4.3 Výpočet střední doby mezi poruchami

Pro každou řídicí jednotku je vhodné provést analýzu spolehlivosti. Základní ukazatel spolehlivosti je výčet střední doby mezi poruchami MTBF. V praxi se ovšem obvykle uvádí hodnota FIT, pro který platí přepočtení 4.2.

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTBF}} [10^{-9}\text{FIT}] \quad (4.2)$$

Hodnoty  $\lambda$  byly stanoveny pomocí Military Handbook [5]. Pro stanovení výpočtu střední doby poruchy platí 4.3, kde  $n$  je celkový počet součástek ve výpočtu.

$$\text{MTBF} = \frac{1}{\sum_1^n \lambda_n} \quad (4.3)$$

Tento výpočet je však pouze orientační. Vhodnější ověření spolehlivosti řídicí jednotky lze realizovat pomocí akcelerovaných testů. Ty spočívají ve vystavení vzorku určitým podmínkám (teploty, napětí, vibrace atd.), které napomohou odhalit potenciální chyby v kratším čase.

Součást	Počet kusů	FIT $10^{-9}$	$\sum$ FIT $10^{-9}$	%
Rezistor	207	0,8	165,6	2,63
Rezistorová síť	12	2,5	30	0,48
Kondenzátor keramický	133	1	133	2,11
Kondenzátor elektrolytický	78	32	2496	39,67
Dioda	33	14	462	7,34
Tranzistor	28	6	168	2,67
Integrovaný obvod	20	8	160	2,54
Procesor	1	2,6	2,6	0,04
LED	10	1,2	12	0,19
Krystal	2	18,5	37	0,59
Tlumivka	3	1	3	0,05
Tlačítko	2	20	40	0,64
Konektor	4	25,5	102	1,62
Pájený kontakt	1868	0,14	261,52	4,16
Plošný spoj	1	2093,61	2093,61	33,27
Transil	2	23	46	0,73
Pojistka	4	20	80	1,27
$\sum$	2408		6292,33	

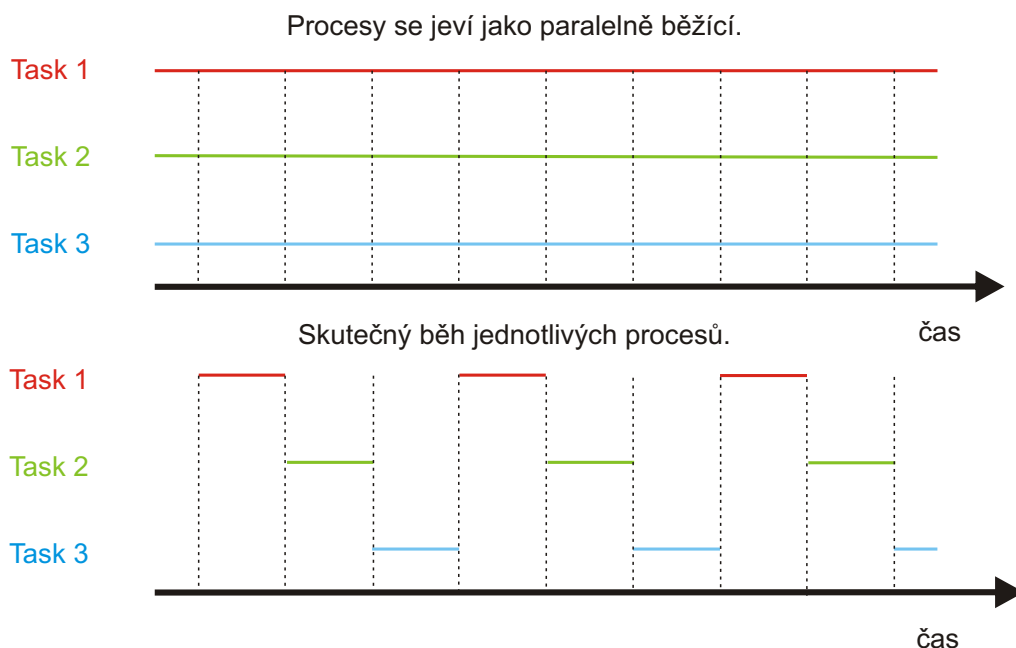
Tabulka 4.1: Tabulka určující počty součástek a parametry FIT.

$$\begin{aligned} \text{MTBF} &= \frac{1}{\sum_1^n \lambda_n} = \frac{1}{6292,33} = 0,0001589236 \\ \lambda_{hod} &= \frac{1}{\text{MTBF}} = \frac{1}{0,0001589236} 10^{-9} = 158924 \\ \lambda_{rok} &= \frac{8760}{\text{MTBF}} = 18,14 \end{aligned}$$

## 4.4 Software

### 4.4.1 Použití operačního systému reálného času FreeRTOS

Řídící jednotka pro autonomní let využívá operační systém reálného času FreeRTOS. Jedná se o ideální řešení v případě požadavku na zajištění velkého množství paralelně běžících úkolů. Tyto paralelně běžící úkoly lze chápat jako nekonečné smyčky, které běží neustále. Integrovaný plánovač následně zajišťuje vyvážené dělení strojového času. Tyto skutečnosti nabízí možnost tvorby přehledně strukturovaného programu.

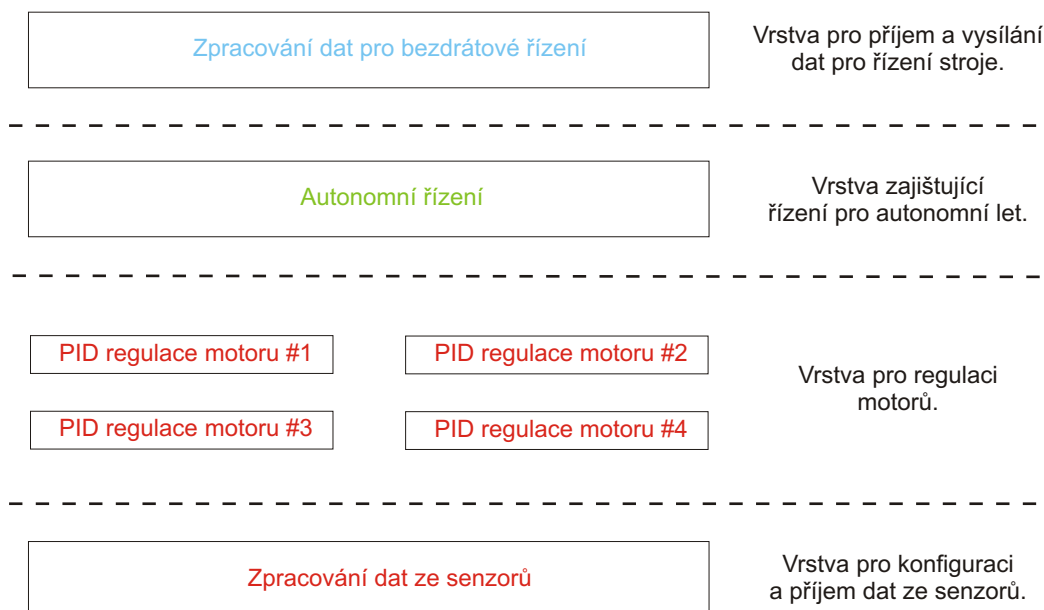


Obrázek 4.17: Ilustrace běhu procesů v operačním systému reálného času FreeRTOS.

FreeRTOS disponuje nejen plánovačem procesů, ale také frontami, semaforemi, mutexy, softwarovými časovači či event bity. Software řídicí jednotky využívá fronty, softwarové časovače a event bity.

### 4.4.2 Struktura programu v řídicí jednotce

Program v řídicí jednotce je rozdělen do čtyř vrstev. Spodní vrstva zabezpečuje data ze sensorů, která jsou nezbytná pro výpočty. Následuje vrstva obstarávající PID regulaci motorů. Třetí vrstva zajišťuje autonomní let a provádí výpočty autonomního řízení, jejichž vstupem jsou data ze sensorů a výstupem jsou požadované otáčky motorů. Horní vrstva obstarává příjem a vysílání dat potřebných pro bezdrátové řízení stroje.



Obrázek 4.18: Struktura programu v řídicí jednotce.

### 4.4.3 Software pro časovač N2HET

Časovač N2NET je v této aplikaci využit k měření délky pulzů a generování PWM modulace. Všechny tyto funkce zajišťuje software v mikroprogramovém automatu časovače 4.1.

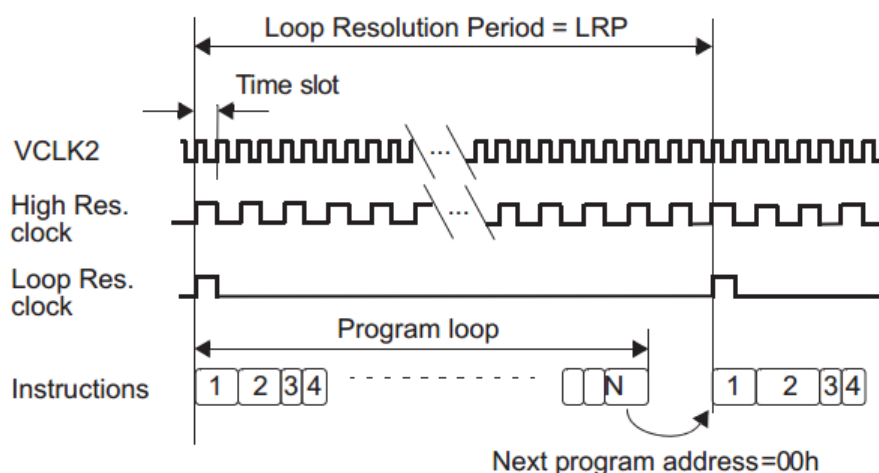
```

1 L00: CNT{next=L01, reg=A, max=540 }
2 L01: MCMP{next=L02, reg=A, en_pin_action = ON, hr_lr=HIGH, pin = CC1, action=PULSELO, order=REG_GE_DATA, data=0x0,
   hr_data=0x0}
3 L02: MCMP{next=L03, reg=A, en_pin_action = ON, hr_lr=HIGH, pin = CC4, action=PULSELO, order=REG_GE_DATA, data=0x0,
   hr_data=0x1}
4 L03: MCMP{next=L04, reg=A, en_pin_action = ON, hr_lr=HIGH, pin = CC14, action=PULSELO, order=REG_GE_DATA, data=0x0,
   hr_data=0x2}
5 L04: MCMP{next=L05, reg=A, en_pin_action = ON, hr_lr=HIGH, pin = CC16, action=PULSELO, order=REG_GE_DATA, data=0x0,
   hr_data=0x3}
6 L05: PCNT{next=L06, type=RISE2RISE, pin = CC18}
7 L06: PCNT{next=L00, type=RISE2RISE, pin = CC20}

```

Zdrojový kód 4.1: Program časovače N2HET

Program obsahuje 7 instrukcí. Tyto 96 bitové instrukce jsou vykonány frekvencí, kterou lze v prostředí HALCoGen nastavit jako High Resolution Loop. Program se však musí vejít do periody Low Resolution Loop, po jejímž uplynutí se běh programu vrátí na začátek. Tato skutečnost určuje základní rozdíl mezi obvyklým programováním a programováním časovače N2HET. Je třeba také brát ohled na potřebný počet cyklů pro vykonání instrukce. Většina instrukcí je vykonána v jednom cyklu, avšak některé z nich potřebují dva nebo tři cykly.



Obrázek 4.19: Běh programu v časovači N2HET Zdroj: [4].

Jako první se při startu programu spustí instrukce CNT, která inkrementuje hodnotu v registru A. Jakmile je v registru A dosaženo hodnoty 540, je registr vynulován. Následuje instrukce MCMP, která porovnává hodnotu registru A s hodnotou datového registru instrukce. V případě, kdy je hodnota registru A rovna nebo větší než hodnota datového registru instrukce, následuje akce v podobě nastavení I/O pinu procesoru na logickou nulu. Tato operace je dále provedena pro zbylé PWM výstupy ovládající otáčky motorů stroje.

Následuje instrukce PCNT, která provádí záchyt periody logického pulzu z HAL čidla, které určuje momentální otáčky motoru. Instrukce měří periodu mezi náběžnými hranami logického signálu a údaj uschovává v datové oblasti instrukce. Aby bylo dosaženo generování PWM pomocí instrukcí CNT a MCMP s maximálním rozlišením, je nutno provozovat co nejkratší program. Z tohoto důvodu a z důvodu obsazenosti pinů procesoru bylo zpracování otáček zbylých dvou motorů pomocí instrukcí PCNT přesunuto do druhé instance časovače N2HET2.

#### 4.4.4 Dálkové řízení

Zařízení komunikuje s pilotem pomocí bezdrátové sítě Ethernet. Řídící jednotka v intervalu 80 ms odesílá soubor dat, který je obrazem momentálního stavu stroje. Tento soubor dat je v programu nadefinován jako struktura s názvem "fcuDiagChannels" a obsahuje 91 proměnných. Struktura je následně pomocí UDP protokolu periodicky odesílána na IP adresu 192.168.10.255, což zapříčiní doručení dat všem uzlům v lokální síti.

V programovacím jazyku C# byla pro ovládání stroje vytvořena aplikace FlightControl. Tato aplikace přehledně zobrazuje důležitá data potřebná pro řízení stroje. Jedná se o absolutní rychlost stroje, umělý horizont, výšku stroje nad mořem, kompas a vertikální rychlost. Tato data jsou zobrazena pomocí palubních přístrojů, které byly získány z projektu pod názvem "C# Avionic Instrument Controls" z <http://www.codeproject.com>. Dále jsou ve formě textu zobrazeny údaje o celkovém napětí baterie, času letu, tlaku, otáčkách motorů, teplotu čidla IMU, požadovaných otáčkách motorů a chyb na měničích. Teplota čidla IMU reprezentuje teplotu uvnitř plastového boxu stroje.

```

1 typedef struct {
2     float Rotor1RPMNonFiltered;
3     uint32 Rotor1RPMFiltered;
4     uint32 Rotor1RPMSetPWMValue;
5     uint32 Rotor1RPMSetRPMValue;
6     float Rotor1TachoPulseWidth;
7     float Rotor1CutOffCode;
8     float Rotor1ErrorCode;
9     float Rotor1RegulationError;
10    uint32 Rotor2RPMNonFiltered;
11    uint32 Rotor2RPMFiltered;
12    uint32 Rotor2RPMSetPWMValue;
13    uint32 Rotor2RPMSetRPMValue;
14    float Rotor2TachoPulseWidth;
15    float Rotor2CutOffCode;
16    float Rotor2ErrorCode;
17    float Rotor2RegulationError;
18    uint32 Rotor3RPMNonFiltered;
19    uint32 Rotor3RPMFiltered;
20    uint32 Rotor3RPMSetPWMValue;
21    uint32 Rotor3RPMSetRPMValue;
22    float Rotor3TachoPulseWidth;
23    float Rotor3CutOffCode;
24    float Rotor3ErrorCode;
25    float Rotor3RegulationError;
26    uint32 Rotor4RPMNonFiltered;
27    uint32 Rotor4RPMFiltered;
28    uint32 Rotor4RPMSetPWMValue;
29    uint32 Rotor4RPMSetRPMValue;
30    float Rotor4TachoPulseWidth;
31    float Rotor4CutOffCode;
32    float Rotor4ErrorCode;
33    float Rotor4RegulationError;
34    float AmbientPressureFiltered;
35    uint32 LightsStatus;
36    float MainBatteryVoltageNonFiltered;
37    float MainBatteryVoltageFiltered;
38    float MainBatteryTotalCurrentNonFiltered;
39    float MainBatteryTotalCurrentFiltered;
40    float MainBatteryCell1NonFiltered;
41    float MainBatteryCell1Filtered;
42    float MainBatteryCell2NonFiltered;
43    float MainBatteryCell2Filtered;
44    float MainBatteryCell3NonFiltered;
45    float MainBatteryCell3Filtered;
46    float MainBatteryCell4NonFiltered;
47    float MainBatteryCell4Filtered;
48    float MainBatteryCell5NonFiltered;
49    float MainBatteryCell5Filtered;
50    uint32 TotalLifetime;
51    uint32 TotalFlightTime;
52    uint32 TimeFromTakeoff;
53    uint32 TimeFromLastTurnOn;
54    float AccelerationXCoordNonFiltered;
55    float AccelerationXCoordFiltered;
56    float AccelerationYCoordNonFiltered;
57    float AccelerationYCoordFiltered;
58    float AccelerationZCoordNonFiltered;
59    float AccelerationZCoordFiltered;
60    float AccelerationAbsValue;
61    float AngularRateXCoordNonFiltered;
62    float AngularRateXCoordFiltered;
63    float AngularRateYCoordNonFiltered;
64    float AngularRateYCoordFiltered;
65    float AngularRateZCoordNonFiltered;
66    float AngularRateZCoordFiltered;
67    float EarthMagFieldXCoordNonFiltered;
68    float EarthMagFieldXCoordFiltered;
69    float EarthMagFieldYCoordNonFiltered;
70    float EarthMagFieldYCoordFiltered;
71    float EarthMagFieldZCoordNonFiltered;
72    float EarthMagFieldZCoordFiltered;
73    float EarthMagFieldAbsValue;
74    float AltitudeGPS;
75    float AltitudePressure;
76    float AltitudeFiltered;
77    float VerticalSpeed;
78    float AbsoluteSpeed;
79    float Heading;
80    float AngularTiltX;
81    float AngularTiltY;
82    float GPSAlpha;
83    float GPSLambda;
84    float AmbientTemperature;
85    float IMUTemp;
86    uint32 AutopilotOn;
87    uint32 DeviceInAir;
88    uint32 HighSeverityFault;
89    uint32 HighSeverityFaultErrorCode;
90    uint32 Test1;
91    uint32 Test2;
92    uint32 Test3;
93    uint32 Test4;
94 } fcuDiagChannels_t;

```

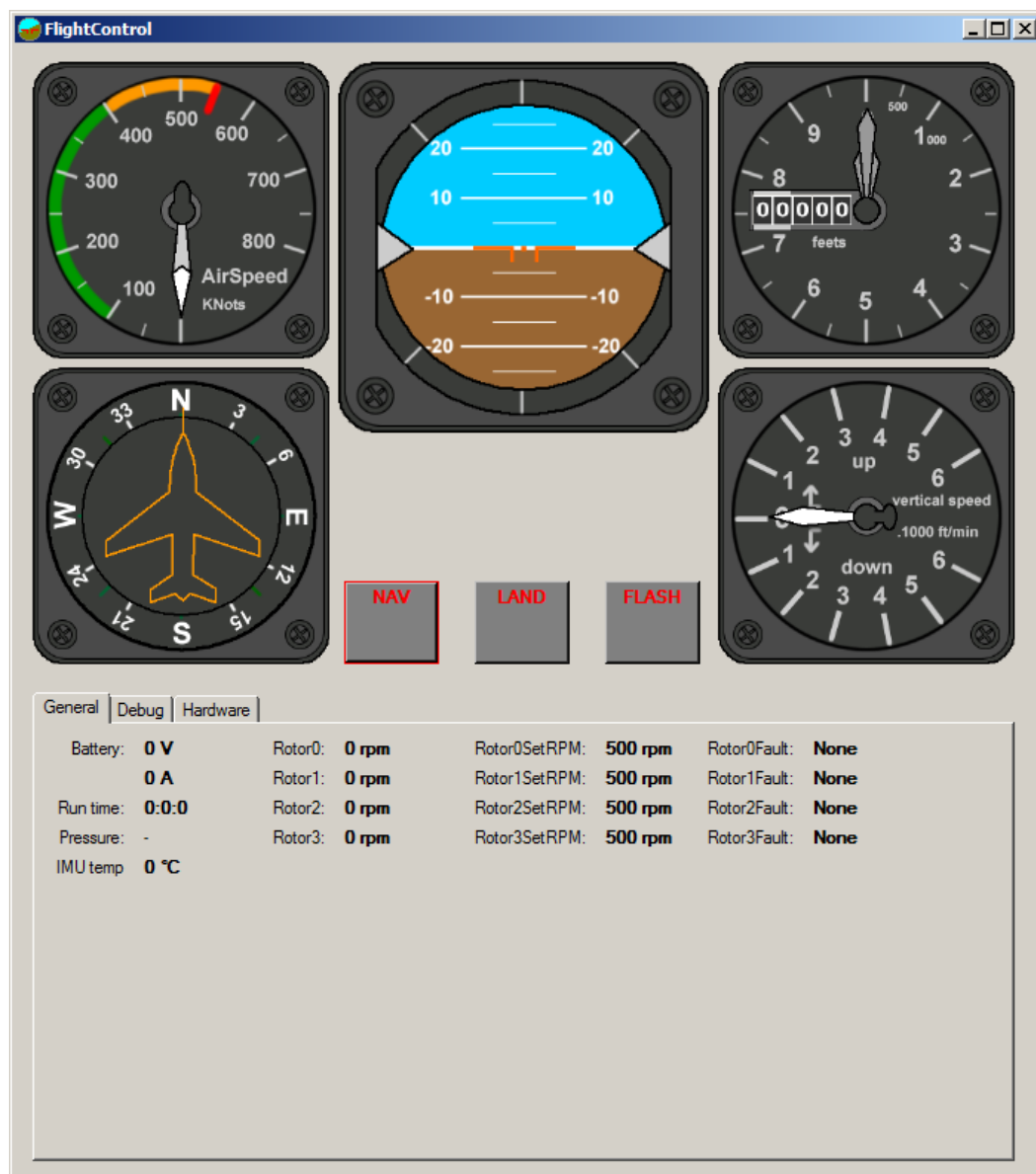
Zdrojový kód 4.2: Definice proměnných pro diagnostiku přenášené ze stroje do PC.

```

1 typedef struct {
2     uint32 Mode;
3     uint32 Throttle;
4     uint32 SteeringZ;
5     uint32 SteeringY;
6     uint32 SteeringX;
7     uint32 Lights;
8     uint32 Rotor3RpmSet;
9     uint32 Rotor2RpmSet;
10    uint32 Rotor1RpmSet;
11    uint32 Rotor0RpmSet;
12 } fcuRxChannels_t;

```

Zdrojový kód 4.3: Definice proměnných pro dálkové řízení přenášené z PC do stroje.



Obrázek 4.20: Program FlightControl pro ovládání stroje vytvořený v jazyce C#.

Pod záložkou Debug se skrývá možnost manuálního nastavení otáček motorů. Tato možnost byla využívána ke zkouškám PID regulace otáček motorů.

## 5 Závěr

Stavba kvadrotorové helikoptéry v této velikosti a o tomto výkonu byla náročným úkolem. Konstrukce stroje začala v září roku 2013, kdy byl vytvořen křížový rám. Následoval nákup a montáž motorů s vrtulemi. S návrhem plošného spoje se započalo v prosinci roku 2013. Společně s tím probíhal výběr a nákup součástek. První prototyp plošného spoje byl vyroben a osazen v srpnu roku 2014. První osazení součástkami se potýkalo s problémy způsobené pájením, v jejichž důsledku došlo ke zničení několika procesorů. Opakované výměny procesoru způsobily mechanické poškození pájecích plošek a nepájivé masky v okolí pinů. I skrze tyto problémy bylo možno zařízení testovat. Plošný spoj byl umístěn do plastového boxu stroje. Poté byly připojeny a testovány motory. Následovalo velmi dlouhé období ladění nastavení BLDC budičů, které skončilo v únoru 2015. V nastavení budičů byla chyba, která způsobovala sporadické proražení výkonových tranzistorů BLDC měniče. Ve snaze odhalit problém byly vytvořeny další dvě revize hardwaru s odlišnými výkonovými tranzistory. Chyba, která dlouhé období znehodnocovala zařízení, spočívala v příliš malé době odpojení tranzistorů horní skupiny během překročení maximálního proudu bočníkem měniče. To mělo za následek přesycení vinutí motoru, a proto přes výkonové tranzistory tekla příliš velký proud a došlo k jejich zničení.

Společně s předchozím problémem bylo náročné nalézt způsob řešení nepřesného čtení momentálních otáček motoru. Od druhé revize plošného spoje byly pro Hallové sondy, umístěné v blízkosti rotorů, přidány čtyři vstupy společně se Schmittovými klopnými obvody. Ty zajišťují připojení k časovačům, které měří periodu mezi pulzy.

	Cena funkčního prototypu [Kč]	Náklady během vývoje [Kč]	Odhadovaná cena funkčního prototypu bez slev a vzorků [Kč]
Senzor IMU	18000	0	18000
Součástky	2000	5000	4400
Plošný spoj	2500	6000	4500
Motory	8800	0	14000
Vrtule	880	220	7000
Elektroinstalační materiál	200	300	1500
Baterie	3800	0	3800
Podvozek	400	0	400
Bezdrátová komunikace	1000	0	3500
	37580	11520	57100

Tabulka 5.1: Tabulka s finančními náklady.

Tabulka 5.1 přibližuje finanční náklady na vývoj stroje. První sloupec obsahuje částky,



které by bylo potřeba vynaložit pro stavbu koncového funkčního prototypu. Druhý sloupec obsahuje náklady, které byly vynaloženy při vývoji. Ve třetím sloupci jsou odhadované maloobchodní ceny bez slev a poskytnutých vzorků.

Největší položkou na seznamu cen je senzor IMU. Tento senzor byl zvolen nejen kvůli vynikajícím parametrům, ale též z důvodu možnosti rychlého a snadného použití, což ušetřilo mnoho cenného času. Jelikož se jedná pouze o výrobu jednoho kusu prototypu, nebyl v celkovém řešení stroje i z časových důvodů brán ohled na optimalizaci nákladů. Do cen se však promítly slevy a vzorky, které jednotliví prodejci poskytli. Firma AXI Model Motors poskytla slevu na motory 5200 Kč, firma Vrtule Fiala poskytla slevu 500 Kč na nákup vrtulí a firma Printed poskytla slevu 5000 Kč při výrobě plošných spojů. Následovaly firmy které bezplatně poskytly vzorky svých produktů. Firma Allegro Microsystems poskytla 8 kusů BLDC budičů v ceně 1920 Kč, firma Texas Instruments poskytla procesory a ostatní součástky v hodnotě 5000 Kč, firma AVX poskytla kondenzátory v hodnotě 1000 Kč a firma Epcos poskytla kondenzátory v hodnotě 2000 Kč. Ovšem ne všechny zakoupené či poskytnuté součástky byly v koncovém řešení použity.

Během dokončení psaní této práce je naprogramován software zajišťující příjem a vysílání dat pro řízení stroje, PID regulátory motorů a příjem dat ze senzorů. V současné chvíli se intenzivně pracuje na implementaci řízení navrženým Bc. Zdeňkem Boučkem z Katedry kybernetiky Fakulty aplikovaných věd na Západočeské univerzitě v Plzni.

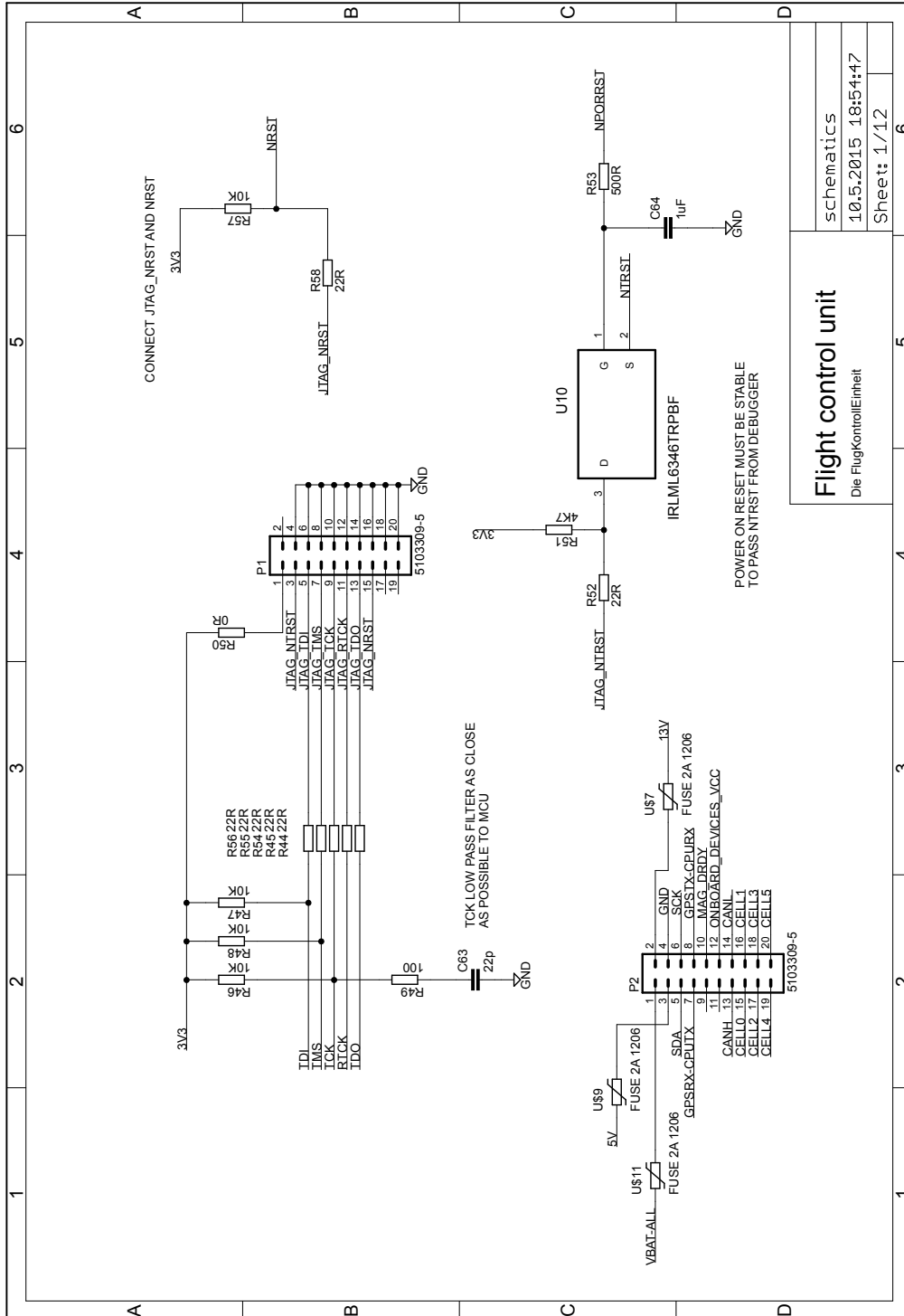
Práce nabízí řešení ve formě odladěné platformy i pro jiné stroje podobného typu. Se čtyřmi výkonnými BLDC měniči, Ethernetem, CAN budičem a procesorem s bezpečnostním jádrem poskytuje jistou univerzálnost. Díky komunikačním rozhraním je možné přidat obvody s dalšími BLDC měniči, měřícími zařízeními environmentálních hodnot, kamerou atd.

Stavbu řídicí jednotky pro kvadrotorovou helikoptéru lze hodnotit jako úspěšnou. Zdroje, procesor, připojené senzory a BLDC měniče pracují bez problémů. Práce měla přínos ve formě zkušenost s návrhem takto složitého obvodu. Po implementaci řízení bude práce i nadále rozšiřována.

# Literatura

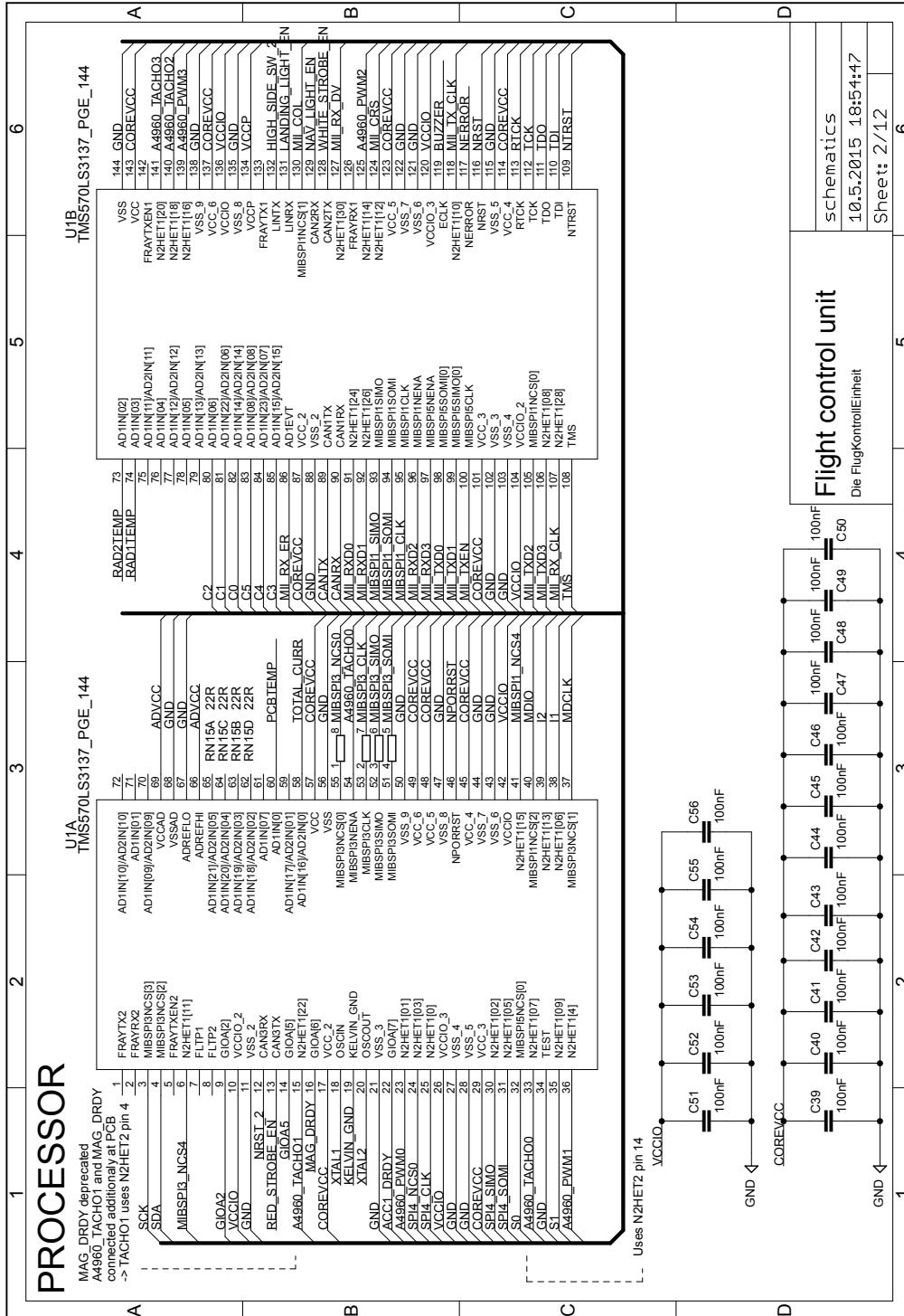
- [1] BOUČEK, Zdeněk. *Návrh simulačního modelu a řízení kvadrotorové helikoptéry*. Plzeň, 2013. Bakalářská práce (Bc.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd. Vedoucí práce Miroslav Flídr.
- [2] Allegro Microsystems, LLC. *Automotive, Sensorless BLDC Controller* [online]. 2011. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.allegromicro.com/media/Files/Datasheets/A4960-Datasheet.ashx>
- [3] International Rectifier. *IRFS7434-7PPbF* [online]. 2014. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irfs7434-7ppbf.pdf>
- [4] Texas Instruments. *TMS570LS31x/21x 16/32-Bit RISC Flash Microcontroller Technical Reference Manual* [online]. 2013. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ug/spnu499b/spnu499b.pdf>
- [5] Ministerstvo obrany Washington DC 20301. *Military Handbook Reliability prediction of electronic equipment* [online]. 1991. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://snebulos.mit.edu/projects/reference/MIL-STD/MIL-HDBK-217F-Notice2.pdf>
- [6] POLÁČEK, Libor. *Řídicí systémy pro měničové aplikace pracující v extrémních podmínkách* Plzeň, 2014. Disertační práce (Ph.D.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Jiří Hammerbauer.
- [7] Analog Devices. *Compact, Precision Six Degrees of Freedom Inertial Sensor*. 2013. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADIS16445.pdf>

## A Schéma zapojení jednotky

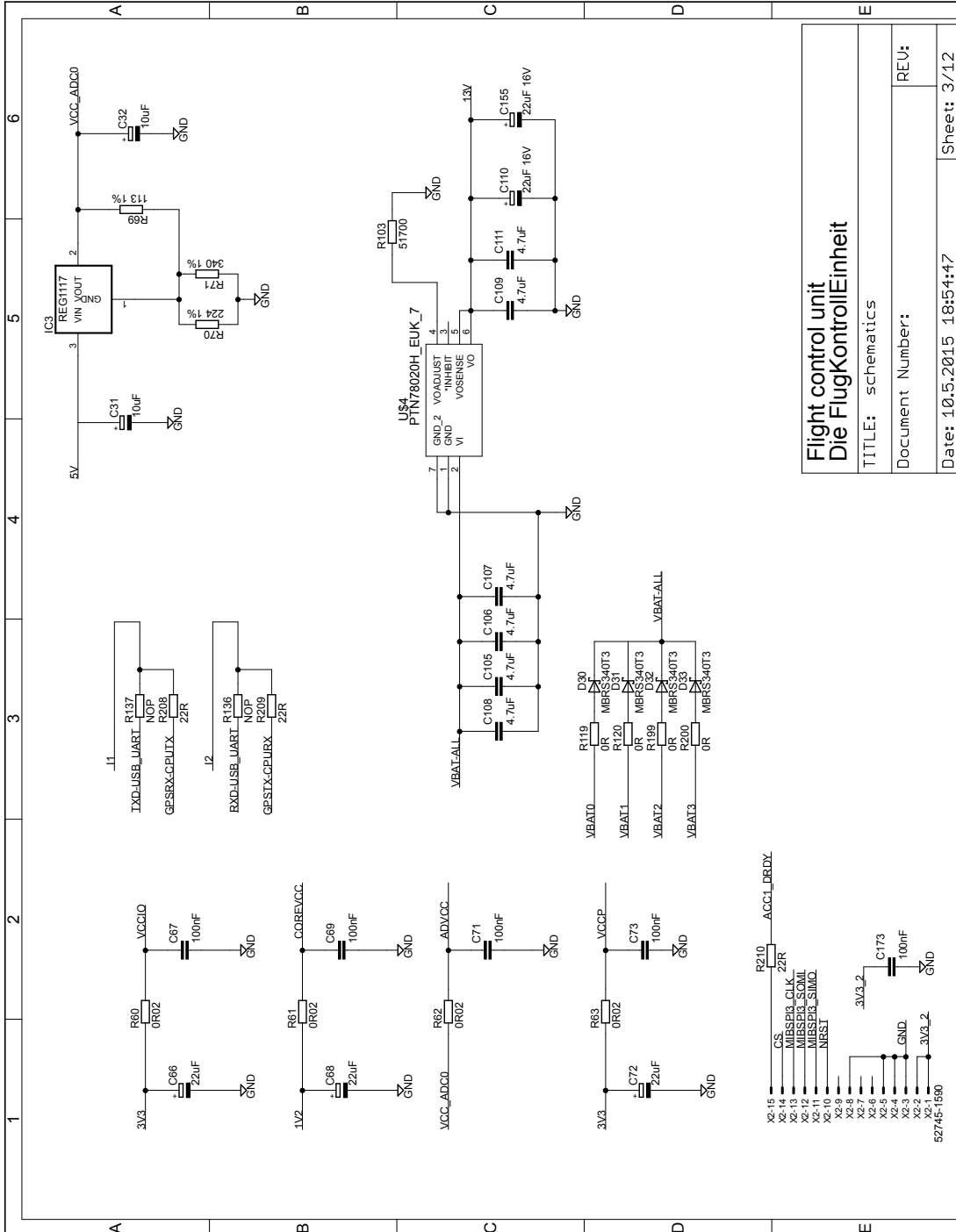


<b>Flight control unit</b>	
Die Flugkontroll-Einheit	
Schematics	6
10.5.2015 18:54:47	5
Sheet: 1/12	4

Obrázek A.1: Schéma řídicí jednotky, list 1.

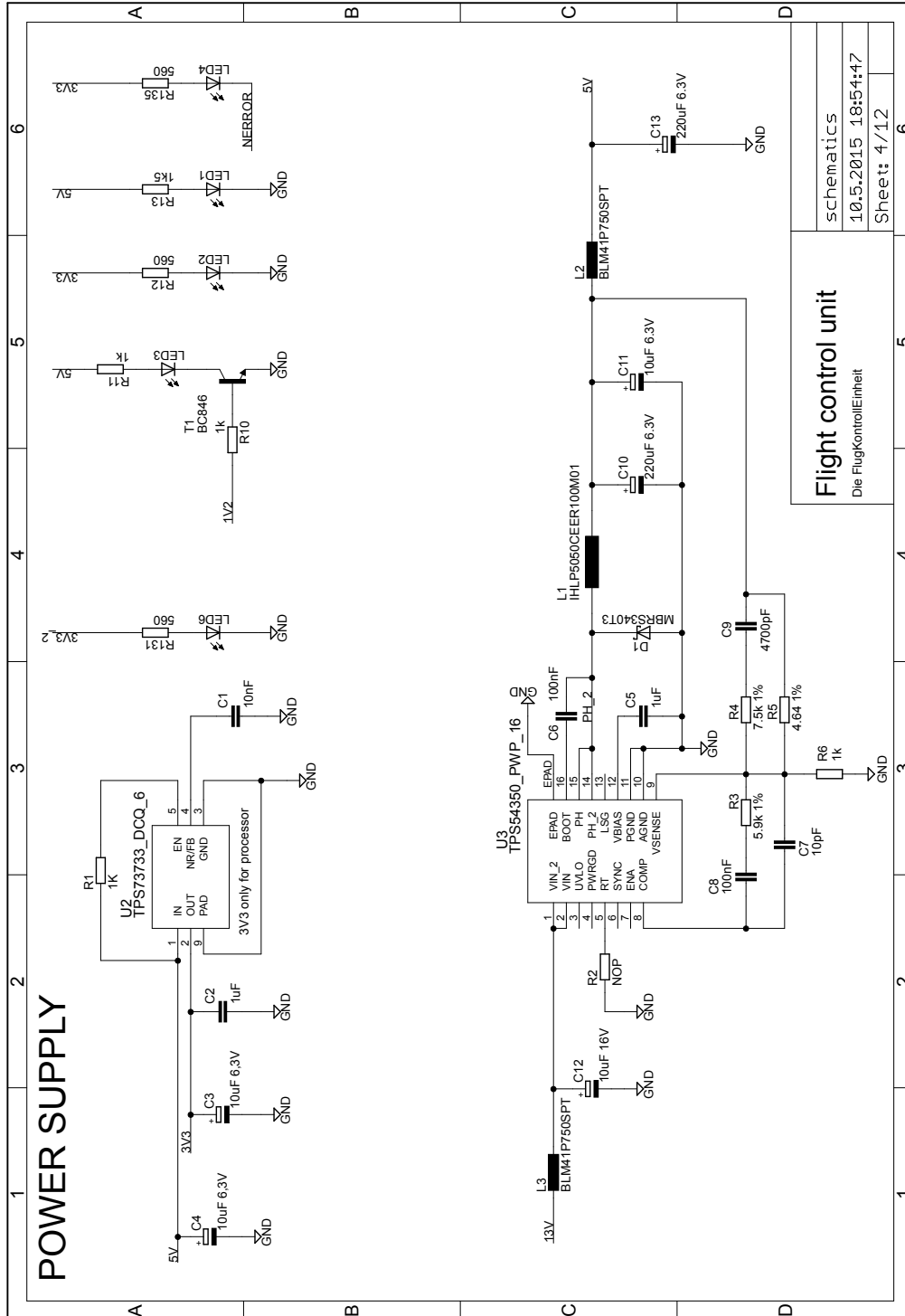


Obrázek A.2: Schéma řídicí jednotky, list 2.

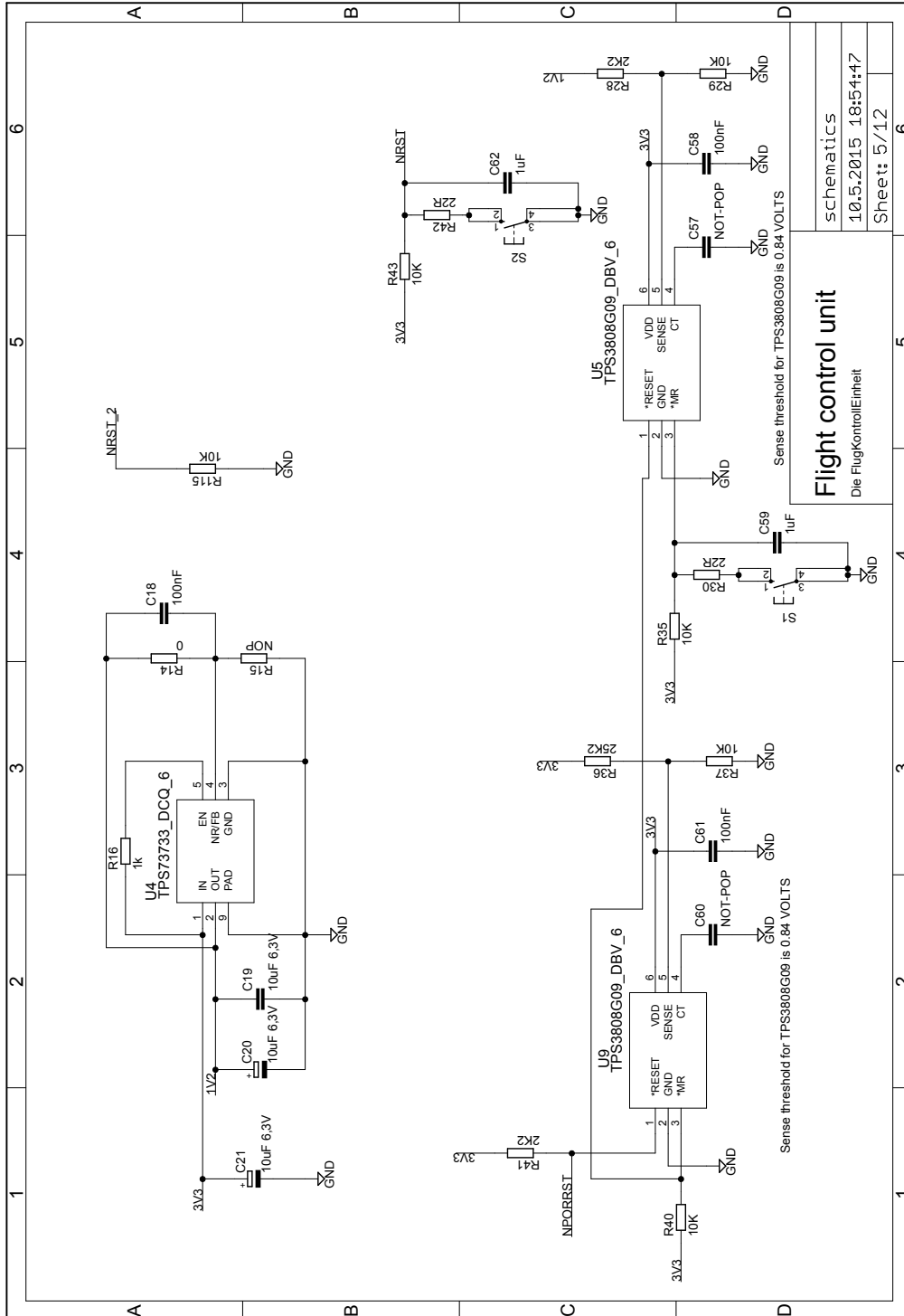


<b>Flight control unit</b> <b>Die FlugkontrollEinheit</b>	
TITLE: schematics	
Document Number:	
REV:	
Date: 10.5.2015 18:54:17	Sheet: 3/12

Obrázek A.3: Schéma řídicí jednotky, list 3.

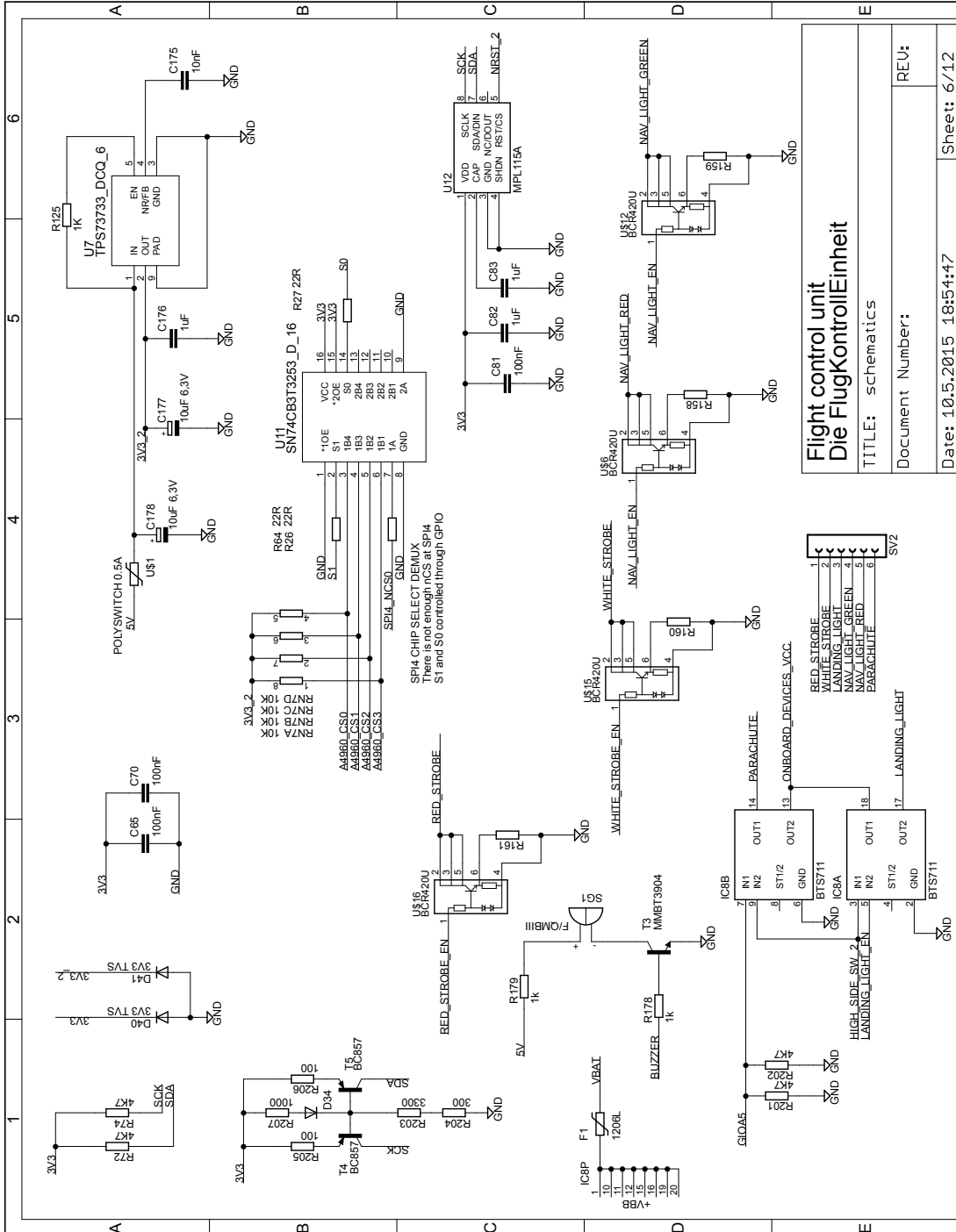


Obrázek A.4: Schéma řídicí jednotky, list 4.

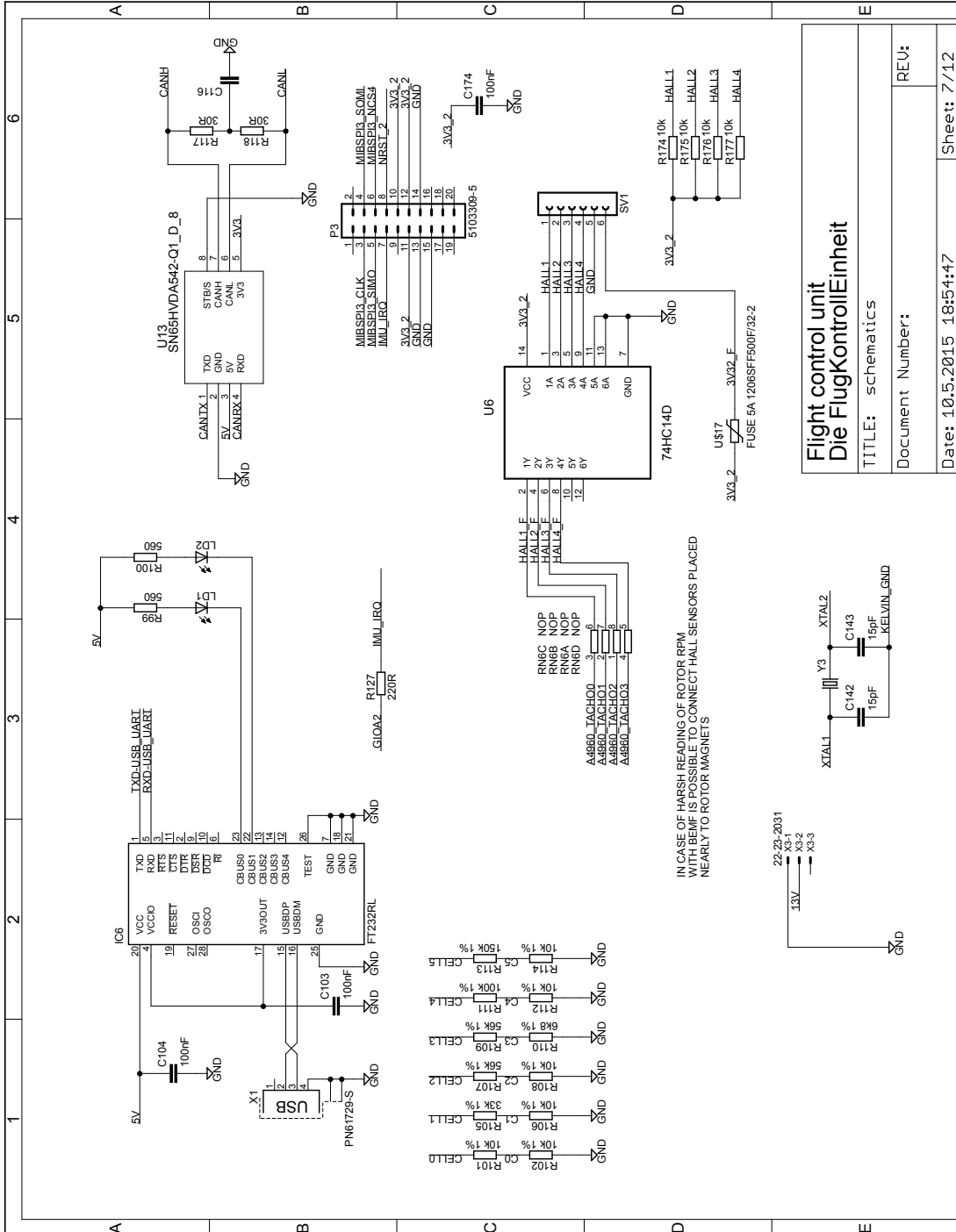


Obrázek A.5: Schéma řídicí jednotky, list 5.



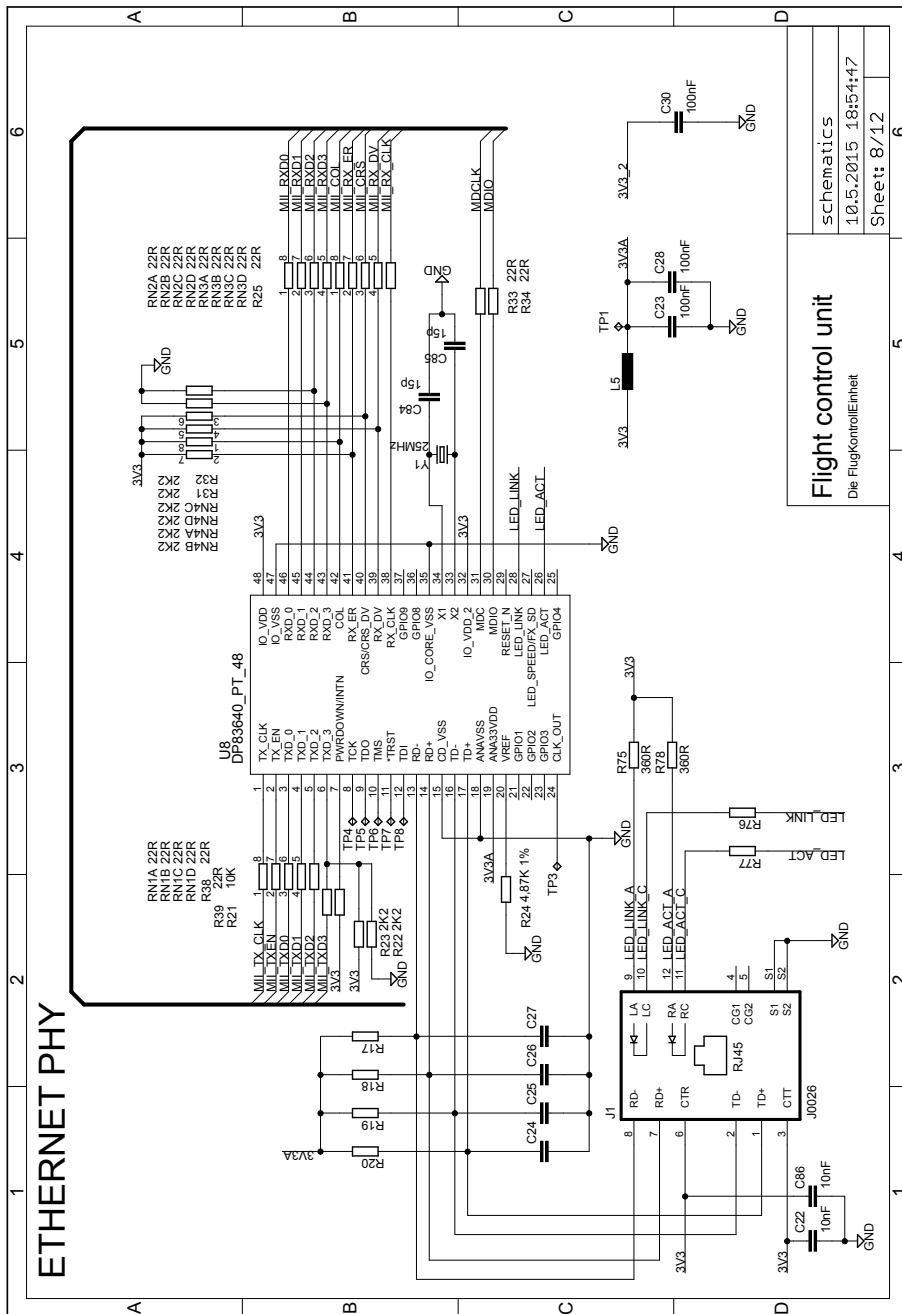


Obrázek A.6: Schéma řídicí jednotky, list 6.

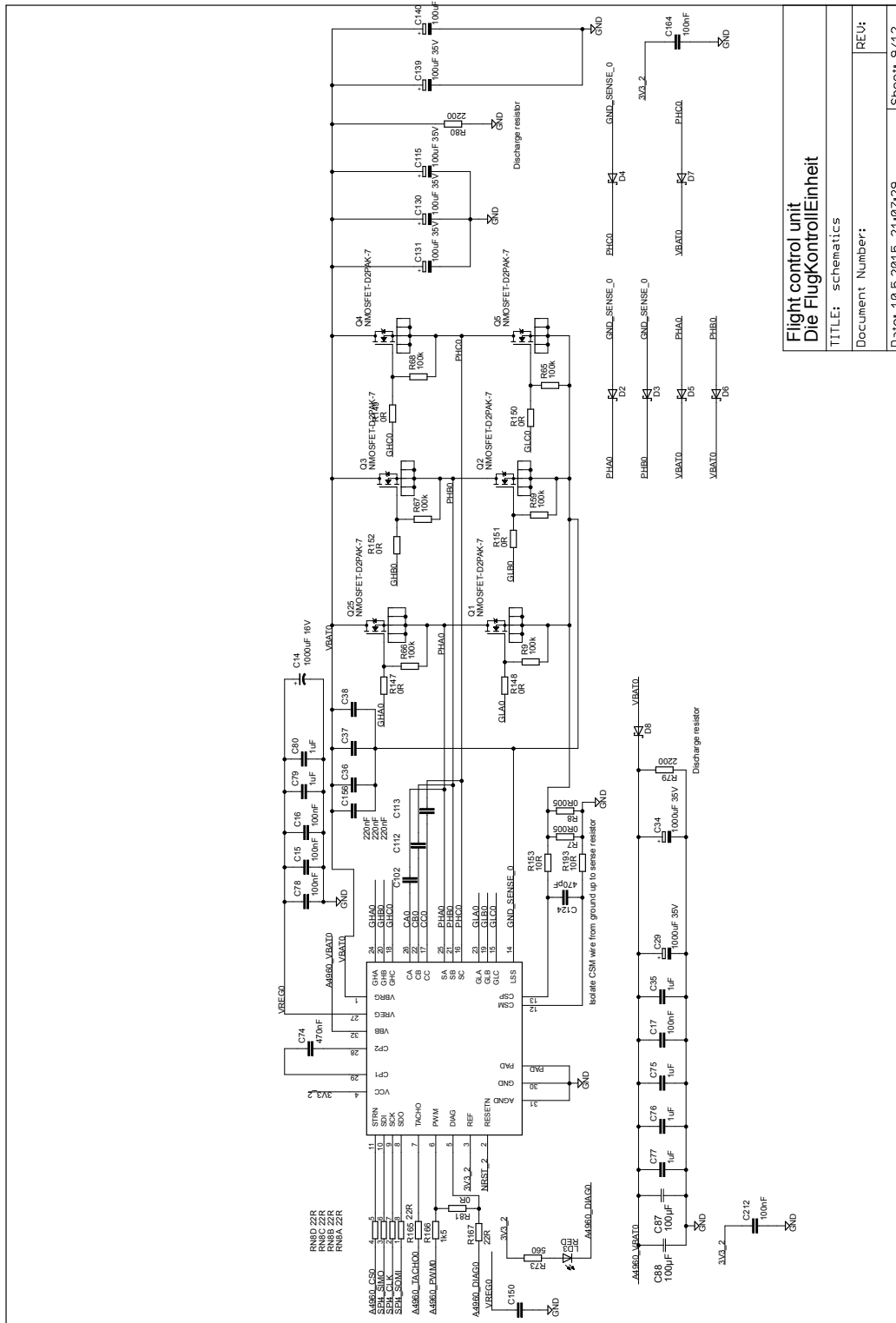


**Flight control unit**  
**Die Flugkontroll-Einheit**  
 TITLE: schematics  
 Document Number: REV:  
 Date: 10.5.2015 18:54:17  
 Sheet: 7/12

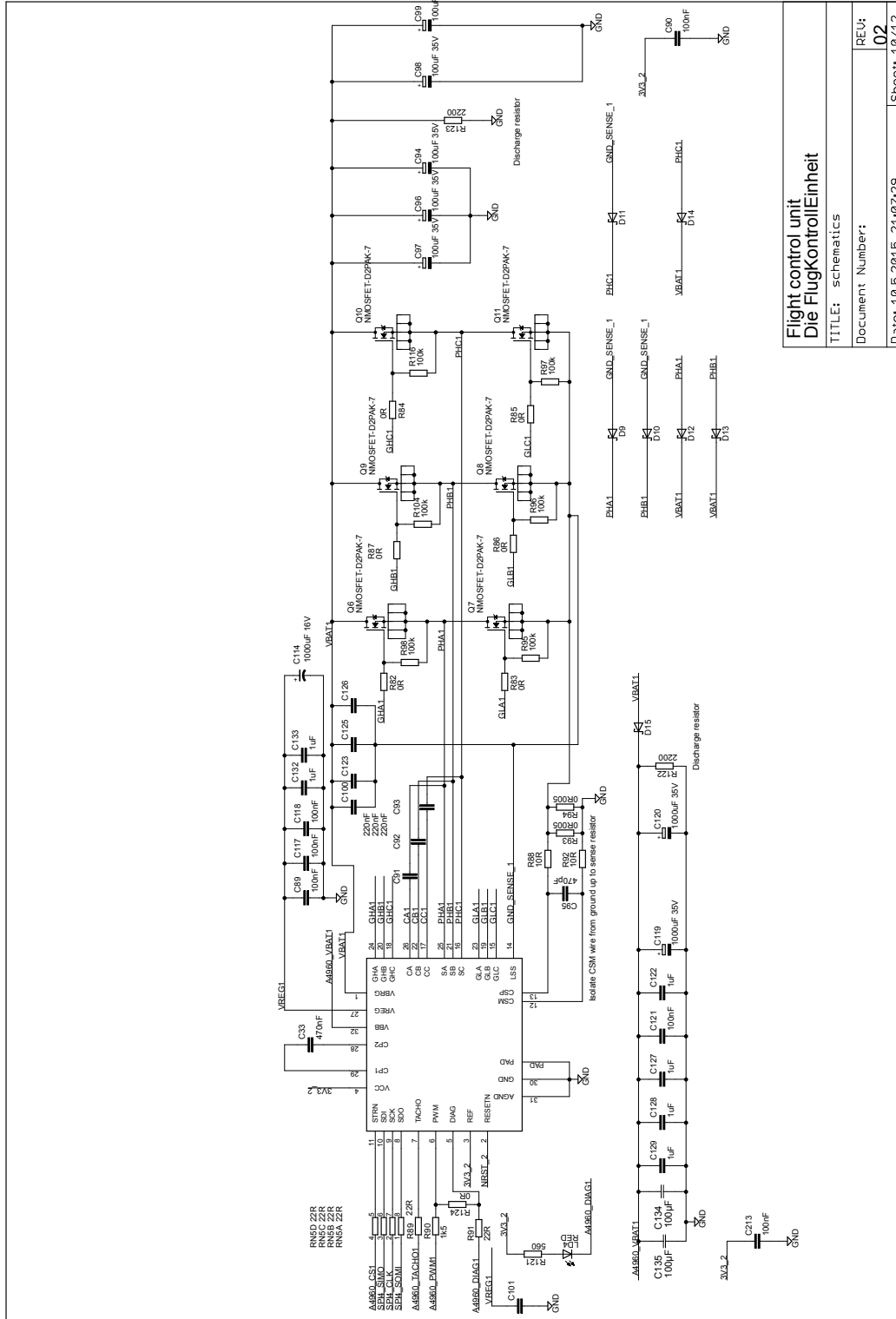
Obrázek A.7: Schéma řídicí jednotky, list 7.



Obrázek A.8: Schéma řídicí jednotky, list 8.



Obrázek A.9: Schéma řídicí jednotky, list 9.



**Flight control unit  
Die FlugkontrollEinheit**

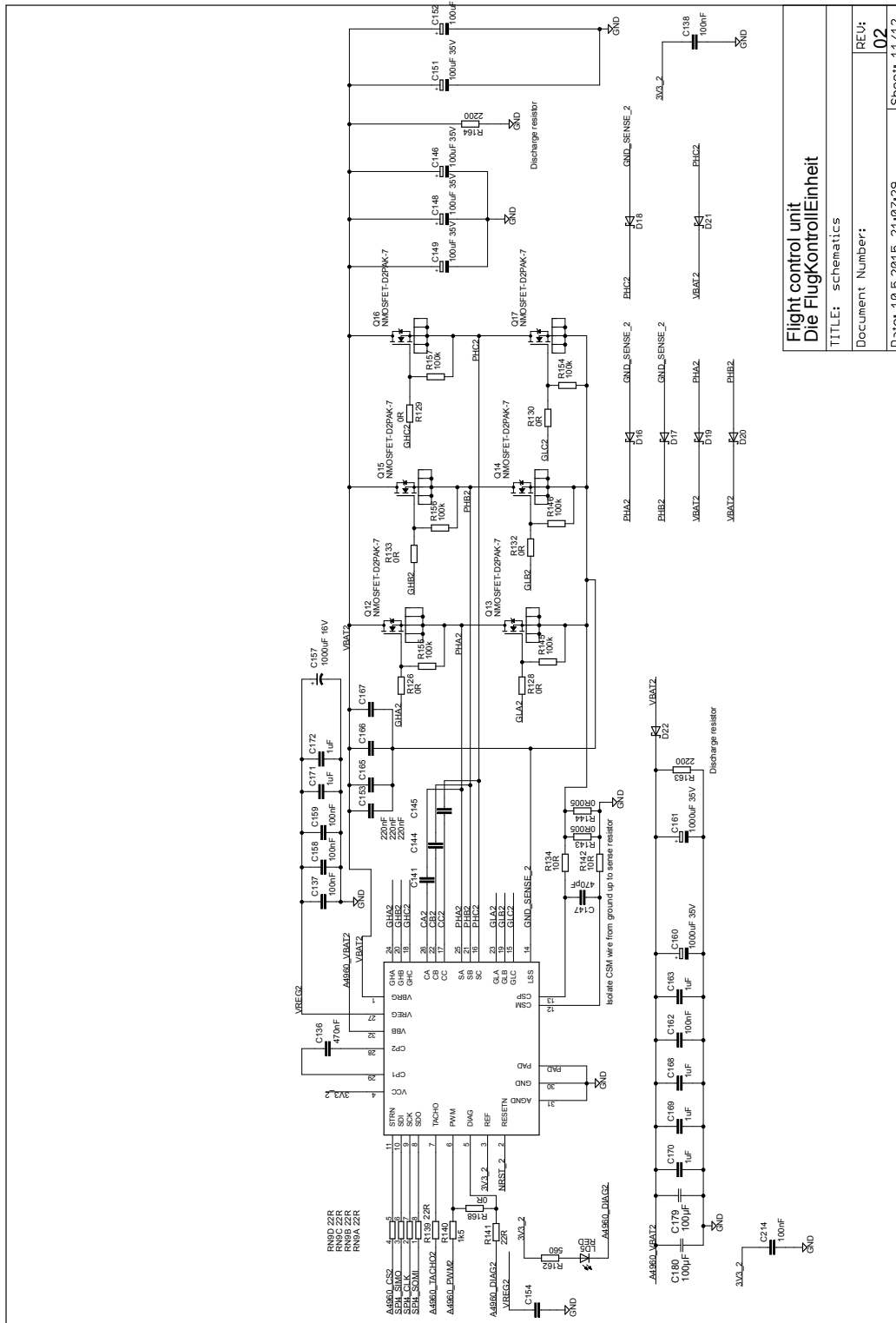
TITLE: schematics

Document Number:

REV: 02

Date: 10.5.2015 21:07:29 Sheet 10/12

Obrázek A.10: Schéma řídící jednotky, list 10.



**Flight control unit  
Die FlugkontrollEinheit**

TITLE: schematics

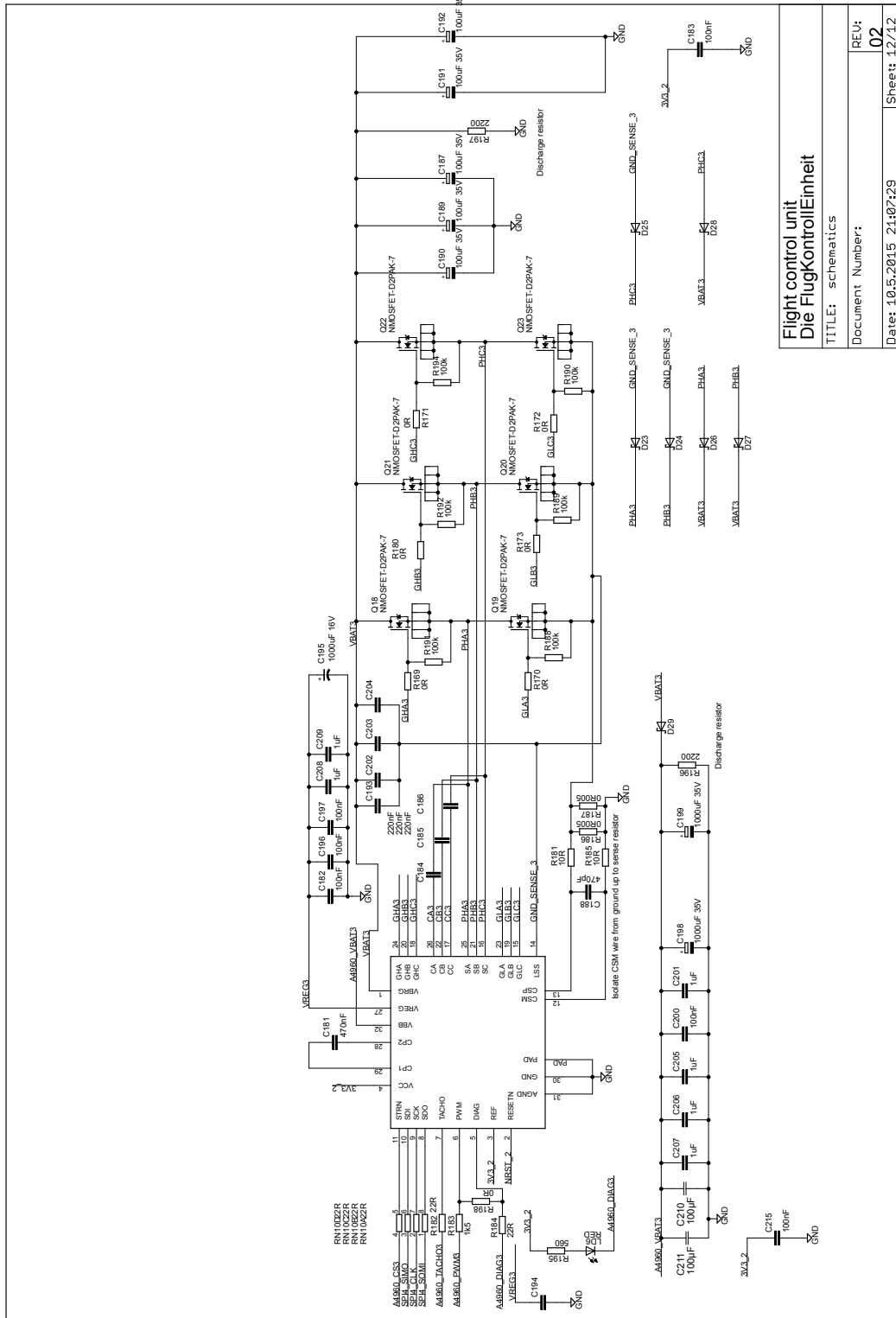
Document Number:

REV: 02

Date: 10.5.2015 21:07:29

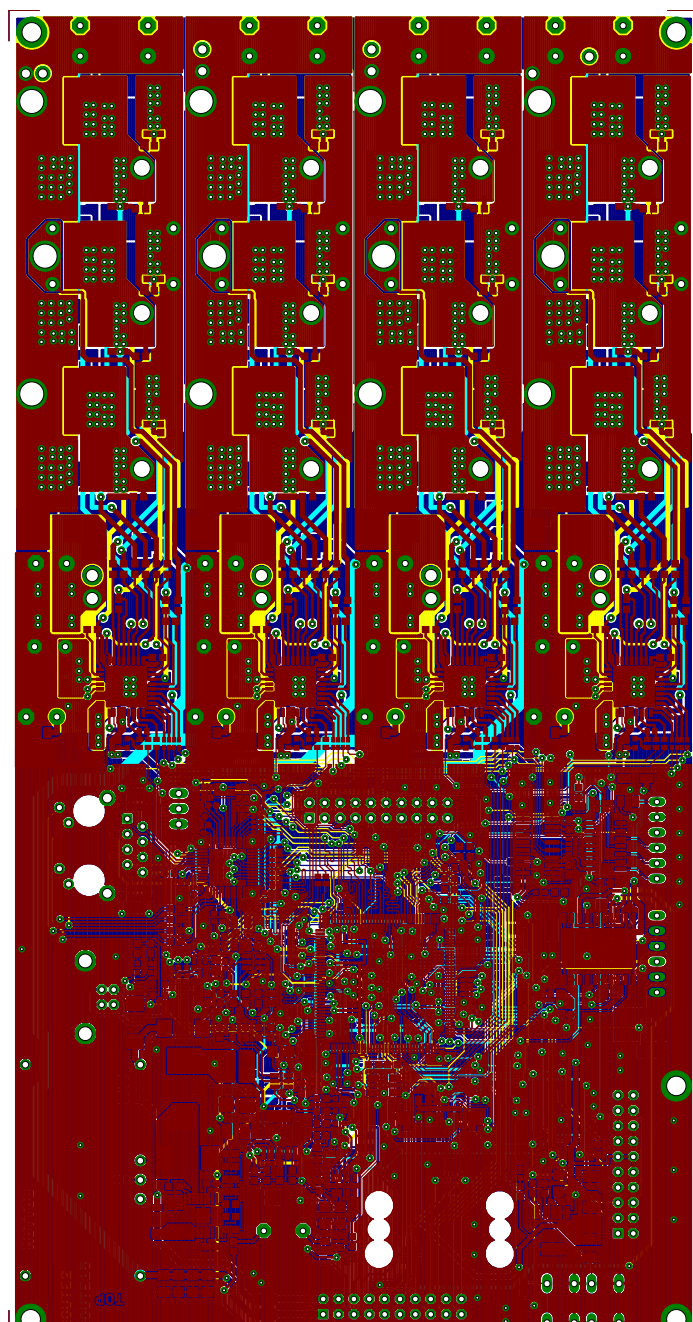
Sheet 11/12

Obrázek A.11: Schéma řídicí jednotky, list 11.



Obrázek A.12: Schéma řídicí jednotky, list 12.

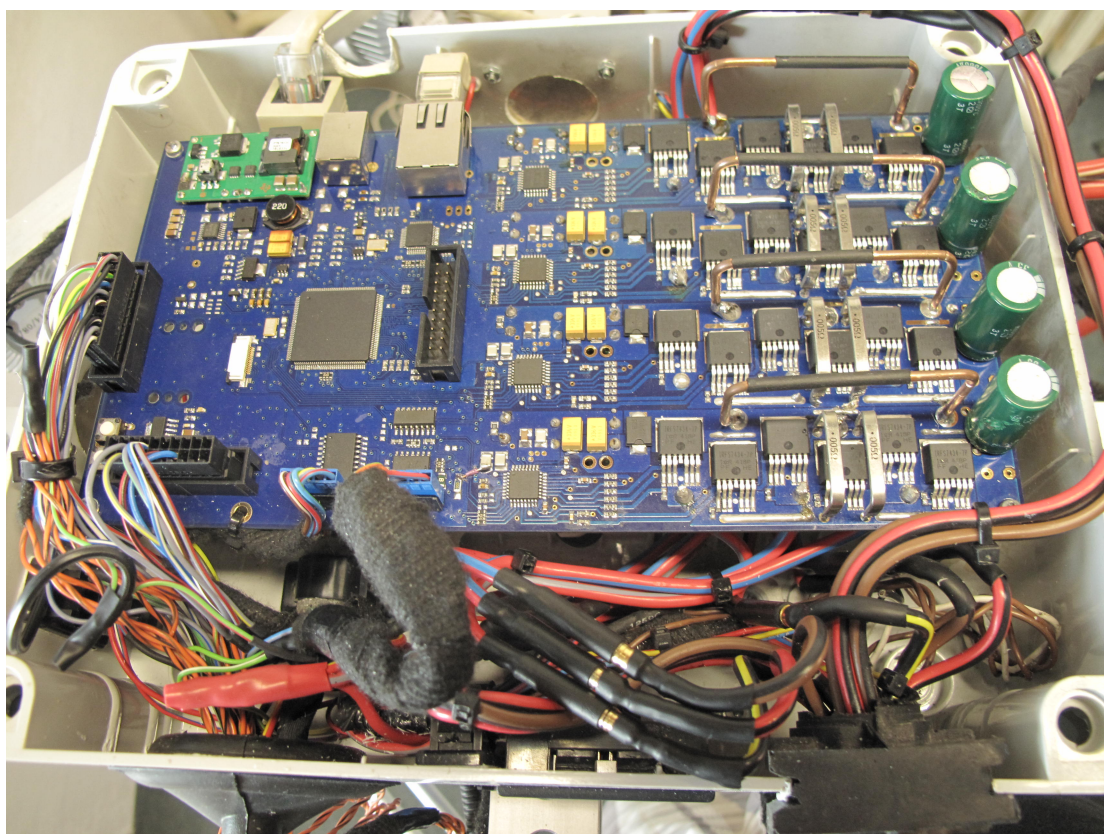
## B Plošný spoj



Obrázek B.1: Plošný spoj řídicí jednotky.

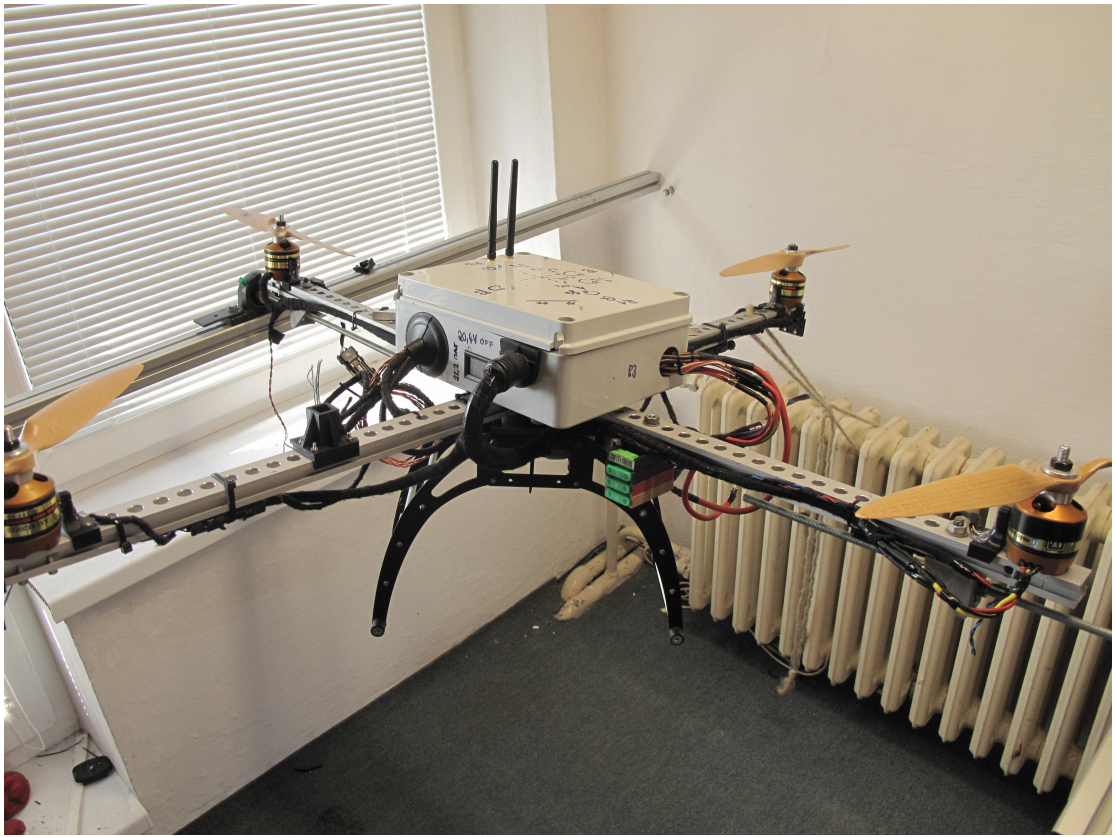


## C Fotografie



Obrázek C.1: Detail plošného spoje řídicí jednotky pro řízení kvadrotorové helikoptéry, který je umístěný v elektroinstalačním boxu stroje.





Obrázek C.2: Kvadrotorová helikoptéra připevněná na testovacím stanovišti.



Obrázek C.3: Kvadrotorová helikoptéra.