



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 STEJNOSMĚRNÉHO ELEKTROMOTORU

DC MOTOR DRIVER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petra Slotová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zdeněk Kolka

BRNO 2023



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Studentka: Petra Slotová

ID: 228741

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Budič stejnosměrného elektromotoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte budič stejnosměrného elektromotoru 28V/1A včetně ochranných obvodů pro použití v letecké palubní síti. Budič musí umožňovat změnu směru otáčení, brzdění a detekci poruchových stavů motoru pomocí měření proudu (přerušení vodičů, zkrat, mechanické blokování). Při návrhu se zaměřte na splnění vybraných požadavků letecké normy RTCA/DO-160G (napájení, vyzařování vf energie, ovlivnitelnost přechodovými jevy způsobenými blesky). Analogovou část navrženého zapojení ověřte simulací. Budič navrhněte formou přípravku, který bude řízen mikroprocesorem řady ARM na univerzální vývojové desce.

Navrhněte desku plošného spoje a přípravek realizujte. Vytvořte ovládací software, který umožní řízení pomocí sériové konzoly. Ověřte činnost včetně detekce poruchových stavů a dosažené výsledky zhodnotte.

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. New York: Cambridge University Press, 2015.

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 29.5.2023

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zdeněk Kolka

doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.
předseda rady studijního programu

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

Bakalářská práce se věnuje návrhu budiče stejnosměrného elektromotoru 28V/1A pro použití v letecké palubní síti. Při návrhu se bere ohled zejména na RTCA normu. Zařízení je navrženo jako H-můstek s blokem pro napájení, logickou částí a ochrannými obvody. Následně se práce věnuje návrhu DPS, naprogramování softwaru pro řízení motoru a samotnému oživení přípravku.

KLÍČOVÁ SLOVA

motor, RTCA, zařízení, letecká palubní síť, DPS

ABSTRACT

The bachelor's thesis is dedicated to design of a DC motor driver 28V/1A for use in an aircraft on-board network. The design takes into account the RTCA standard. The device is designed as an H-bridge with a block for power, logic and protection circuits. Subsequently, the thesis is devoted to the design of the PCB, the programming of the software for controlling the motor and the revival of the device itself.

KEYWORDS

motor, RTCA, device, aircraft on-board network, PCB

SLOTOVÁ, Petra. *Budič stejnosměrného elektromotoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2023, 65 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zdeněk Kolka

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora:	Petra Slotová
VUT ID autora:	228741
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2022/23
Téma závěrečné práce:	Budič stejnosměrného elektromotoru

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 autorka uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského 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.

Brno

.....

podpis autorky*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu bakalářské práce panu prof. Dr. Ing. Zdeňku Kolkovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	12
1 Stejnosměrný motor s permanentním magnetem	13
1.1 Model motoru	14
1.2 Určení parametrů motoru ATAS P2HH470	15
1.3 Identifikace modelu	17
1.3.1 Ustálený stav	17
1.3.2 Výpočet parametrů pomocí programu MATLAB	18
1.3.3 Implementace modelu v PSpice	19
2 Požadavky letecké normy RTCA/DO-160G na budič	22
2.1 Napájení	22
2.1.1 Normální provozní podmínky	22
2.1.2 Abnormální provozní podmínky	23
2.2 Vedené emise vysokofrekvenční energie	24
2.3 Přechodové děje způsobené blesky	25
3 Návrh budiče	28
3.1 Návrh můstku	28
3.1.1 Napájení budiče můstku	30
3.2 Ochranné obvody	32
3.2.1 Porovnání zesilovačů	32
3.2.2 Návrh detekčních obvodů	33
3.2.3 Zdroj referenčního napětí	37
3.2.4 Simulace ochranného obvodu	38
3.3 Návrh ochrany vstupů	39
3.4 Logická část obvodu	41
4 Realizace budiče a vytvoření softwaru	43
4.1 Návrh DPS	43
4.2 Ovládací software	45
4.2.1 Ovládání pomocí tlačítek	45
4.2.2 Komunikace po sériové lince	46
4.3 Osazení desky	47
5 Oživení a měření budiče	49
5.1 Výsledky měření	49

Závěr	53
Literatura	54
Seznam použitých skratek	56
A Zdrojový kód pro MATLAB	57
B Návrh budiče	59
C Provedení plošního spoje	61
D Osazovací plán DPS	62
E Seznam součástek	63

Seznam obrázků

1	Blokové schéma budiče	12
1.1	Stejnoseměrný motor s permanentními magnety	13
1.2	Náhradní schéma PMDC motoru	14
1.3	Schéma měřicího přípravku	15
1.4	Pracoviště pro měření parametrů motoru	16
1.5	Oscilogram pro napájecí napětí 28V	17
1.6	Průběh po odstranění zákmitů pro napájecí napětí 28 V	18
1.7	Schéma náhradního obvodu motoru a schéma pro simulaci naměřených dat	20
1.8	Průběh proudu při rozběhu motoru z nulových otáček pro napájecí napětí 28 V	20
1.9	Průběh proudu při rozběhu motoru z nulových otáček pro napájecí napětí 18 V	20
1.10	Průběh proudu při rozběhu motoru z nulových otáček pro napájecí napětí 12 V	21
2.1	Typické abnormální charakteristiky stejnosměrného přepětí	23
2.2	Maximální úroveň vedeného vysokofrekvenčního rušení - napájecí vedení	24
2.3	Maximální úroveň vedeného vysokofrekvenčního rušení - propojovací vedení	25
2.4	Tvar vlny 1 pro proud	26
2.5	Tvar vlny 2 pro napětí	26
2.6	Tvar vlny 3 pro napětí/proud	27
3.1	Blokové schéma celého systému	28
3.2	Zapojení H-můstku	29
3.3	Zapojení tranzistoru MOSFET	29
3.4	Simulace náběžné hrany tranzistoru	30
3.5	Průběh proudu a výkonu tranzistorem	31
3.6	Plovoucí zdroj napětí	31
3.7	Vnitřní zapojení obvodu INA293	33
3.8	Zapojení zesilovače INA293-A1 spolu s komparátory	34
3.9	Průběh napětí po zesílení zesilovačem INA293	34
3.10	Průběh proudu v závislosti na čase pro napájecí napětí 28 V	35
3.11	Náhradní schéma	36
3.12	Nastavení referenčního napětí	37
3.13	Schéma ochranného obvodu pro simulaci	38
3.14	Průběh napětí na výstupu komparátorů při hodnotě napětí do 3,5 V .	39
3.15	Průběh napětí na výstupu komparátorů při hodnotě napětí nad 3,5 V	39

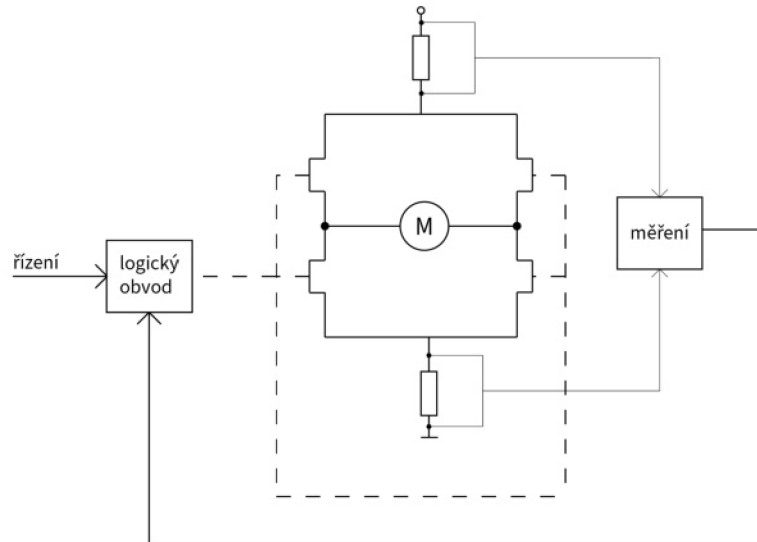
3.16	Princip funkce transilu	40
3.17	Schematické zapojení logické části	41
3.18	Zapojení logické části pomocí elementárních hradel NAND	42
3.19	Signál sd při hodnotě napětí do 3,5 V	42
3.20	Signál sd při hodnotě napětí do 3,5 V - zoom	42
3.21	Signál sd při hodnotě napětí nad 3,5 V	42
4.1	Návrh DPS budiče	43
4.2	Top vrstva budiče	44
4.3	Bottom vrstva budiče	45
4.4	Nastavení pinů v prostředí STM32CubeMX	46
4.5	Zobrazení vykonaných příkazů v programu PuTTY	47
4.6	Osazená deska - strana TOP	48
4.7	Osazená deska - strana BOTTOM	48
5.1	Pracoviště pro měření budiče	49
5.2	Průběh napětí na výstupu zesilovače INA293A1	50
5.3	Náběžná hrana na výstupu budiče na portu OP	50
5.4	Náběžná hrana na výstupu budiče na portu CL	51
5.5	Náběžná hrana na výstupu tranzistoru	51
5.6	Sestupná hrana na výstupu tranzistoru	52
5.7	Náběžní hrana na výstupu bridge	52
C.1	Strana top	61
C.2	Strana bottom	61
D.1	Strana top	62
D.2	Strana bottom	62

Seznam tabulek

1.1	Přehled hodnot parametrů motoru	19
2.1	Napájecí napětí při normálních provozních podmínkách [4]	22
2.2	Napájecí napětí při abnormálních provozních podmínkách [4]	23
2.3	Hodnoty testovacího napětí a proudu pro výboj do pinu [4]	25
3.1	Porovnání typů zesilovačů	33

Úvod

Cílem této práce je navrhnout budič elektromotoru, včetně ochranných obvodů pro použití v letecké palubní síti. Zařízení bude napájeno 28 V a realizováno pomocí H-můstku.



Obr. 1: Blokové schéma budiče

Návrh musí umožňovat detekci stavu motoru pomocí měření proudu v případě přerušení vodičů či zkratu. Samotný návrh, jak lze vidět z blokového schématu 1, bude tedy sestaven z H-můstku, bloku pro napájení, logické části obvodu a ochranných obvodů. Jelikož se zařízení bude používat v letadlech, je zapotřebí brát ohled na některé ustanovení dané leteckou RTCA/DO160-G normou, která přísně stanovuje podmínky, za kterých je zařízení povoleno použít.

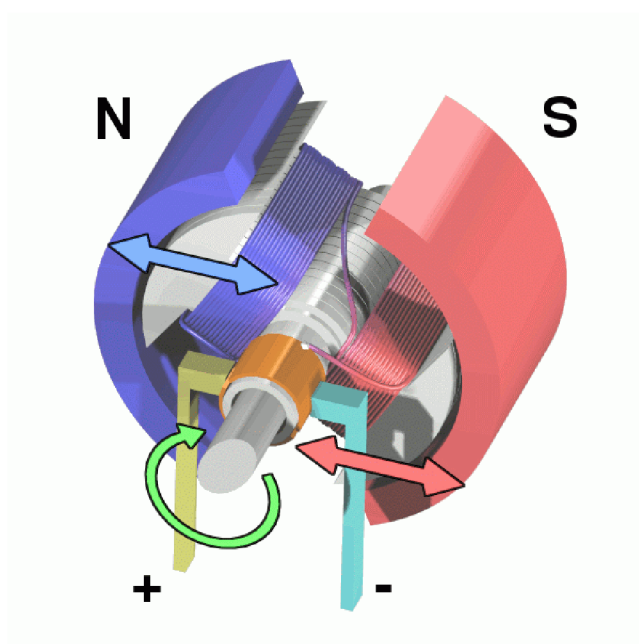
H-můstek je sestaven ze čtyř spínačů, pomocí kterých přepíná polaritu napětí aplikovaného na zátěž. To slouží ke změně směru otáčení motoru či k jeho brzdění.

Správnou funkci analogové části je potřeba ověřit simulací. Obvody budou odsimulovány v programu PSpice.

Celkový návrh přípravku a návrh DPS bude realizován pomocí programu Eagle. Deska se bude realizovat jako čtyřvrstvá. K řízení budiče bude použit mikroprocesor od firmy STMicroelectronics, pomocí kterého budou realizovány základní požadavky na chod motoru ATAS P2HH470, pro který byl budič navrhován.

1 Stejnospěrný motor s permanentním magnetem

Stejnospěrný motor s permanentním magnetem, neboli zkráceně PMDC motor, přeměňuje energii elektrickou na mechanickou. Sestává ze dvou hlavních částí, statoru a rotoru, přičemž jeden z nich musí být elektromagnet. Z obr. 1.1 lze vidět princip fungování motoru, kde magnety, které vytváří magnetické pole jsou umístěné na obvodu válce. Točivý moment, který rozpohybováva chod motoru vzniká na základě přitahujících a odpuzujících se sil pólů magnetů, což je znázorněno barevnými šipkami.



Obr. 1.1: Stejnospěrný motor s permanentními magnety [2]

1.1 Model motoru

Ekvivalentní model na obrázku 1.2 níže popisuje základní mechanické i elektrické chování motoru. Pro stejnosměrný motor lze vycházet z následujících rovnic [3].

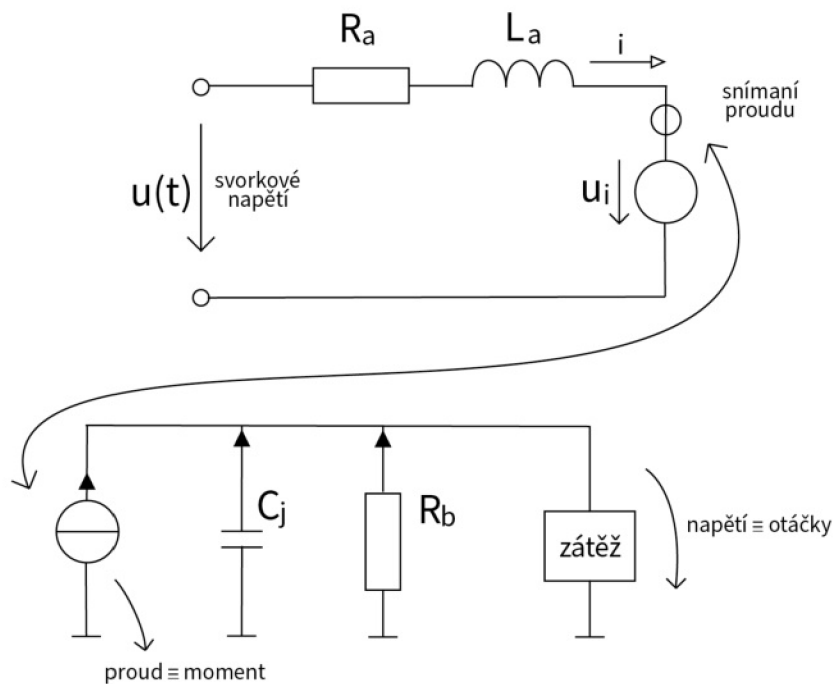
$$u_i = K \cdot \omega \quad (1.1)$$

$$m = K \cdot i \quad (1.2)$$

Když se rotor otáčí úhlovou rychlostí ω , která je dána vztahem

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f, \quad (1.3)$$

vzniká indukované protielektrické napětí u_i . Jelikož zde působí magnetický tok i proud, dochází k vytvoření indukovaného momentu m , který je popsán konstantou motoru K a proudem vinutím rotoru i . Náhradní schéma 1.2 je možné popsat dvěma diferenciálními rovnicemi.



Obr. 1.2: Náhradní schéma PMDC motoru

První je rovnice pro elektrickou stranu modelu 1.4, kde R_a, L_a jsou parametry vynutí, z čehož vychází i první část schématu 1.2.

Druhá je rovnice momentová 1.5, kde J je moment setrvačnosti a $B \cdot \omega$ je mechanický moment v důsledku vlastního tření. Poslední proměnnou $m_z(\omega)$ je moment

odebíraný mechanickou zátěží, který je v tomhle případě nulový, jelikož se motor točil naprázdno.

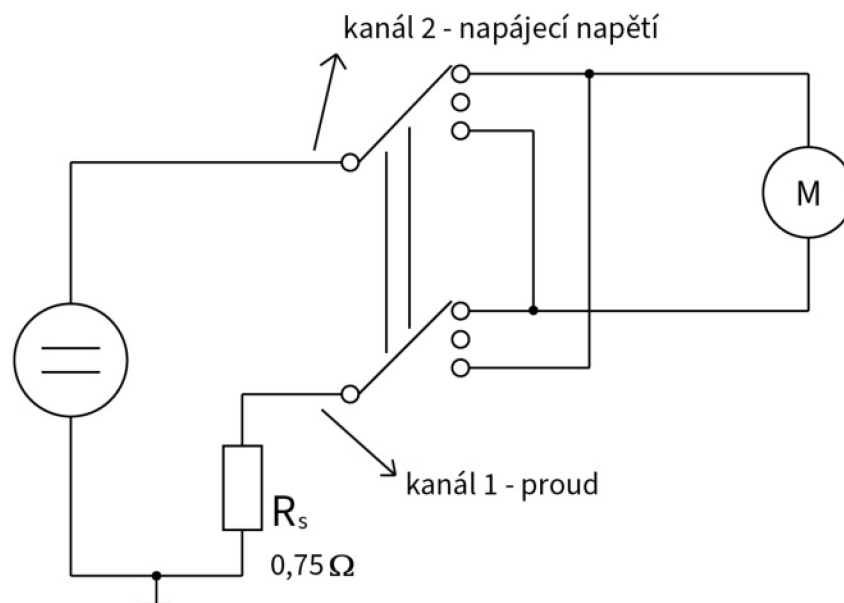
$$u(t) = R_a \cdot i + L_a \cdot \frac{di}{dt} + u_i \quad (1.4)$$

$$m = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \omega + m_z(\omega) \quad (1.5)$$

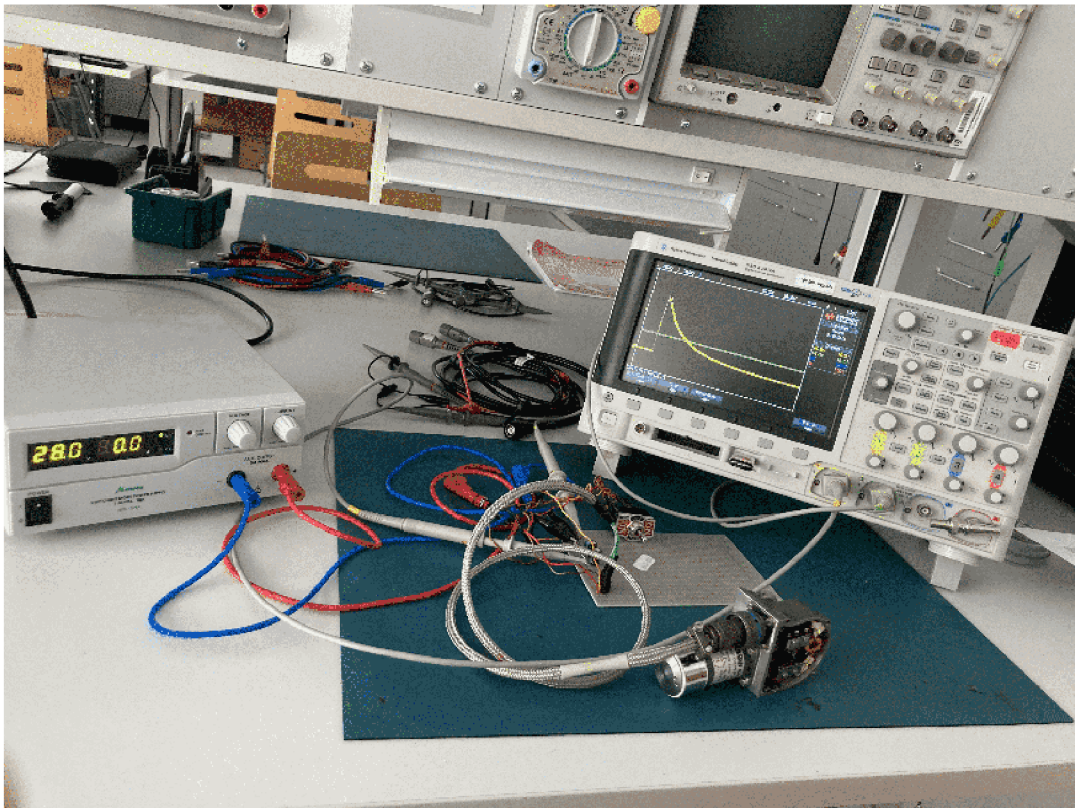
Pro spodní část schématu 1.2 se vycházelo z rovnice 1.5. Pomocí následné analogie, kdy ω odpovídá napětí a m odpovídá proudu se přijde k tomu, že J bude kapacita znázorněna ve schématu jako C_j a hodnota koeficientu tření B odpovídá vodivosti $1/R_b$.

1.2 Určení parametrů motoru ATAS P2HH470

K měření parametrů motoru ATAS P2HH470 byl použit stejnosměrný napájecí zdroj, kde se volilo napětí od 8V do 28V s krokem 2V. Kanál 1 na osciloskopu byl připojen na snímání proudu po sepnutí motoru, kanál 2 na snímání napětí na vstupu. Motor byl spouštěn pomocí DPDT přepínače. Na obrázku 1.3 je zobrazeno schéma měřicího přípravku a na obr. 1.4 pak lze vidět reálné sestavené pracoviště pro měření.



Obr. 1.3: Schéma měřicího přípravku



Obr. 1.4: Pracoviště pro měření parametrů motoru

Měřením na svorkách se podařilo zjistit tyto parametry:

- $R_a = 12\Omega$,
- $L_a = 12mH$,

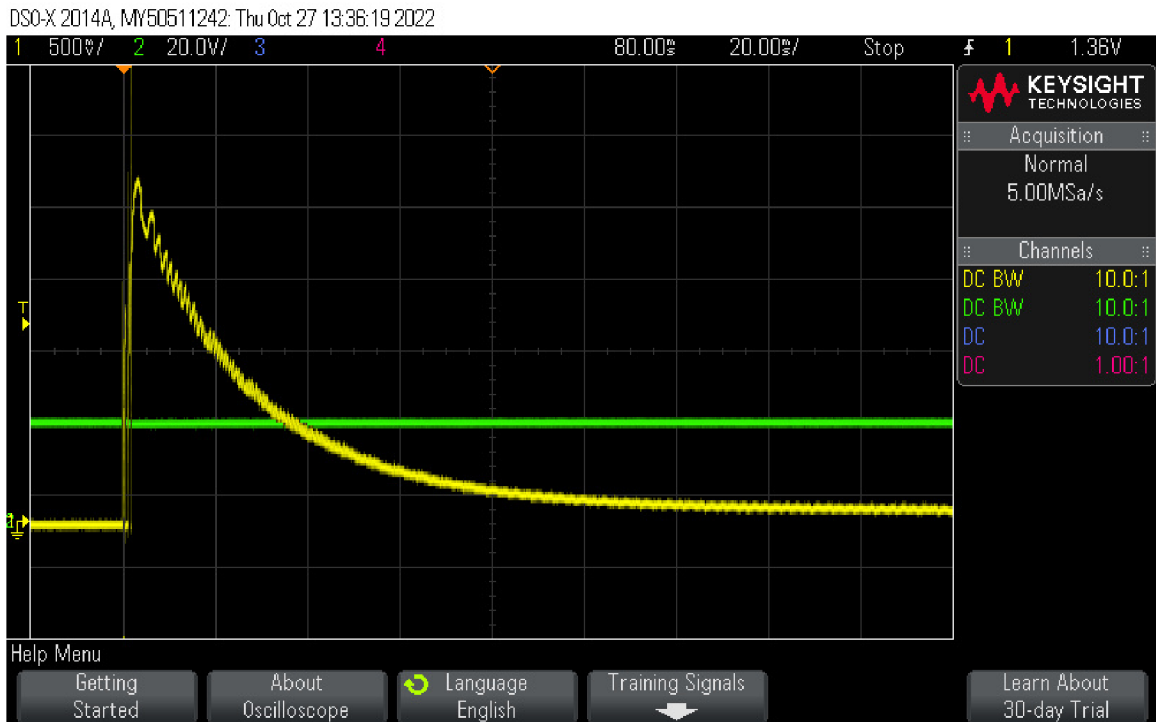
Následně, po roztočení motoru byl zjištěn ustálený proud naprázdno, bez mechanické zátěže:

- $I_{nom} = 145mA$,

Počet otáček za minutu je štítkový údaj daný výrobcem:

- $n_{nom} = 5000ot/min.$

Na oscilogramu, viz. obr. 1.5, je vidět změřený průběh pro napětí 28 V. Při měření zde bohužel na začátku vznikly nechtěné zákmity, které byly pro další výpočty odstraněny, viz 1.6.



Obr. 1.5: Oscilogram pro napájecí napětí 28V

1.3 Identifikace modelu

1.3.1 Ustálený stav

Pro dopočítání parametrů potřebných k ustálenému stavu se volila hodnota napájecího napětí $U_{nom} = 28V$, nominální proud byl naměřen $I_{nom} = 145mA$. Dále pro ustálený stav platí, že $\frac{d}{dt} = 0$. Tím pádem jsou známy všechny potřebné hodnoty pro určení konstanty motoru a koeficientu tření, které ovlivňují ustálený stav průběhu.

$$U_{nom} = R \cdot I + U_i = R_a \cdot I_{nom} + K \cdot \omega_{nom} \quad (1.6)$$

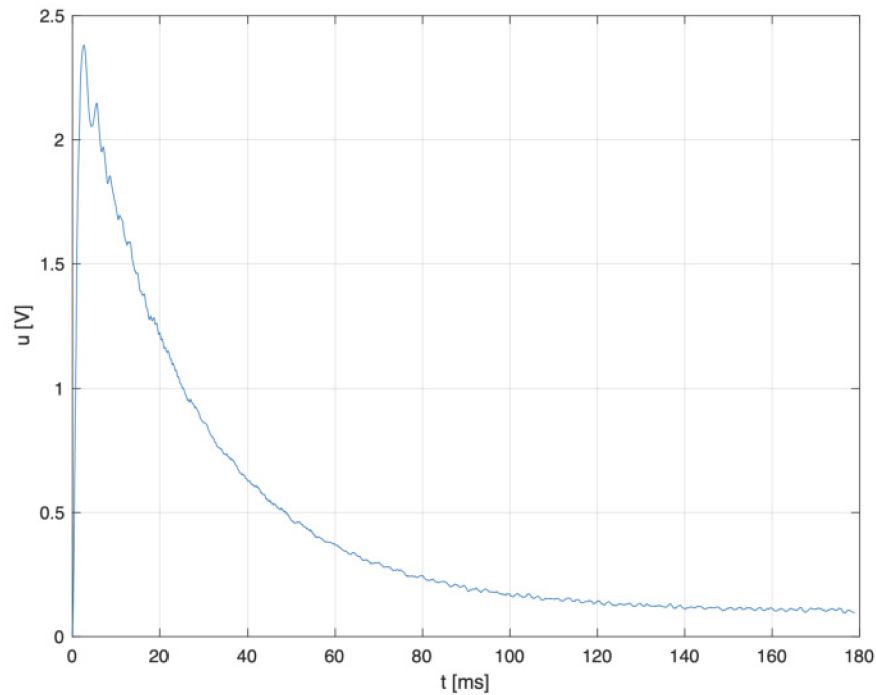
Z této rovnice se následně vyjádří proměnná K .

$$K = \frac{U_{nom} - R_a \cdot I_{nom}}{\omega_{nom}} = \frac{28 - 12 \cdot 0,145}{2 \cdot \pi \cdot \frac{5000}{60}} = 0,05Vs \quad (1.7)$$

Teď, když je známá hodnota konstanty motoru, lze dopočítat koeficient tření B .

$$K \cdot I_{nom} = B \cdot \omega_{nom} \quad (1.8)$$

$$B = \frac{K \cdot I_{nom}}{\omega_{nom}} = \frac{0,05 \cdot 0,145}{2 \cdot \pi \cdot \frac{5000}{60}} = 1,393 \cdot 10^{-5}Js \quad (1.9)$$



Obr. 1.6: Průběh po odstranění zákmitů pro napájecí napětí 28 V

1.3.2 Výpočet parametrů pomocí programu MATLAB

Jak už bylo zmíněno, měření proběhlo pro různé hodnoty napájecího napětí v rozmezí od 8 V do 28 V.

Pro naměřená data jednotlivých napájecích napětí se pomocí skriptu, viz. příloha, dopočítaly hodnoty parametrů konstanty motoru, koeficientu tření a hodnota nominálního proudu. V tabulce 1.1 jsou následně shrnuty všechny dopočtené hodnoty a v posledním řádku je uveden jejich průměr. Lze vidět, že hodnoty odpovídají vypočteným hodnotám pro napětí 28 V z předchozí podkapitoly.

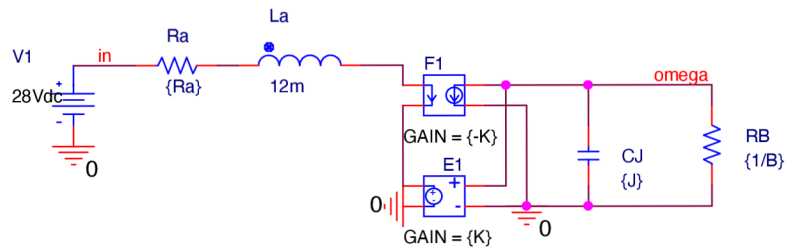
	$I_{nom}[A]$	K [Vs]	B [Js]
28 V	0,145434	0,0501429	1,39277e-05
26 V	0,144677	0,0501603	1,38600e-05
24 V	0,145197	0,0501484	1,39064e-05
22 V	0,136917	0,0503382	1,3163e-05
20 V	0,15338	0,0499609	1,46352e-05
18 V	0,157135	0,0498748	1,49677e-05
16 V	0,146309	0,0501229	1,40058e-05
14 V	0,158526	0,0498429	1,50906e-05
12 V	0,144657	0,0501608	1,38581e-05
10 V	0,142794	0,0502035	1,36913e-05
8 V	0,140046	0,0502664	1,34446e-05
průměr	0,145	0,05	1,393e-05

Tab. 1.1: Přehled hodnot parametrů motoru

1.3.3 Implementace modelu v PSpice

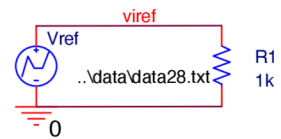
Pomocí náhradního schématu motoru se sestavil obvod v simulačním programu PSpice, obr.1.7, aby se ověřilo, zda vypočtené parametry odpovídají naměřeným hodnotám. V zapojení bylo využito prvku E, což představuje zdroj napětí řízený napětím a prvku F, nebo-li zdroj proudu řízený proudem.

Na obr. 1.8 je možné vidět, že průběh pro napájecí napětí 28 V vyneseno z naměřených hodnot (červený průběh) téměř odpovídá průběhu z náhradního schématu motoru (zelený průběh). Pro důkladnější ověření byla provedena simulace pro více naměřených dat, jak lze vidět například na obrázcích 1.9 a 1.10.

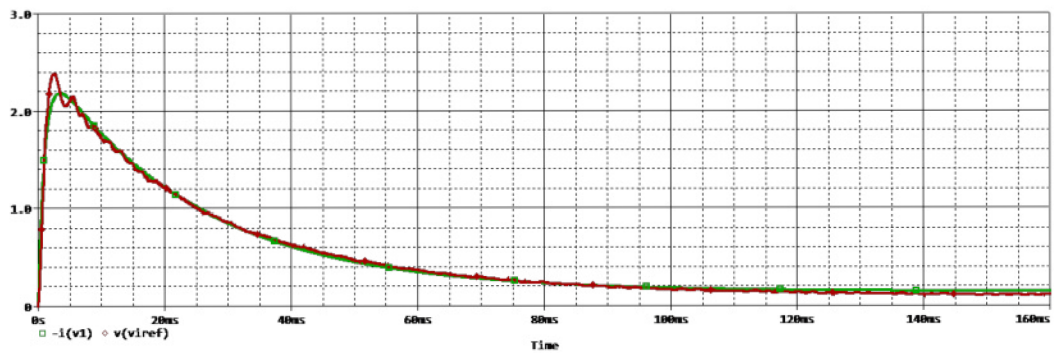


PARAMETERS:

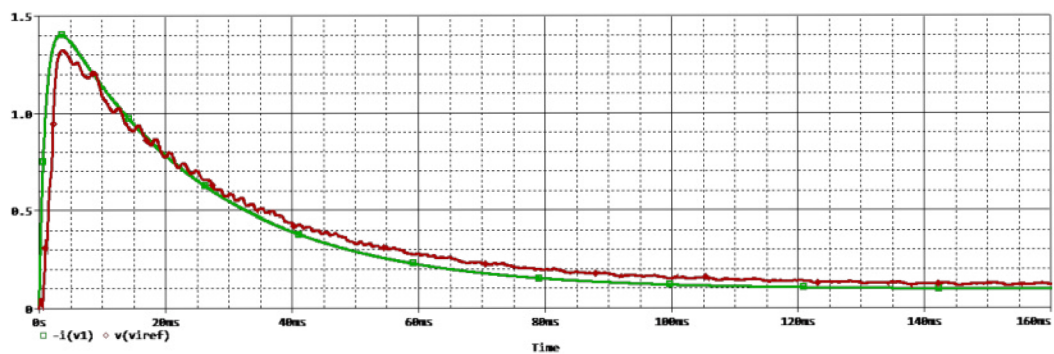
Ra = 11.64
 La = 5m
 K = 50m
 B = 1.393e-5
 J = 5.708u



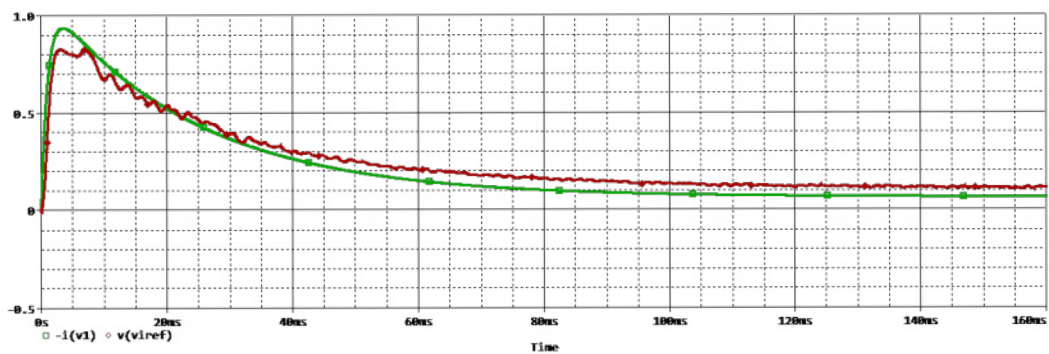
Obr. 1.7: Schéma náhradního obvodu motoru a schéma pro simulaci naměřených dat



Obr. 1.8: Průběh proudu při rozběhu motoru z nulových otáček pro napájecí napětí 28 V



Obr. 1.9: Průběh proudu při rozběhu motoru z nulových otáček pro napájecí napětí 18 V



Obr. 1.10: Průběh proudu při rozběhu motoru z nulových otáček pro napájecí napětí 12 V

2 Požadavky letecké normy RTCA/DO-160G na budič

Navrhovaný budič stejnosměrného elektromotoru musí splňovat kritéria letecké normy RTCA/DO-160G (dále jen DO-160), která poskytuje standardní postupy a environmentální testovací kritéria, využívající se pro testování palubního vybavení v letadlech. V normě lze najít požadavky na splnění limitu teploty, vibrací, napájecího napětí a mnoha jiného. Další podkapitoly jsou zaměřené jen na ty, jež jsou důležité pro toto zařízení.

2.1 Napájení

Budič bude napájen stejnosměrným napětím 28V, které spadá dle normy DO-160 do kategorie B. Dále je rozdělen provoz zařízení do dvou kategorií dle toho, zda se jedná o normální provozní podmínky nebo o podmínky abnormální.

2.1.1 Normální provozní podmínky

Při normálním provozu může dojít ke změně v napájecím napětí dle tabulky 2.1

Napětí na terminálech zařízení	28 V
Maximální napětí	30,3 V
Minimální napětí	22,0 V
Nouzový provoz	18,0 V

Tab. 2.1: Napájecí napětí při normálních provozních podmínkách [4]

- může dojít ke chvilkovým přerušením napájení až do 50 ms
- během startování motoru se mohou okamžitá napětí snížit v rozsahu od 10,0 V do 20,5 V stejnosměrných po libovolnou dobu až do 35 sekund
- ke zvýšení napájecího napětí do 47 V -0/+2 V po dobu 5 ms a 40 V -0/+2 V po dobu 30 ms
- ke snížení napájecího napětí na 17 V -0,7/+0 V

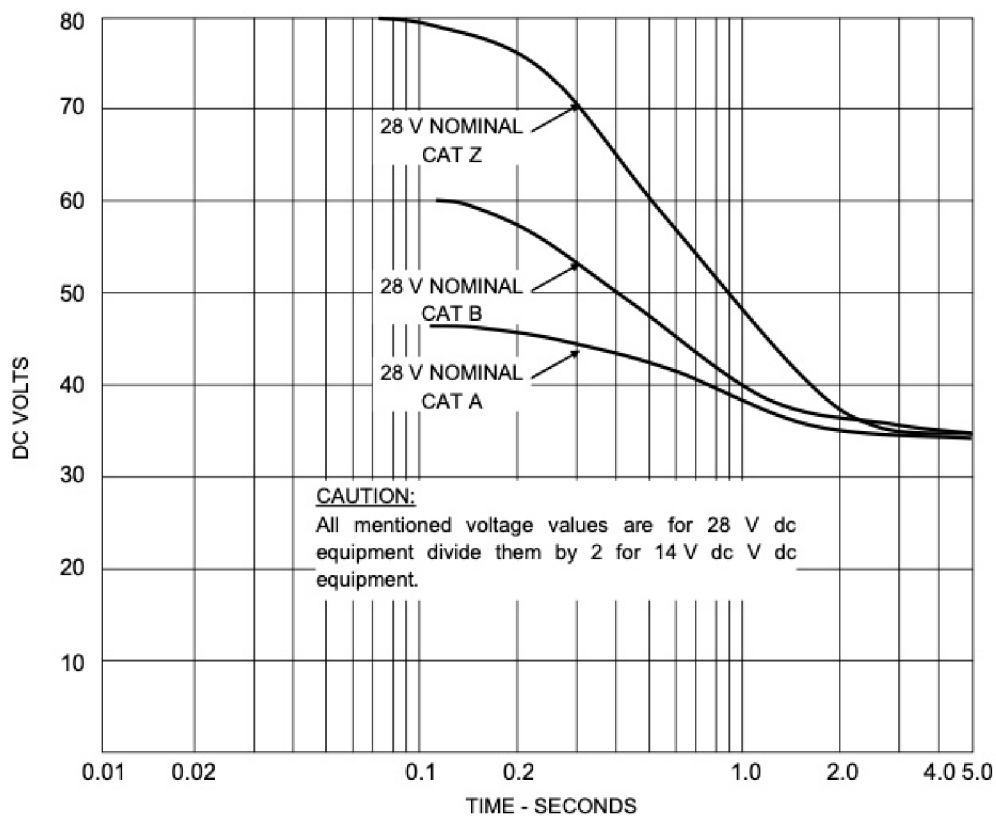
2.1.2 Abnormální provozní podmínky

Při abnormálním provozu může dojít ke změně v napájecím napětí dle tabulky 2.2

Napětí na terminálech zařízení	28 V
Maximální napětí	32,2 V
Minimální napětí	20,5 V

Tab. 2.2: Napájecí napětí při abnormálních provozních podmínkách [4]

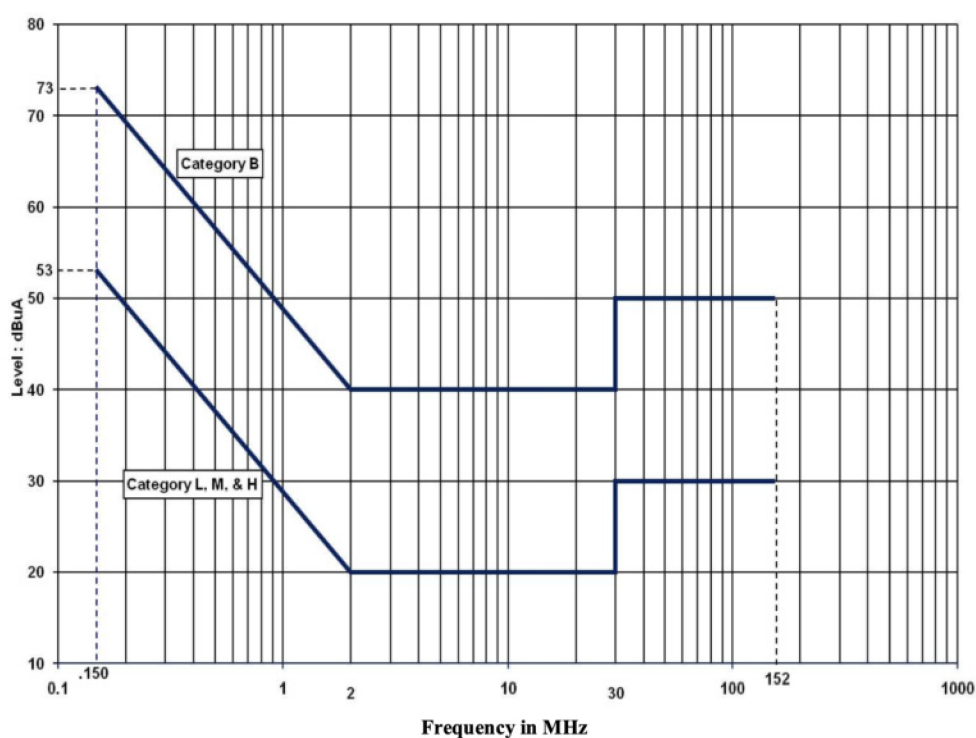
- při nízkém napájecím napětí může dojít ke snížení napětí v rozsahu od nuly až do příslušného minimálního napětí (v našem případě od 0 V do 20,5 V) až po dobu 10 minut
- může vzniknout chvilkové podpětí až na 12 V po dobu až 7 sekund
- k abnormálnímu přepětí 60V -0/+3 V do 100 ms a 40 V -0/+2 V do 1 s



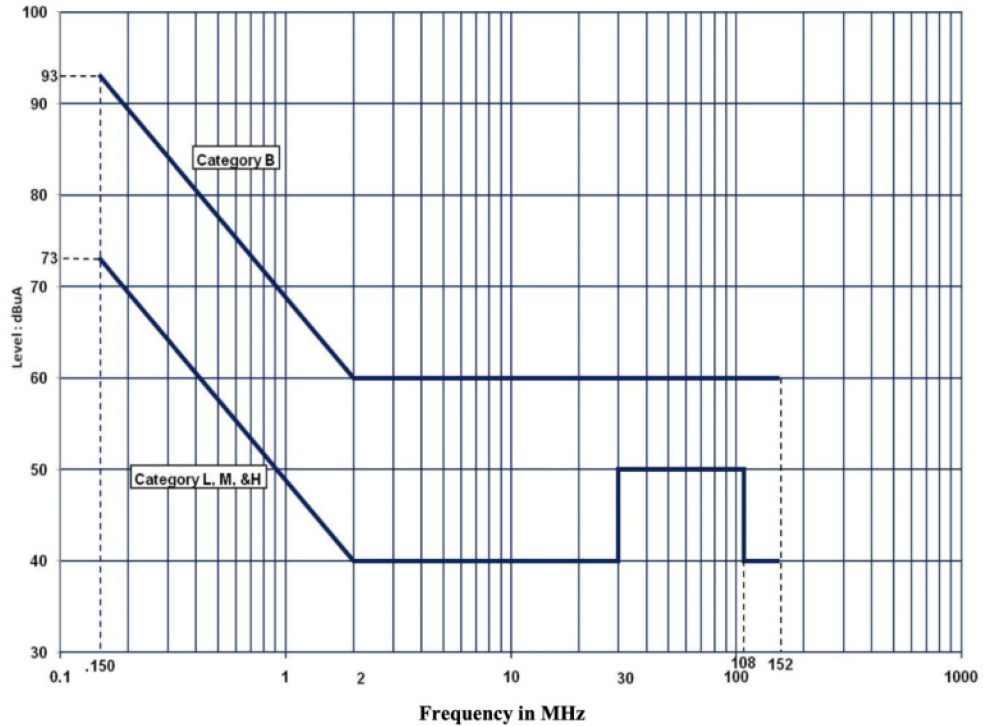
Obr. 2.1: Typické abnormální charakteristiky stejnosměrného přepětí [4]

2.2 Vedené emise vysokofrekvenční energie

Dle normy DO-160 jsou zařízení zařazeny do kategorií z hlediska umístění a vzdálenosti mezi zařízením a rádiovými anténami letadla. Navrhované zařízení spadá do kategorie M, kam patří zařízení a související propojovací kabely, které jsou umístěné v kabině cestujících a nebo kokpitu letadla. Pro návrh je důležitý především rušící proud, šířící se po napájecích vodičích. Rušivé proudy generované zařízením musí být měřeny pomocí zařízení, pro měření rušení. Reálné spektrum proudu za provozu nesmí překročit mezní křivky, patřící kategorii M, podle obrázku 2.2, resp. 2.3.



Obr. 2.2: Maximální úroveň vedeného vysokofrekvenčního rušení - napájecí vedení [4]



Obr. 2.3: Maximální úroveň vedeného vysokofrekvenčního rušení - propojovací vedení [4]

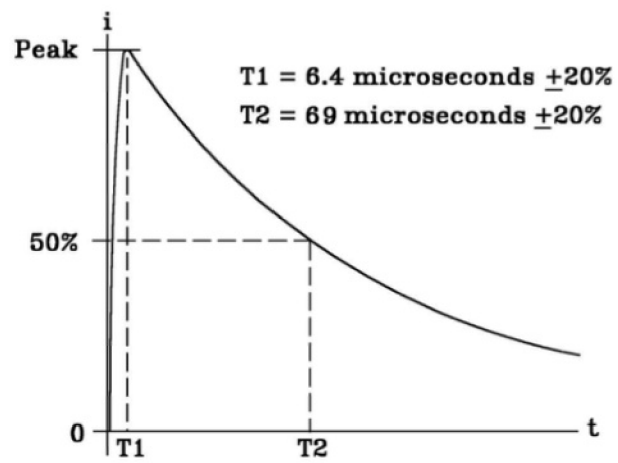
2.3 Přechodové děje způsobené blesky

Tyto zkušební metody slouží k ověření schopnosti zařízení odolat indukovaným účinkům blesků. Pro kvalifikaci zařízení lze použít skupinu testů tolerance poškození, prováděných pomocí výbojů do pinů. Naše zařízení spadá dle normy do kategorie A2XXXX.

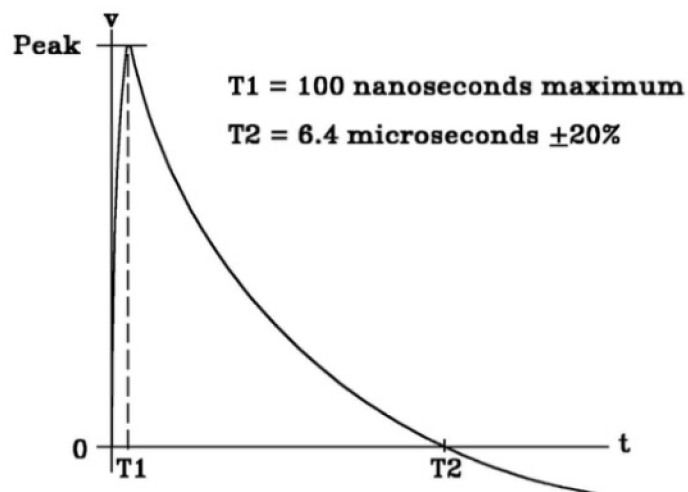
Z tabulky 2.3 lze vyčíst, že zařízení musí odolat pro typ vlny 3/3 250 V a 10 A, a pro typ vlny 4/1 125 V a 25 A.

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

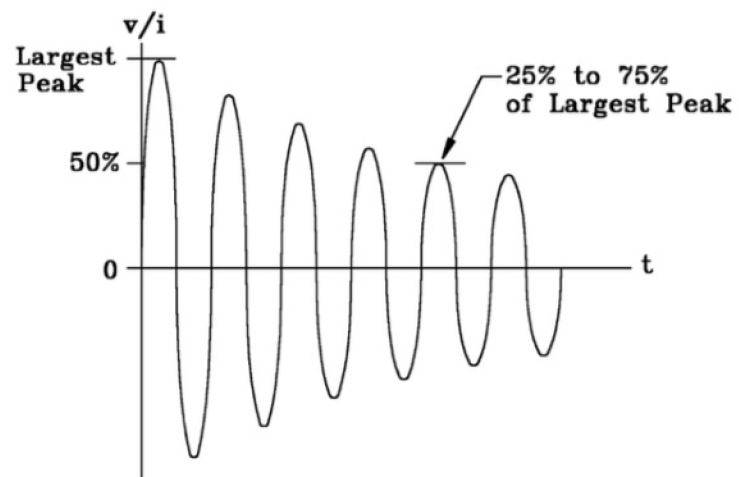
Tab. 2.3: Hodnoty testovacího napětí a proudu pro výboj do pinu [4]



Obr. 2.4: Tvar vlny 1 pro proud [4]



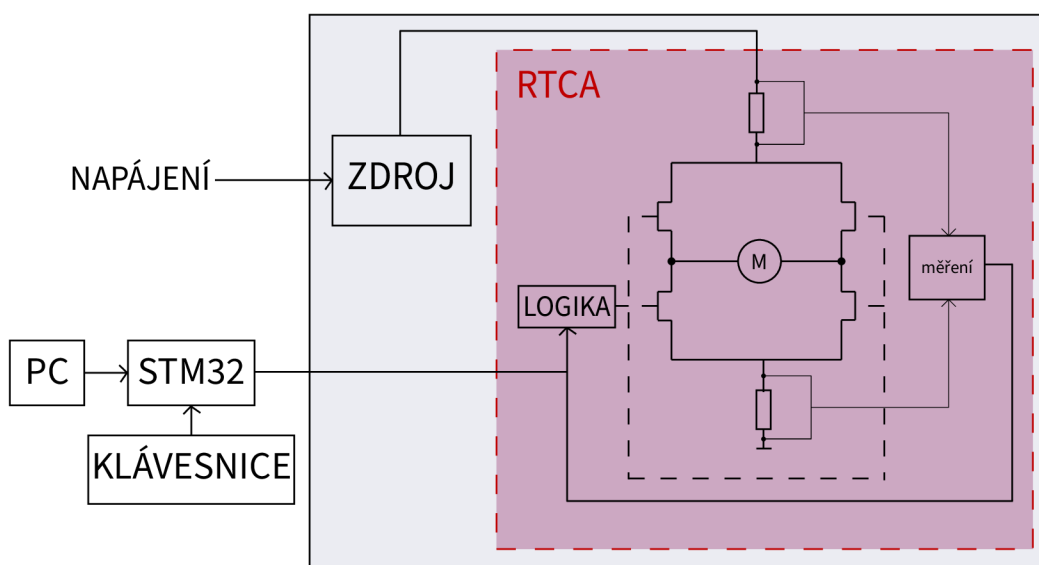
Obr. 2.5: Tvar vlny 2 pro napětí [4]



Obr. 2.6: Tvar vlny 3 pro napětí/proud [4]

3 Návrh budiče

Při samotném návrhu budiče je potřebné dbát na nadproudovou ochranu, rušivé vyzařování po vodičích, ochranu proti výbojům a napájecí napětí. Zabezpečení proti vyzařování na vodičích bude realizováno pomocí filtrace RCL prvky a ochrana proti výbojům pomocí transilů. Zařízení kategorie B musí zvládnout napájecí napětí až do 60 V, což je důvod proč nebyl k návrhu využit žádný komerční můstek. Ty bohužel obvykle zvládají napájecí napětí pouze do 48 V. Na obrázku níže 3.1 lze vidět blokové schéma celého systému. RTCA norma se týká pouze červeně označené částí. Zdroj nemusí splňovat parametry normy, jelikož slouží pouze k rozpohybování motoru a jinak bude součástí většího systému.



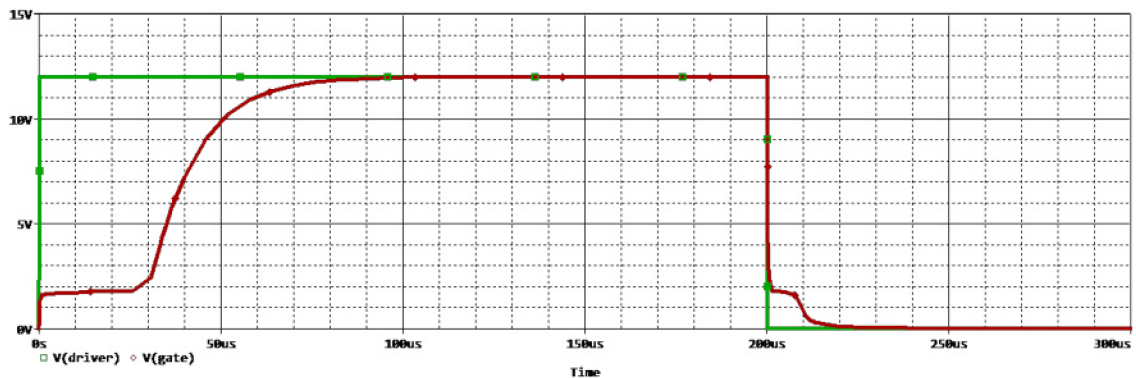
Obr. 3.1: Blokové schéma celého systému

3.1 Návrh můstku

Můstek se skládá ze čtyř tranzistorů MOSFET, pomocí kterých je spínán stejnosměrný motor. Využívá se zejména kvůli ovládní směru otáčení nebo brzdění elektromotoru. Napájen je 28 V přes snímací odpor $R_s = 50\text{m}\Omega$. Ze schématu na obrázku 3.2 lze vidět, že obvod je realizován pomocí dvou obvodů NCP5104, které představují vysokonapěťový ovladač napájení pro spínání tranzistorů MOSFET.

Na obrázku 3.3 je vyobrazeno zapojení pouze jednoho tranzistoru, pomocí kterého byla simulována hrana. RC článek u MOSFETu složí k zpomalení hrany. Nesmí dojít k případu, že by byl horní i spodní tranzistor sepnut současně. Mohlo by tak dojít ke vzniku rušivého proudu. Právě k tomu zde slouží dioda D2. Zabezpečuje rychlé vypínání a nebo pomalé zapínání tranzistoru. V případě, že se tranzistor zapíná, je dioda v závěrném směru a rezistor R1 zabezpečí pomalé otvírání tranzistoru, a tím pádem i zpomalení hrany. V opačném případě, když se tranzistor vypíná, je dioda v směru propustném a přes odpor R10 zabezpečí rychlé vypnutí.

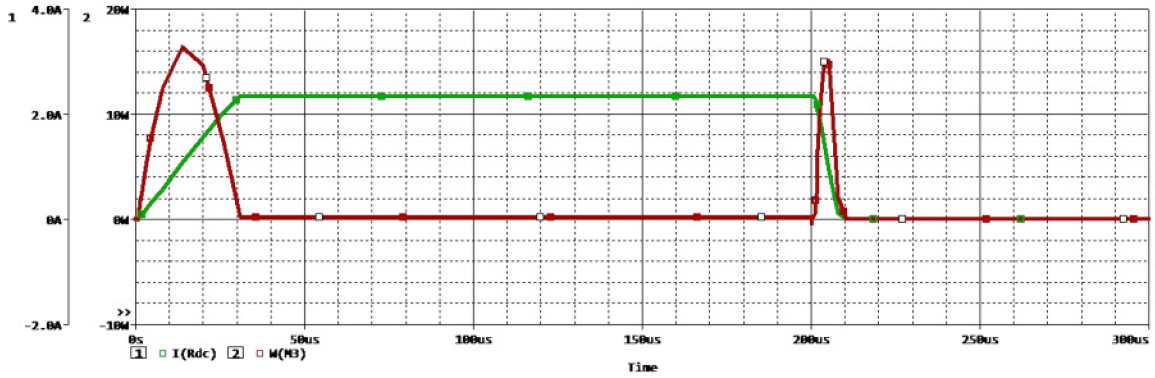
Na obrázku 3.4 je simulace náběžné hrany tranzistoru. Zelený průběh představuje hranu na výstupu z portu DRIV_HI, která je ostrá. Červený průběh je odsimulovaná náběžná hrana na gatě tranzistoru. Z průběhu je patrné, že hrana byla zpomalená. Na následujícím obrázku 3.5 je zelenou barvou vidět průběh proudu zátěží, který roste lineárně a při vypínání také lineárně klesá. Červený průběh reprezentuje výkon tranzistoru. Lze vidět, že v místě zapínání a vypínání dosahuje výkonu kolem 16 W. Dynamický výkon však nevádí, jelikož k spínání dochází jednou za delší čas a tranzistor se nestihne přehřát.



Obr. 3.4: Simulace náběžné hrany tranzistoru

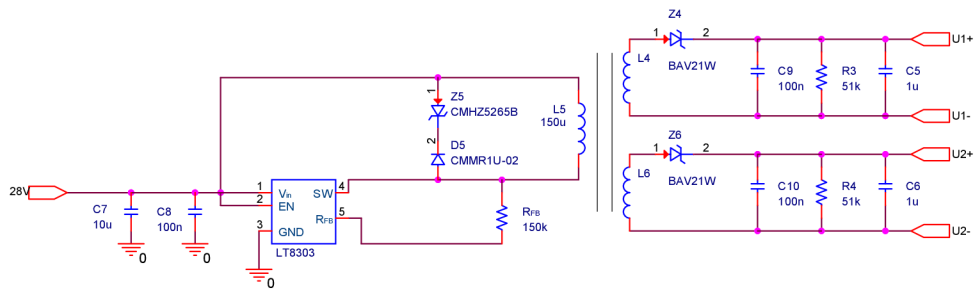
3.1.1 Napájení budiče můstku

Část obvodu pro napájecí napětí bude realizována pomocí takzvaného plovoucího zdroje. Je potřeba zde vytvořit napětí 12 - 15 V ze vstupního napětí 28 V. Pro realizaci se použije obvod LT8303, což je konvertor typu flyback. Jeho výhodou je schopnost dodávání více výstupních napětí. Pracuje v rozsahu napětí 5,5 V až 100 V, což je pro návrh s použitím napětí 28 V vyhovující. Při návrhu se vycházelo z doporučeného katalogového zapojení [10]. Bylo použito trafo 750312558 od firmy Würth Elektronik. Pomocí vzorců z datasheetu [10] byla dopočtena potřebná hodnota odporu R_{FB} , minimální a maximální indukčnost na primáru, maximální převodní po-



Obr. 3.5: Průběh proudu a výkonu tranzistorem

měr trať, minimální odběrový proud a střída. Navržené schéma je připojeno pomocí výstupů U1+ a U1- na piny BOOT a BRIDGE jednoho obvodu NCP5104 a pomocí U2+ a U2- na piny druhého.



Obr. 3.6: Plovoucí zdroj napětí

Pro následující výpočty byly použité konstanty z datasheetu: $t_{OFFmin} = 350ns$, $I_{SWmin} = 105mA$, $t_{ONmin} = 160ns$, $f_{MIN} = 9kHz$, $V_F = 0,3V$, $I_{RFB} = 100\mu A$, $l_{PRI} = 75\mu H$, $N_{PS} = 1$, $V_{in} = 10V$, $V_L = 5V$. Požadované výstupní napětí V_{out} bude 14,5 V a maximální vstupní napětí $V_{INmax} = 40V$.

$$R_{FB} = \frac{N_{PS} \cdot (V_{out} + V_F)}{I_{RFB}} = \frac{1 \cdot (14,5 + 0,3)}{100 \cdot 10^{-6}} = 148k\Omega \quad (3.1)$$

$$L_{PRImin1} = \frac{t_{OFFmin} \cdot N_{PS} \cdot (V_{out} + V_F)}{I_{SWmin}} = \frac{350 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot (14,5 + 0,3)}{105 \cdot 10^{-3}} = 49,333\mu H \quad (3.2)$$

$$L_{PRImin2} = \frac{t_{ONmin} \cdot V_{INmax}}{I_{SWmin}} = \frac{160 \cdot 10^{-9} \cdot 40}{105 \cdot 10^{-3}} = 60,952\mu H \quad (3.3)$$

$$N_{PSmax} = \frac{150 - V_{INmax} - V_L}{V_{out} + V_F} = \frac{150 - 40 - 5}{14,5 + 0,3} = 7,095 \quad (3.4)$$

$$I_{LOADmin} = \frac{L_{PRI} \cdot I_{SWmin}^2 \cdot f_{MIN}}{2 \cdot V_{out}} = \frac{75 \cdot 10^{-6} \cdot (105 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 9 \cdot 10^3}{2 \cdot 14,5} = 0,257mA \quad (3.5)$$

$$D = \frac{(V_{out} + V_F) \cdot N_{PS}}{(V_{out} + V_F) \cdot N_{PS} + V_{in}} = \frac{(14,5 + 0,3) \cdot 1}{(14,5 + 0,3) \cdot 1 + 10} = 0,597 \quad (3.6)$$

$$R_{load} = \frac{2 \cdot V_{out}}{I_{LOADmin}} = \frac{2 \cdot 14,5}{0,257 \cdot 10^{-3}} = 113k\Omega \quad (3.7)$$

Z výpočtů lze říci, že primární indukčnost transformátoru vyhovuje podmínkám 3.2 a 3.3.

3.2 Ochranné obvody

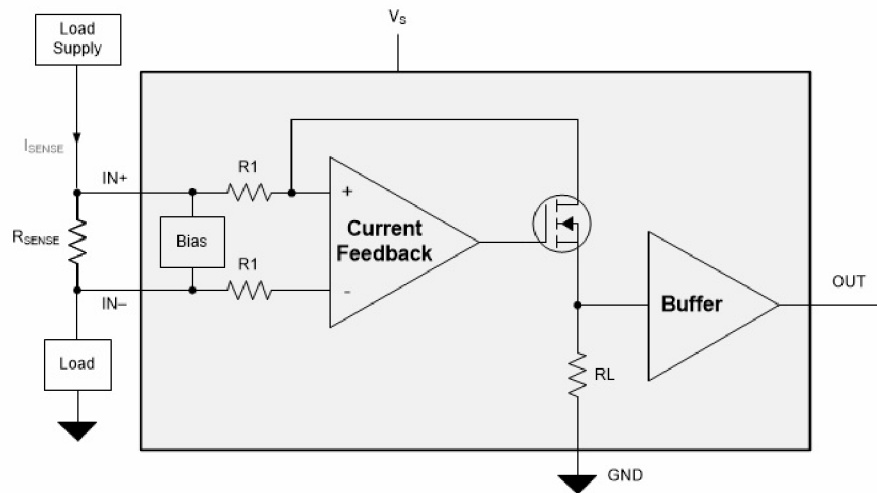
Ochranný blok obvodu bude realizován pomocí dvou zesilovačů snímání proudu, připojených na snímací odpory R_s a dvou dvojic komparátorů. Jedná se o ochranu v případě vzniku příliš velkého proudu. Jinak by zde mohlo dojít k poškození tranzistorů v H-můstku. Odpor R_s je snímán i dolů v obvodu z důvodu možného poruchového scénáře, kdy by došlo k injekci napájecího napětí zvenku a proud by se uzavřel na zem. Pro realizaci bylo potřebné vybrat správný zesilovač a omezit hodnotu maximálního možného proudu v obvodu.

3.2.1 Porovnání zesilovačů

Pro návrh byl potřebný zesilovač snímání proudu, který bude schopen pracovat při napětí minimálně 60 V, pokud by došlo k přepětí. Taktéž musí být schopen zvládnout alespoň malé záporné hodnoty. Důležitý byl také jeho zisk, jelikož čím větší ho bude mít, tím menší hodnota rezistoru se bude muset použít. To by ale vedlo k větším nepřesnostem. V tabulce 3.1 je možné vidět porovnání čtyř, pro nás nejvhodnějších variant. Výběr nebyl zrovna nejsnazší, jelikož aktuální dostupnost na trhu je problematičtější. Po zvážení všech faktorů z toho nejlépe vyšel zesilovač INA293-A1, díky jeho nejmenší hodnotě zisku a dobré dostupnosti.

	INA240-A4	INA293-A1	INA293-B2	INA281-A2
min napětí v běžném režimu	-4V	-4V	-4V	-4V
max napětí v běžném režimu	80V	110V	110V	110V
zisk	200V/V	20 V/V	50V/V	50V/V
cena	84,75 Kč	91,50 Kč	91,50 Kč	70,75 Kč

Tab. 3.1: Porovnání typů zesilovačů



Obr. 3.7: Vnitřní zapojení obvodu INA293[6]

3.2.2 Návrh detekčních obvodů

Pro návrh rychlého a pomalého kanálu se vychází ze známosti zesílení obvodu INA293-A1 a hodnoty snímacího odporu R_s . Celková převodní konstanta pak vychází 1 V/A. Pokud dojde k překročení limitů kanálů, sčítají se pomocí logické funkce OR, jelikož se jedná o spojené výstupy s otevřeným kolektorem.

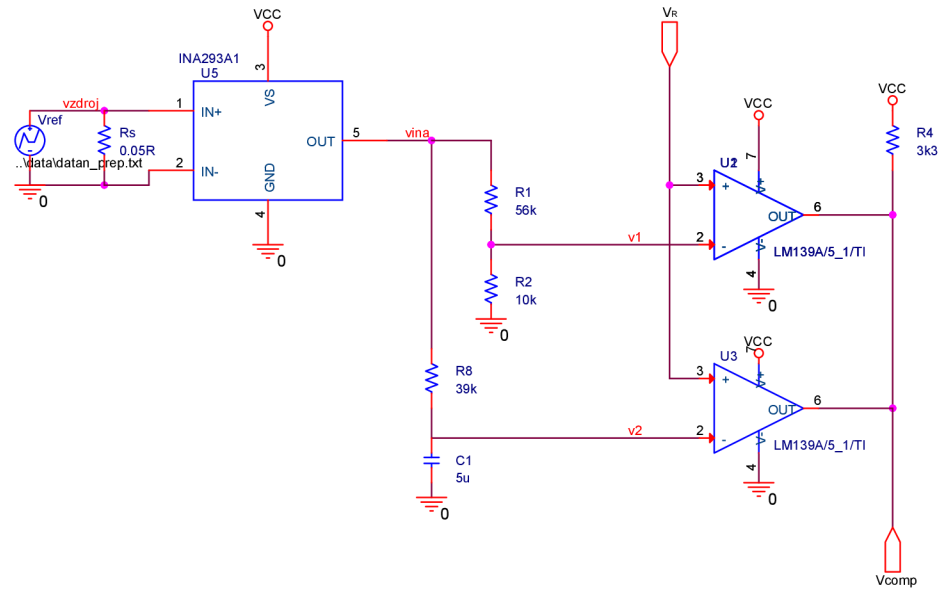
Odporů R1 a R2 jsou navrženy tak, aby při případném vyšším napětí a proudu, převyšující 3,5 V, tj. 3,5 A, vypnuly činnost můstku. Jedná se o klasický odporový dělič, který je přizpůsobený na maximální hodnotu napětí 3,5 V. Hodnota odporu R2 byla volena jako 10kΩ. Pomocí rovnice 3.9 se dopočetla hodnota odporu R1, což mělo nejbliž k hodnotě součástky R1 = 56 kΩ. Obvod je napájen stejnosměrným napětím VCC = 5 V.

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.8)$$

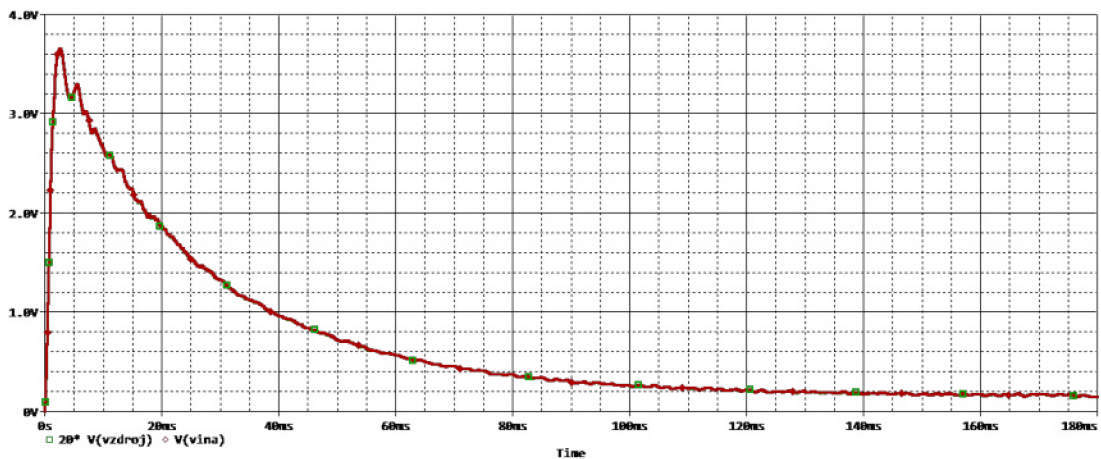
$$R_1 = \frac{R_2 \cdot (U_1 - U_2)}{U_2} = \frac{10000 \cdot (3,5 - 0,5)}{0,5} = 60k\Omega \quad (3.9)$$

Správná funkčnost obvodu zobrazeného na obrázku 3.8 byla ověřena simulací v programu PSpice, aby bylo vidět, že se obvod chová podle předpokladů. Proud je

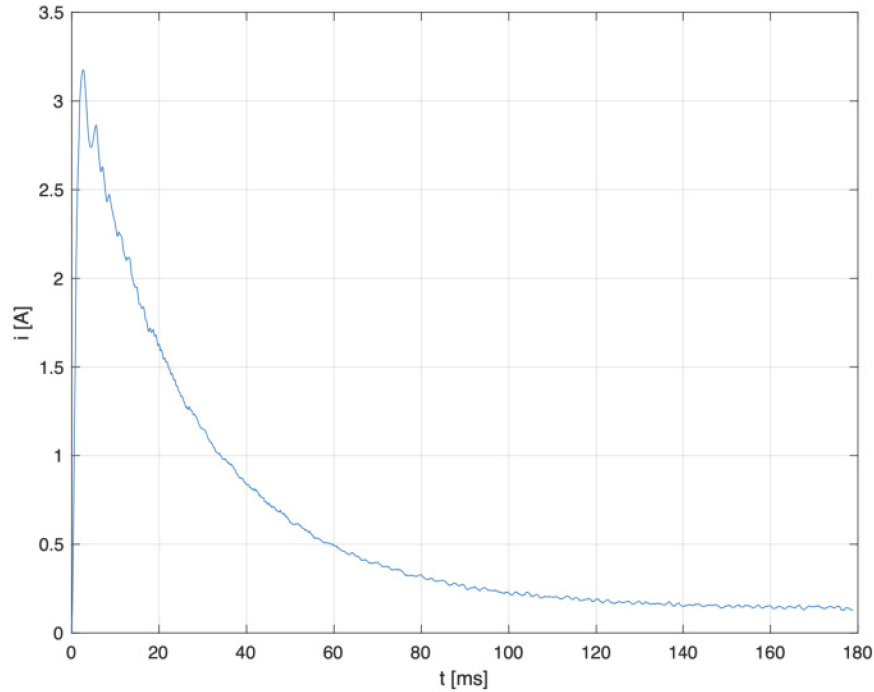
snímán na snímacím odporu R_s a zdroj V_{comp} je realizován pomocí naměřených dat. Na obrázku 3.9 lze vidět vynesení průběh napětí po zesílení zesilovačem INA293-A1 porovnaný s dvaceti násobkem napětí na zdroji. Tím se ověřilo, že zesilovač opravdu zesiluje dvacetkrát. Maximální hodnota napětí ve špičce byla zjištěna pomocí programu MATLAB, jak je možné vidět z grafu na obrázku 3.10. Špička dosahuje hodnoty kolem 3,2 A, tím pádem je dále volena maximální hodnota povoleného proudu do 3,5 V.



Obr. 3.8: Zapojení zesilovače INA293-A1 spolu s komparátory



Obr. 3.9: Průběh napětí po zesílení zesilovačem INA293



Obr. 3.10: Průběh proudu v závislosti na čase pro napájecí napětí 28 V

Při návrhu filtru pro pomalý kanál se vychází z náhradního schématu na obrázku 3.11. Pro svorkové napětí motoru platí dvě základní rovnice. Rovnice napěťová a rovnice momentová, jak už bylo popsáno dříve:

$$u(t) = R_a \cdot i + L_a \cdot \frac{di}{dt} + u_i = R_a \cdot i + L_a \cdot \frac{di}{dt} + K \cdot \omega \quad (3.10)$$

$$K \cdot i = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \omega \quad (3.11)$$

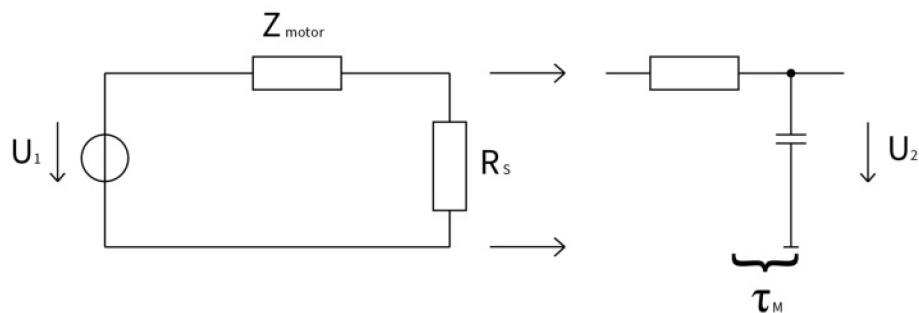
Následně se provede Laplaceova transformace.

$$U = R_a \cdot I + sL_a \cdot I + K \cdot \Omega \quad (3.12)$$

$$K \cdot I = sJ \cdot \Omega + B \cdot \Omega \quad (3.13)$$

Z rovnice 3.13 si lze vyjádřit proměnnou Ω .

$$\Omega = \frac{K \cdot I}{B + sJ} \quad (3.14)$$



Obr. 3.11: Náhradní schéma

Ta se dosadí do rovnice 3.12, z čehož vznikne už jen jedna rovnice, popisující následující vztah.

$$U = R_a \cdot I + sL_a \cdot I + K \cdot \frac{K \cdot I}{B + sJ} \quad (3.15)$$

Po následné úpravě, kdy se celá rovnice vydělí proudem, vznikne vztah pro impedanci motoru.

$$\frac{U}{I} = Z_{motor} = R_a + sL_a + \frac{K^2}{B + sJ} \quad (3.16)$$

V nízkofrekvenční oblasti se indukčnost cívky L_a neprojeví a lze ji v následujících výpočtech zanedbat. Rovnice se tak upraví na jednodušší tvar.

$$Z_{motor} = R_a + \frac{K^2}{B + sJ} = \frac{R_a \cdot B + R_a \cdot sJ + K^2}{B + sJ} = H \cdot \frac{1 + s\tau_z}{1 + s\tau_p}, \quad (3.17)$$

kde:

$$H = \frac{R_a B + K^2}{B}, \quad (3.18)$$

$$\tau_z = \frac{R_a J}{R_a B + K^2}, \quad (3.19)$$

$$\tau_p = \frac{J}{B}. \quad (3.20)$$

V obrázku 3.11 je vidět, že R_s je snímací odpor. Jeho hodnota je oproti impedanci motoru velice nízká, tím pádem je možné ho v dalších výpočtech zanedbat.

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{R_s}{R_s + Z_{motor}} \cdot \frac{1}{1 + s\tau_M} = U_1 \cdot \frac{1}{H} \cdot \frac{1 + s\tau_P}{1 + s\tau_Z} \cdot \frac{1}{1 + s\tau_M} \quad (3.21)$$

Pro případ kdy $\tau_M = \tau_P$ dojde ke krácení rovnice:

$$U_2 = U_1 \cdot R_s \cdot H \cdot \frac{1}{1 + s\tau_Z} \quad (3.22)$$

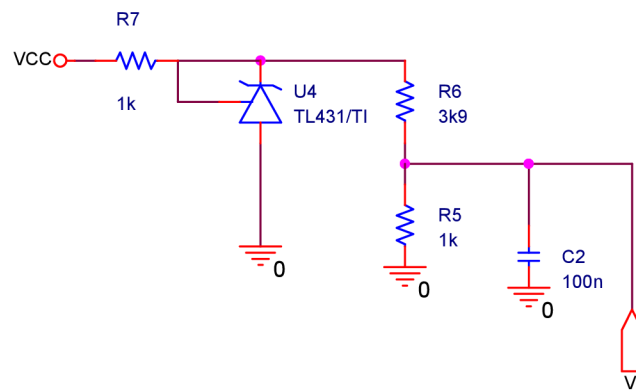
Časová konstanta τ_Z by se měla rovnat součinu odporu R8 a kapacity C1 ze schématu 3.8. Jelikož všechny potřebné hodnoty pro dopočítání jsou známy, stačí jen dosadit do rovnice 3.19.

$$\tau_Z = \frac{12 \cdot 5,708 \cdot 10^{-6}}{12 \cdot 1,393 \cdot 10^{-5} + 0,05^2} \approx 0,02568s \quad (3.23)$$

Hodnota odporu R8 byla stanovena na 39 k Ω , z čehož se následně určila i hodnota C1.

3.2.3 Zdroj referenčního napětí

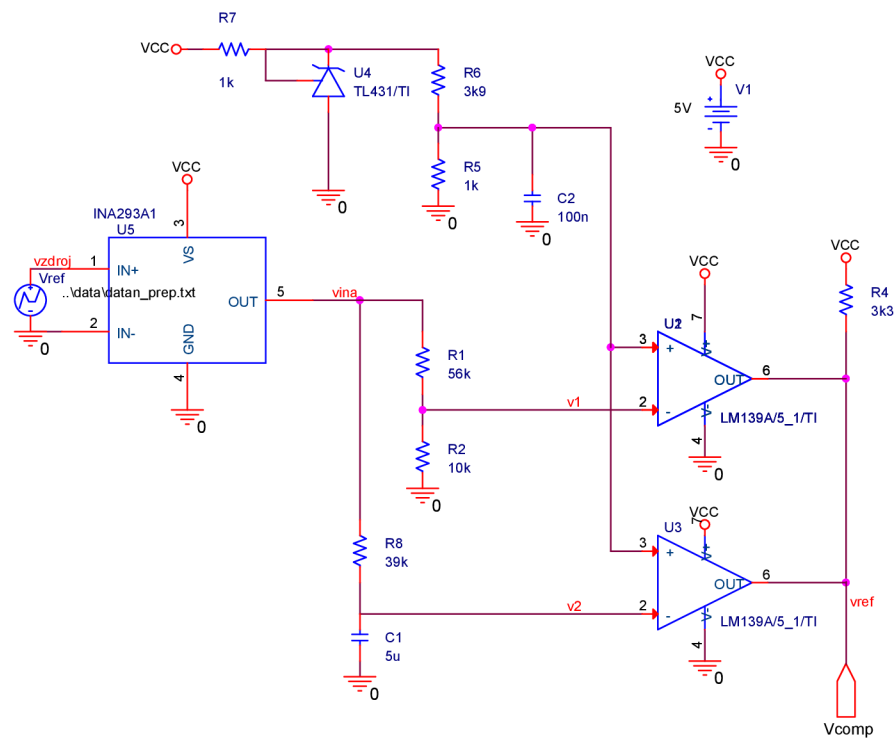
Úroveň referenčního napětí na komparátorech je 0,5 V. Z obrázku 3.12 je možno vidět, že je realizována pomocí nastavitelného regulátoru TL431 a odporového děliče R5 a R6, kde R5 = 1 k Ω a R6 = 3,9 k Ω . Obvod je napájen stejnosměrným napětím VCC = 5 V.



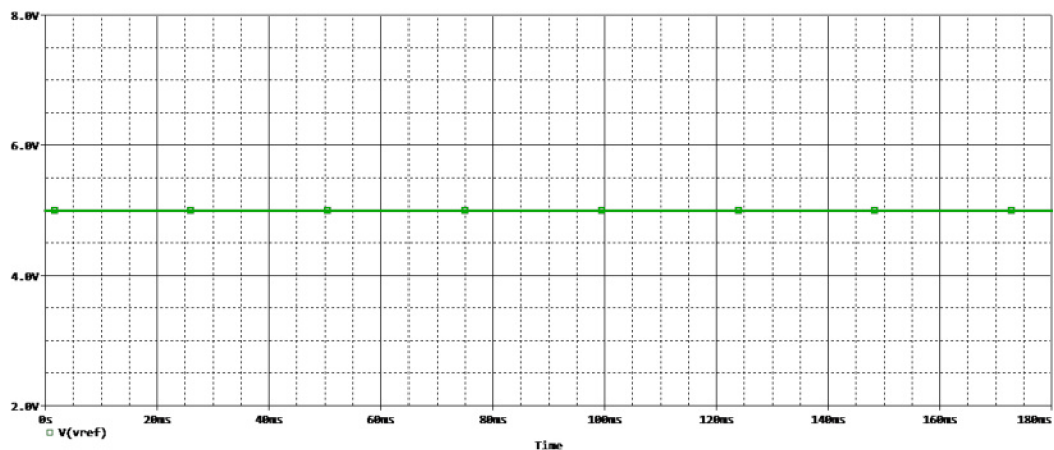
Obr. 3.12: Nastavení referenčního napětí

3.2.4 Simulace ochranného obvodu

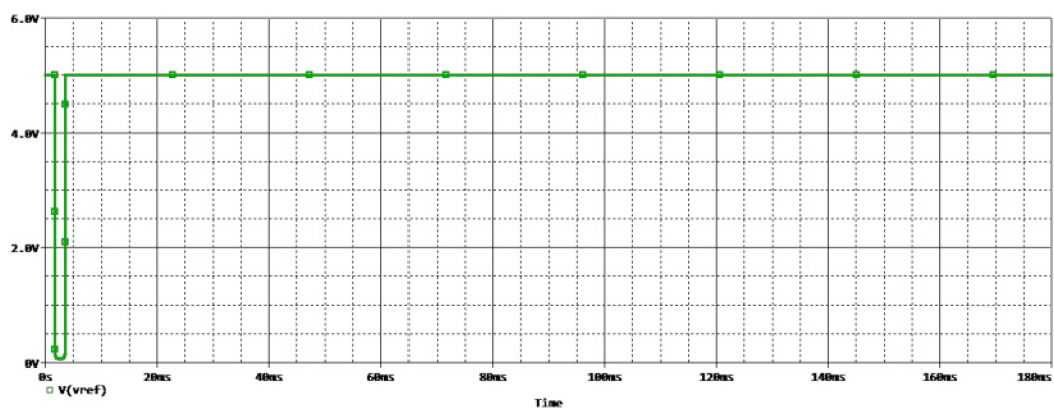
Pomocí další simulace byla ověřena správná činnost komparátorů. Na obrázku 3.14 lze vidět, že napětí nepřekročilo navrženou mez 3,5 V a tím pádem nedošlo k žádnému omezení. Na obrázku 3.15 už lze vidět změnu. Na začátku průběhu došlo k překročení napěťové úrovně 3,5 V, což zapříčinilo chvilkovou aktivaci komparátoru. Jelikož má komparátor aktivní úroveň L, napětí bylo po tuhle dobu nulové. Po chvíli však došlo k poklesu napětí a úroveň se opět vrátila na hodnotu 5 V.



Obr. 3.13: Schéma ochranného obvodu pro simulaci



Obr. 3.14: Průběh napětí na výstupu komparátorů při hodnotě napětí do 3,5 V



Obr. 3.15: Průběh napětí na výstupu komparátorů při hodnotě napětí nad 3,5 V

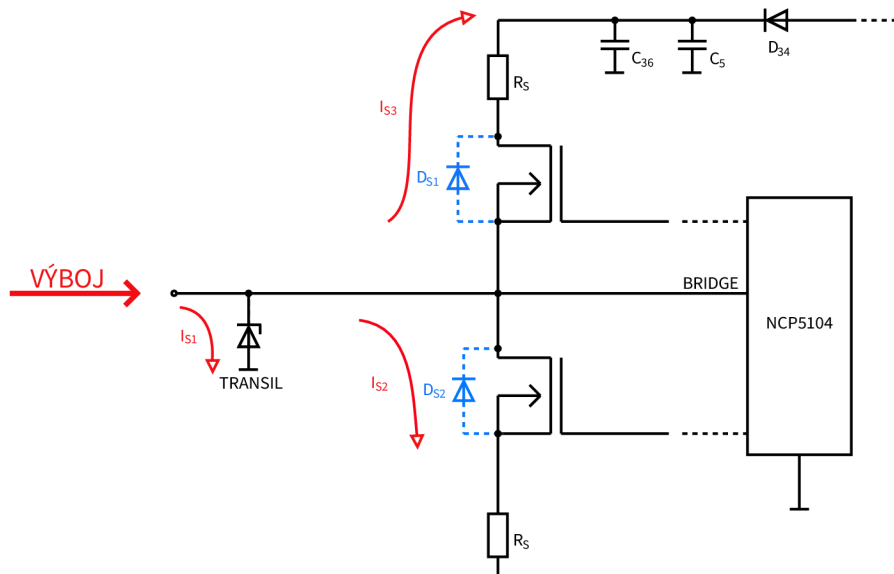
3.3 Návrh ochrany vstupů

Pro zabezpečení proti nepřímým účinkům blesků byly do obvodu vloženy transily. Jejich úlohou je svézt proud injektovaný do pinů. Na obrázku níže je znázorněn princip funkce transilu. Diody D_{S1} a D_{S2} jsou tzv. substrátové diody MOSFETu. Pomocí červených šipek jsou označeny tři proudy, které mohou téct obvodem v případě vzniku výboje:

I_{S1} - proud, který svádí transil,

I_{S2} - proud, pokud je sepnutý spodní tranzistor,

I_{S3} - při průchodu impulsu se otvírá substrátová dioda D_{S1} , avšak průchodu pulsu brání dioda D_{S4} .



Obr. 3.16: Princip funkce transilu

V případě, že je spodní MOSFET vypnutý, musí veškerou energii výboje do pinu absorbovat transil.

Pro návrh se zvolily transily typu SMBJ54A, které zvládnou maximální trvalé napětí $V_R = 54 \text{ V}$ a průrazné napětí V_{BR} mají v rozsahu 60 - 66,3 V. Upínací napětí U_C je 87,1 V a maximální špičkový pulzní proud 6,9 A, z čehož vyplývá výkon kolem 600 W pro standardní vlnu 10/1000 μs . Standardní zkušební puls 10/1000 μs se v aerospace ale nepoužívá.

Pinový test je předepsaný pro vlny 3/3 a 4/1 na 10 A, resp. 25 A, ale pro kratší pulzy. Jak už bylo zmíněno, transil vydrží 6,9 A pro puls 10/1000 μs . Pro kratší pulzy se povolená úroveň proudu zvyšuje, [13].

Vlna 1 - 25 A

Pro vlnu 1 se vychází z obrázku 2.4. Katalogem dané hodnoty pro transil jsou $I_{kat} = 6,9 \text{ A}$ a $T_{kat} = 1000 \mu\text{s}$. Pro $T = 69 \mu\text{s}$ je tedy proud následovný a vyhovuje podmínce.

$$I_{69} = I_{kat} \cdot \sqrt{\frac{T_{kat}}{T}} = 6,9 \cdot \sqrt{\frac{1000}{69}} = 26 \text{ A} \quad (3.24)$$

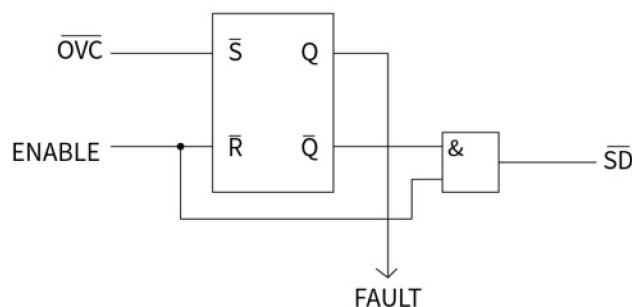
Vlna 3 - 10 A

Vlnu 3 pro frekvenci 1 MHz je možné aproximovat podle [13] ekvivalentním pulsem $5\mu s$. Vychází se tentokrát z obrázku 2.6. Výsledný proud bude tedy 97 A, což vyhovuje požadavkům i s rezervou.

$$I_5 = I_{kat} \cdot \sqrt{\frac{T_{kat}}{T}} = 6,9 \cdot \sqrt{\frac{1000}{5}} = 97A \quad (3.25)$$

3.4 Logická část obvodu

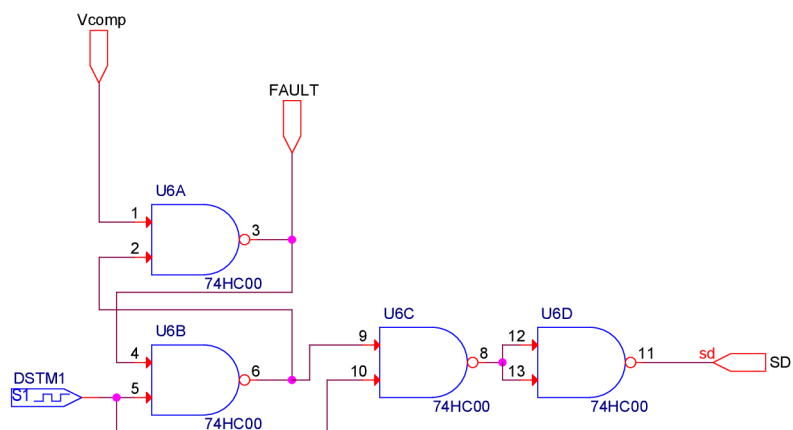
Logická část obvodu je zaměřena na vypínání všech tranzistorů v můstku pomocí signálu \overline{SD} , neboli shutdown. Jedná se o případy příliš velkého proudu, kdy by zde mohlo dojít k jejich poškození. Obvod bude realizován pomocí SR klopného obvodu a následně logického součinu AND, jak lze vidět v obrázku 3.17. V případě, že signál \overline{OVC} nabývá nízké úrovně, nastal stav nadproudu. Klopný obvod změní svůj stav a signál \overline{SD} bude ve stavu LOW a tím odpojí tranzistory v můstku. Tento stav trvá dokud se pomocí $ENABLE=LOW$ klopný obvod nepřeklopí do pracovního stavu. Signál \overline{SD} pak nabude úrovně HIGH. Na obrázku 3.18 je vyobrazeno zapojení pomocí elementárních hradel.



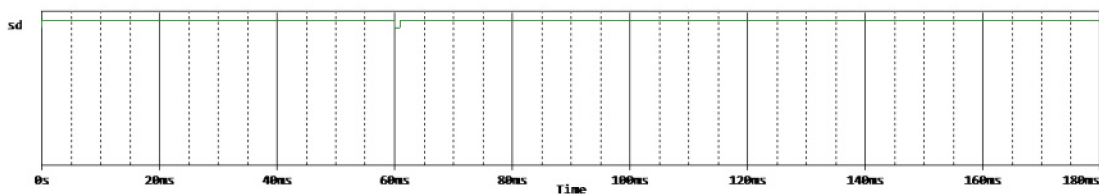
Obr. 3.17: Schematické zapojení logické části

Pomocí simulace byla opět ověřena správná funkce obvodu. Na obrázku 3.19 je vidět odsimulovaný průběh funkce hradel pomocí signálu ENABLE. Na počátku a v čase 60 ms byla nastavena sekvence z úrovně LOW do HIGH, což je reset klopného obvodu. Takhle testovací sekvence byla nastavena v DSTM1. Pro lepší viditelnost resetu v čase 60 ms je na obrázku 3.20 přiblížený průběh signálu sd .

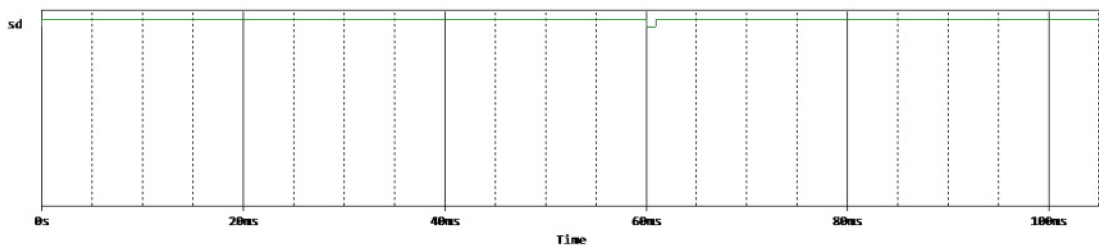
Na posledním obrázku 3.21 lze vidět, že chvíli po začátku průběhu došlo k přepětí, jelikož hodnota napětí překročila úroveň 3,5 V. V čase 61 ms pak došlo k resetu pomocí signálu ENABLE.



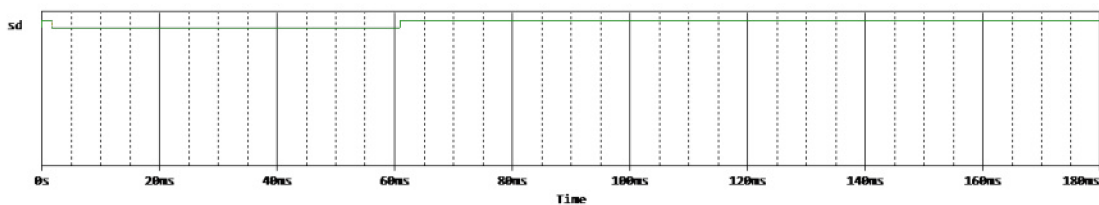
Obr. 3.18: Zapojení logické části pomocí elementárních hradel NAND



Obr. 3.19: Signál sd při hodnotě napětí do 3,5 V

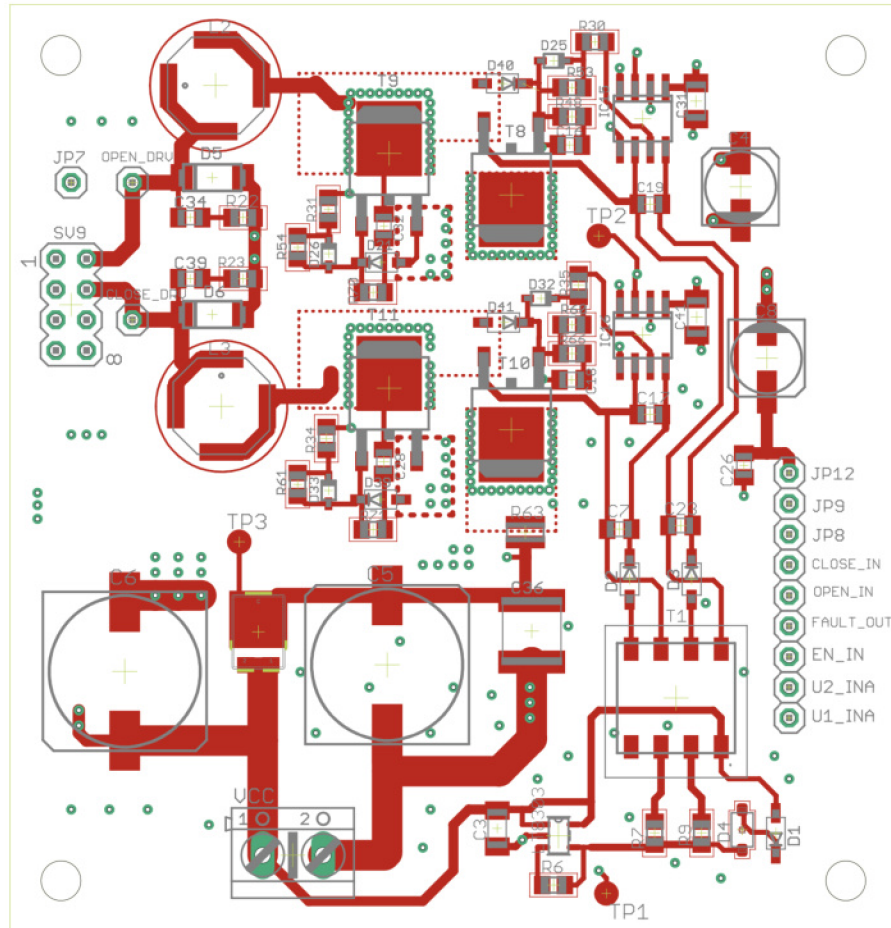


Obr. 3.20: Signál sd při hodnotě napětí do 3,5 V - zoom



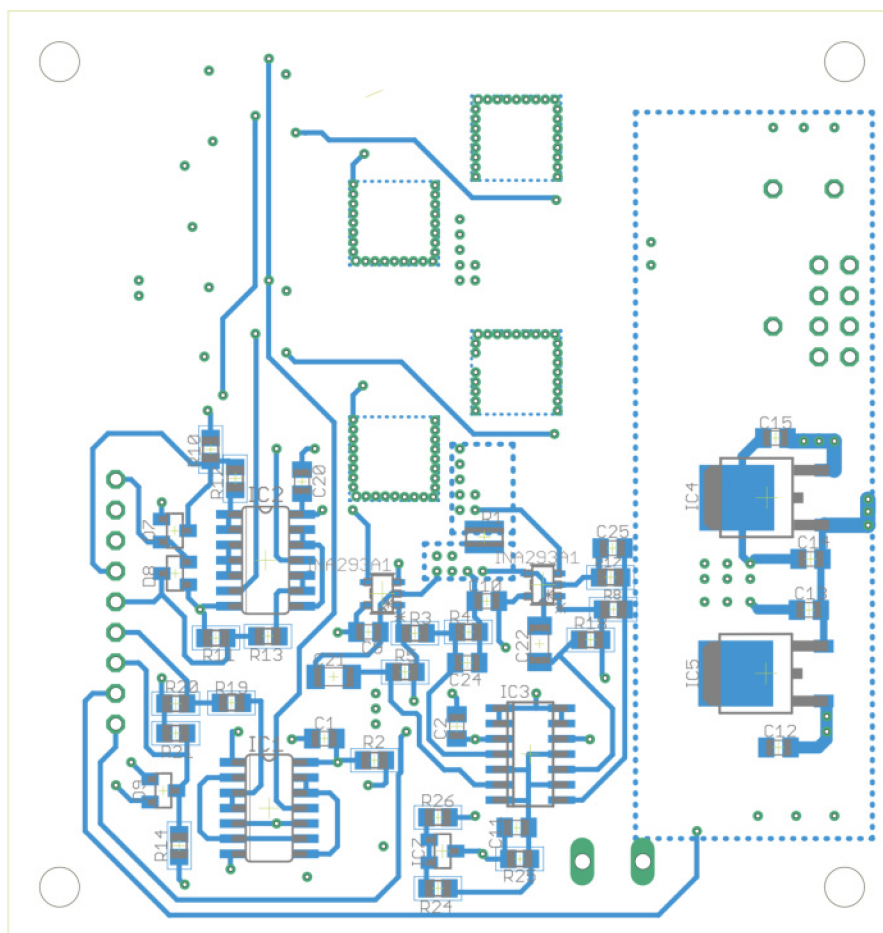
Obr. 3.21: Signál sd při hodnotě napětí nad 3,5 V

Na obrázku 4.2 je pro přehlednější znázornění zobrazena pouze vrstva top, na které se mimo jiné nacházejí všechny součástky větších rozměrů, které by na spodní vrstvě bránily komfortnímu položení a příliš vyčnívaly. V okolí tranzistorů jsou vytvořeny prokovy pro lepší chlazení. Po levé a pravé straně jsou zde vyvedeny piny pro připojení motoru, mikroprocesoru, napájecího napětí a země. Na místech potřebných k měření byly vytvořeny tzv. testovací body označené jako TP1 až TP3.



Obr. 4.2: Top vrstva budiče

Samotnou vrstvu bottom lze vidět na obr. 4.3. V porovnání s vrchní vrstvou je značně prázdnější. Nachází se zde logická část obvodu a obecně součástky, které moc nezasahují do prostoru.



Obr. 4.3: Bottom vrstva budiče

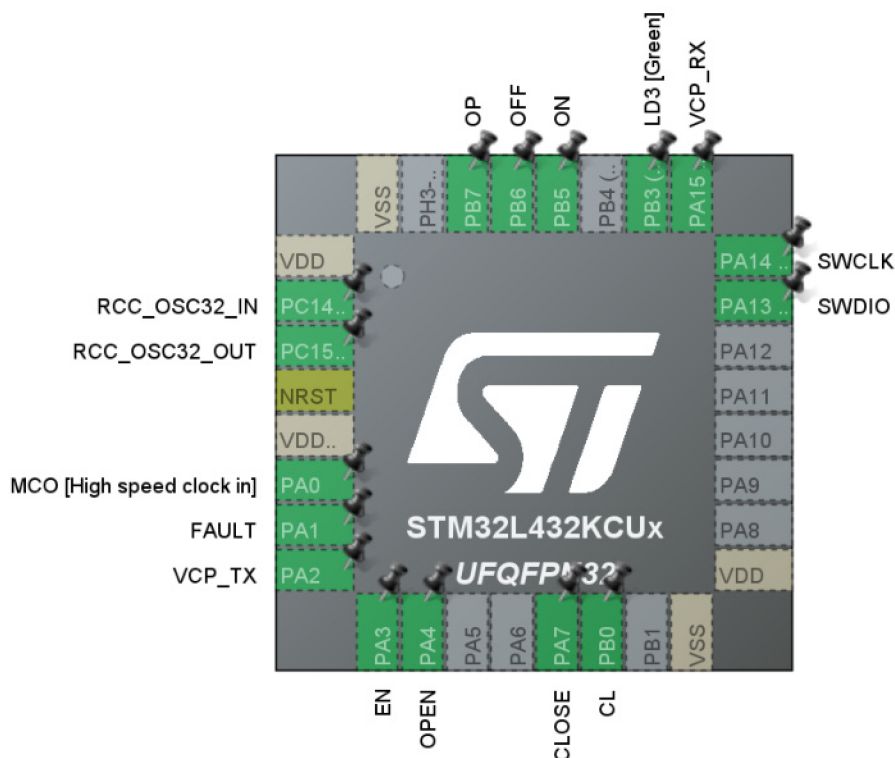
4.2 Ovládací software

Pro ovládání budiče byl použit mikroprocesor od firmy STMicroelectronics. K naprogramování bylo využito prostředí SMT32CubeMX a STM32CubeIDE. Program má za úkol demonstrovat jednoduché požadavky na chod motoru. Pomocí programu STM32CubeMX byly jednoduše nastaveny potřebné piny pro vstup a výstup díky přehlednému grafickému rozhraní. Následně byla vygenerovaná kostra samotného programu v kterém proběhlo programování.

4.2.1 Ovládání pomocí tlačítek

ON, OFF, CL a OP jsou vstupní piny, připojeny k tlačítkům na klávesnici, pomocí kterých se budič ovládá. Druhá čtveřice pinů EN, FAULT, CLOSE a OPEN je připojena přímo na desku budiče. Až na pin FAULT, který je nastaven jako výstupní se opět jedná o vstupní piny.

ON a OFF reagují na zmáčknutí a slouží k zapnutí a vypnutí chodu samotného motoru. Po stisknutí tlačítka si do pomocné proměnné *driver_on* zapíšeme hodnotu 0 nebo 1, podle toho zda bylo stisknuto ON nebo OFF. V případě, že dojde k zapnutí se rozsvítí indikační LED dioda na zelenou, sepne se port EN a vyšle signál do desky. V opačném případě se pin EN resetuje a dioda zhasne.



Obr. 4.4: Nastavení pinů v prostředí STM32CubeMX

Pomocí CL a OP se mění směr otáčení motoru. Piny tentokrát reagují na držení tlačítek. Jestli je tedy stisklé tlačítko CL (nebo OP), sepne se pin CLOSE (nebo OPEN) a vyšle se signál na desku a motor se roztočí do jedné či druhé strany. V případě požadavku brzdění motoru, je nutno obě tlačítka držet zároveň.

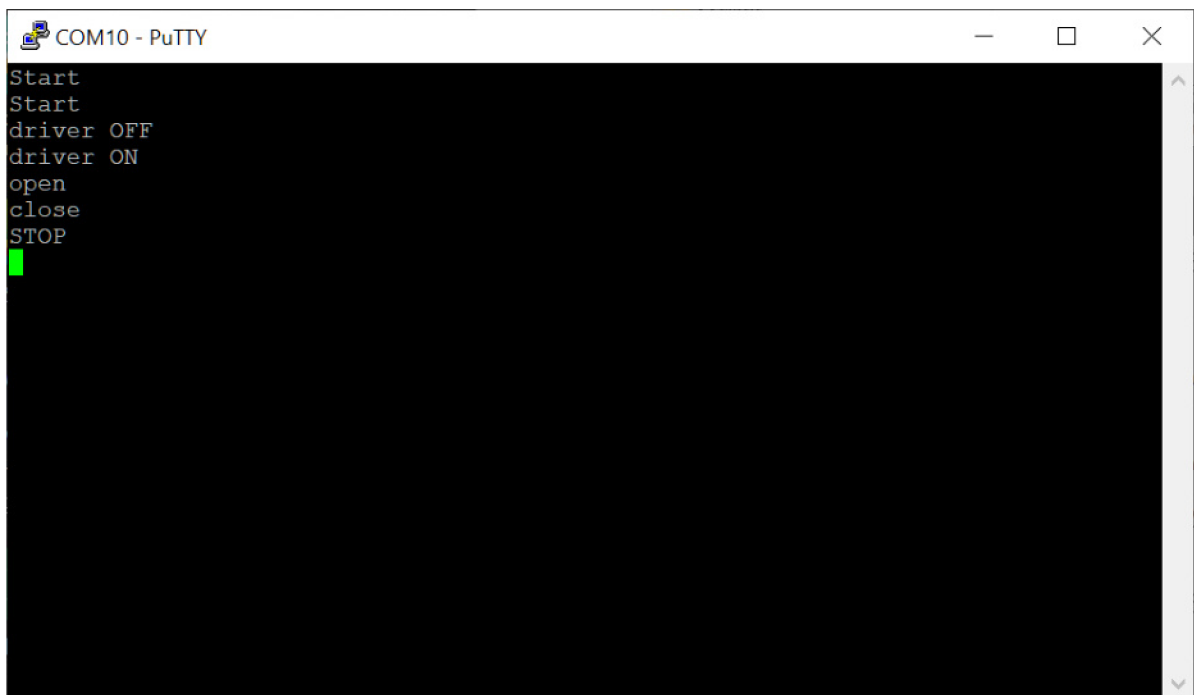
V případě, že obvod zahlásí chybu z důvodu vzniku přepětí, vyšle signál na výstupní pin FAULT a rozbliká signalizační diodu na pinu LD3.

4.2.2 Komunikace po sériové lince

Motor je možné řídit také prostřednictvím sériové konzole. K desce se dá připojit pomocí virtuální sériové linky, např. pomocí programu PuTTY. V tomto případě se využije místo tlačítek klasická klávesnice. Motor reaguje na stisk daných kláves pomocí naprogramovaných příkazů a driver nazpět pošle pouze krátký text, který zobrazí v konzoli, viz. 4.5.

"0"- vypne driver,
"1"- zapne driver,
"o"- budí trvale signál OPEN, buzení se zruší stiskem a uvolněním tlačítka OPEN,
"c"- budí trvale signál CLOSE, buzení se zruší stiskem a uvolněním tlačítka CLOSE,
"s"- motor v zabrzděném stavu.

Na počátku se při spuštění programu vypíše Start. Zprávy driver ON a driver OFF signalizují zapnutí, resp. vypnutí driveru. Buzení signálu OPEN a točení tak motoru do jedné strany je označeno jako open. Buzení druhého signálu CLOSE zase jako close. V případě brzdění motoru se zobrazí text STOP.

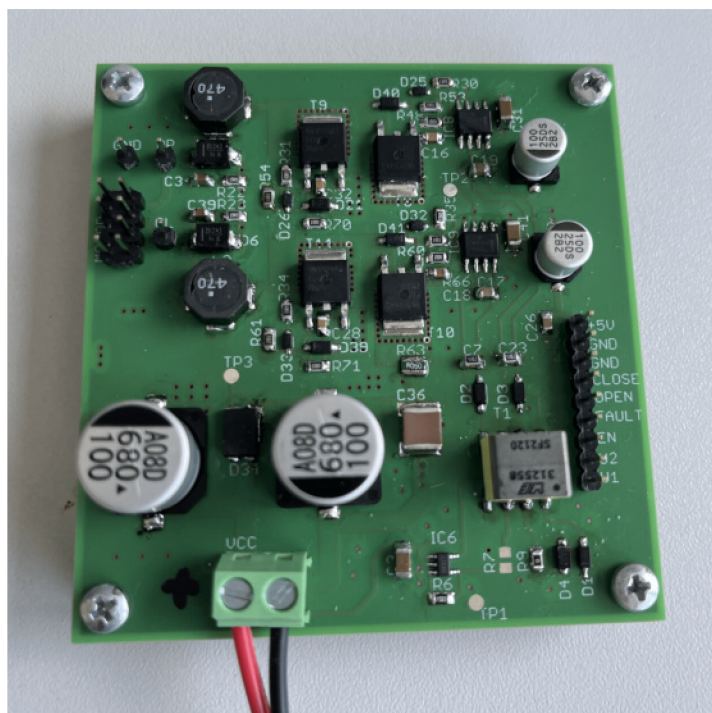


```
COM10 - PuTTY
Start
Start
driver OFF
driver ON
open
close
STOP
█
```

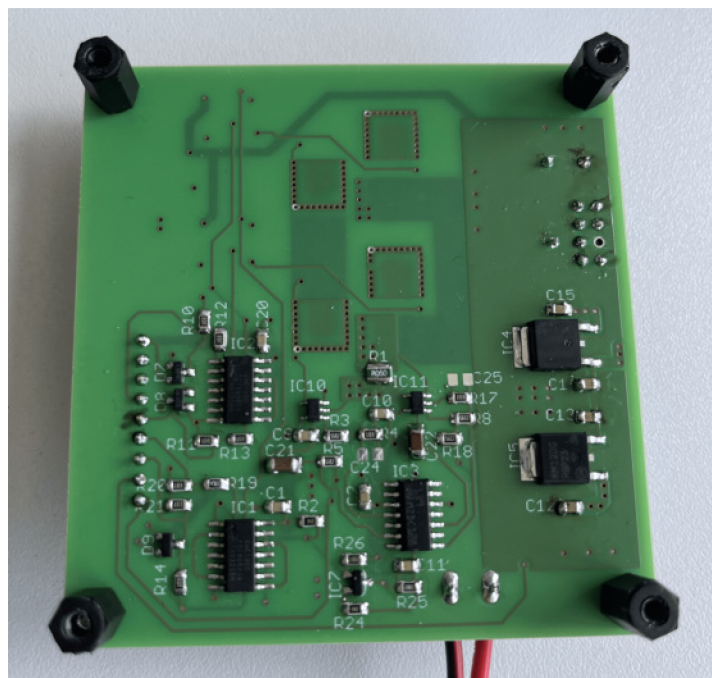
Obr. 4.5: Zobrazení vykonaných příkazů v programu PuTTY

4.3 Osazení desky

Po výrobě a naprogramování byla deska osazena, jak lze vidět na fotkách níže. Deska byla osazena z obou stran a k pohodlnějšímu pokládání je v rozích vybavena podpurnými nožičkami na stání.



Obr. 4.6: Osazená deska - strana TOP



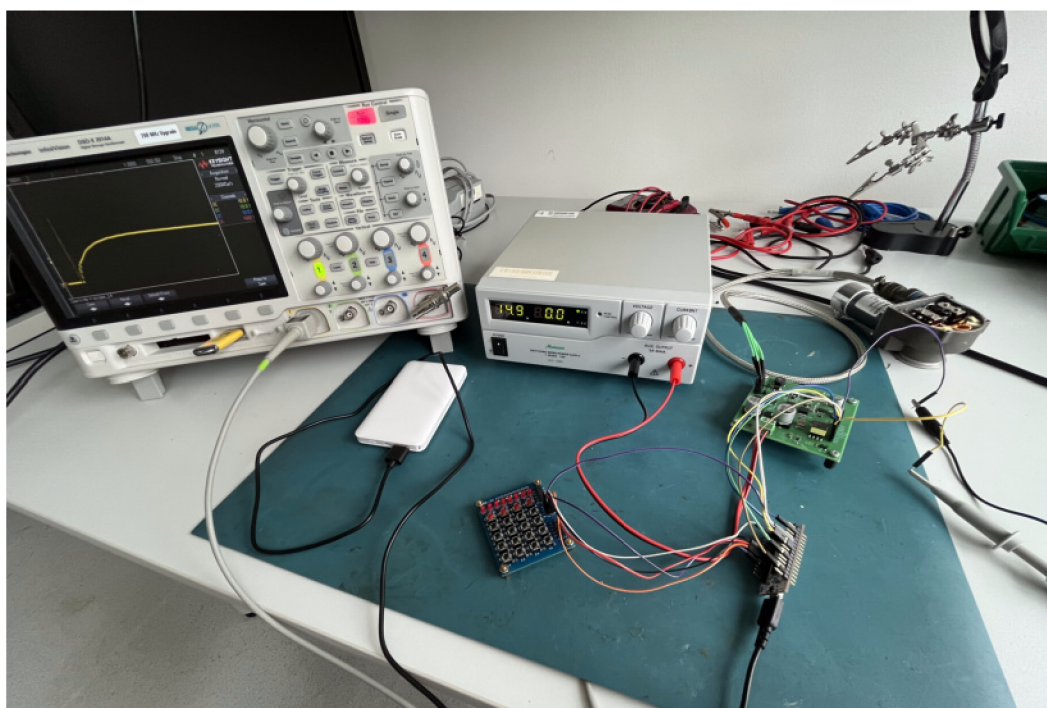
Obr. 4.7: Osazená deska - strana BOTTOM

5 Oživení a měření budiče

V poslední kapitole budou vyhodnoceny výsledky měření budiče po jeho oživení. Návrh obvodu i DPS budiče stejnosměrného elektromotoru byl realizován pomocí programu Eagle. Následně byl vyroben, osazen a naprogramován pomocí prostředí STM32CubeMX.

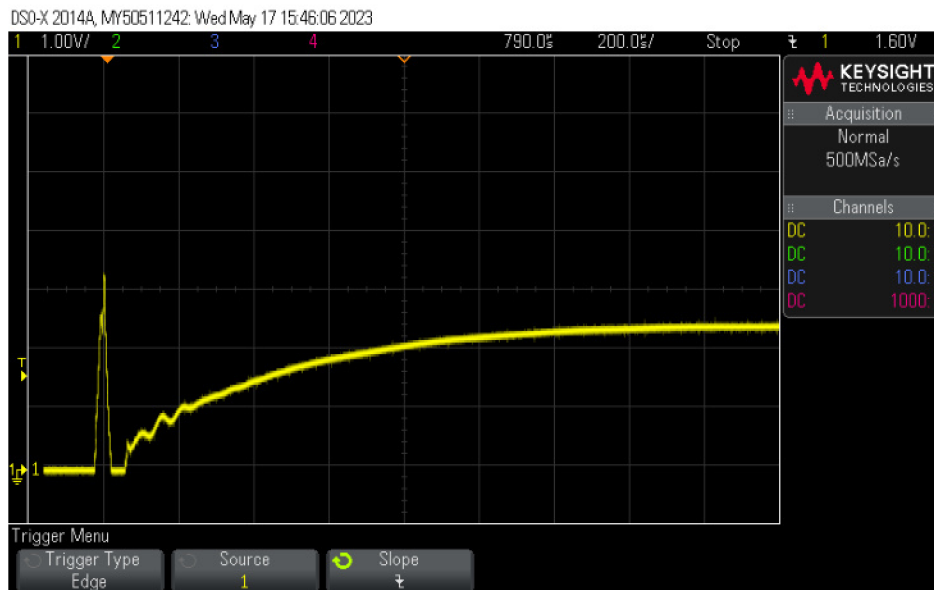
5.1 Výsledky měření

Po oživení budiče, byly naměřené potřebné průběhy, pro kontrolu správné činnosti přípravku. Pracoviště bylo zapojeno dle obrázku 5.1. K napájení mikroprocesoru byla využita klasická power banka. Zařízení bylo testováno nejdřív pro 15 V a následně pro 24 V. Výstupní průběhy byly měřeny pomocí sondy připojené k osciloskopu.



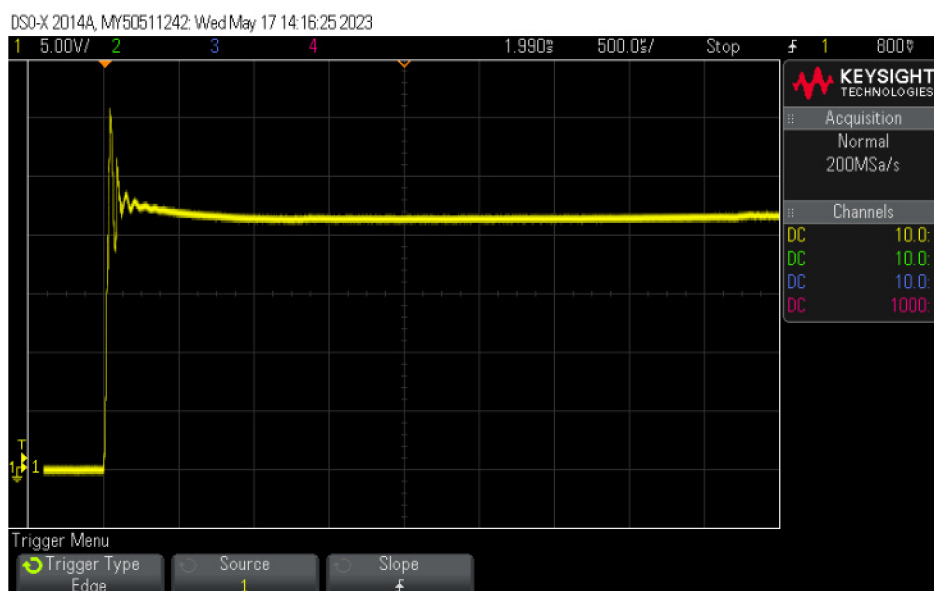
Obr. 5.1: Pracoviště pro měření budiče

Na obrázku 5.2 je vyobrazen průběh na výstupu zesilovače INA293A1. Na počátku lze vidět parazitní impulz, který trvá asi $50\mu s$. Je způsoben odrušovacím kondenzátorem na vstupu, který se musí nabít. Pak už je průběh plynulý.



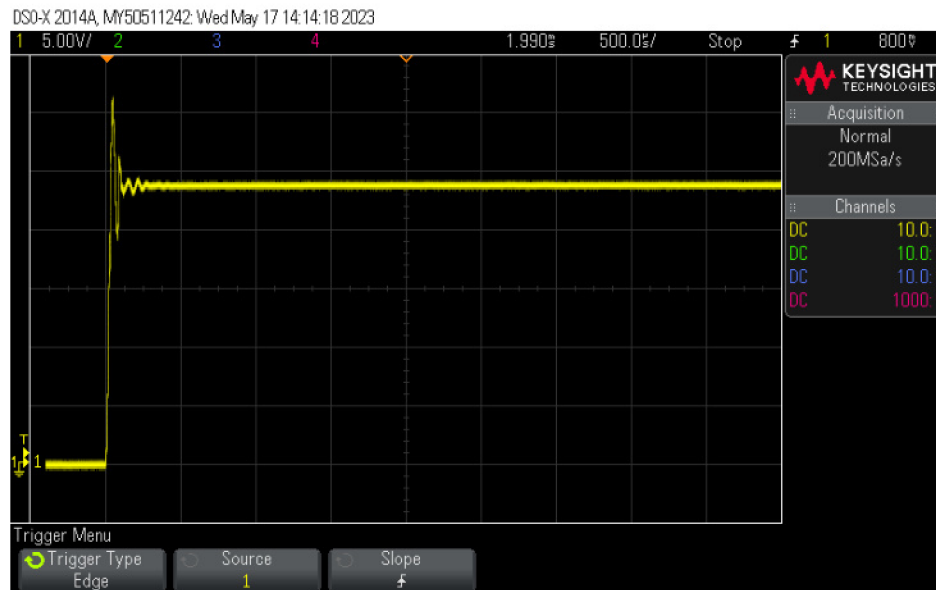
Obr. 5.2: Průběh napětí na výstupu zesilovače INA293A1

Na obrázku 5.3 je zobrazen průběh nástupní hrany na výstupu budiče portu OP. Na začátku lze vidět zákmity, které pravděpodobně vznikají z důvodu kmitání odrušovacího kondenzátoru s indukčností. Pak už průběh drží konstantní úroveň napětí 24 V, při kterém bylo zařízení měřeno.



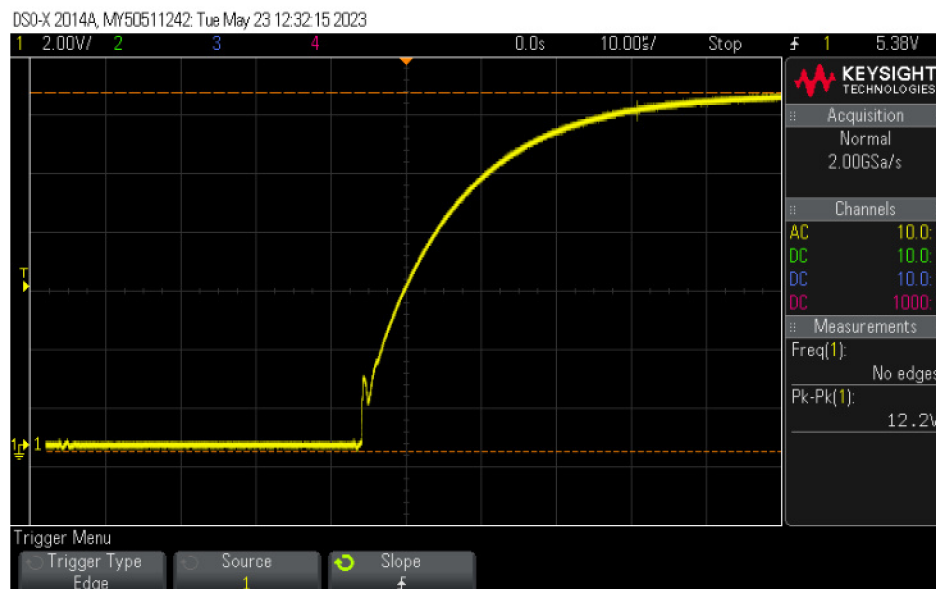
Obr. 5.3: Náběžná hrana na výstupu budiče na portu OP

Na výstupu budiče na portu CL je průběh náběžné hrany totožný s výstupem na portu OP, viz. obrázek 5.4.

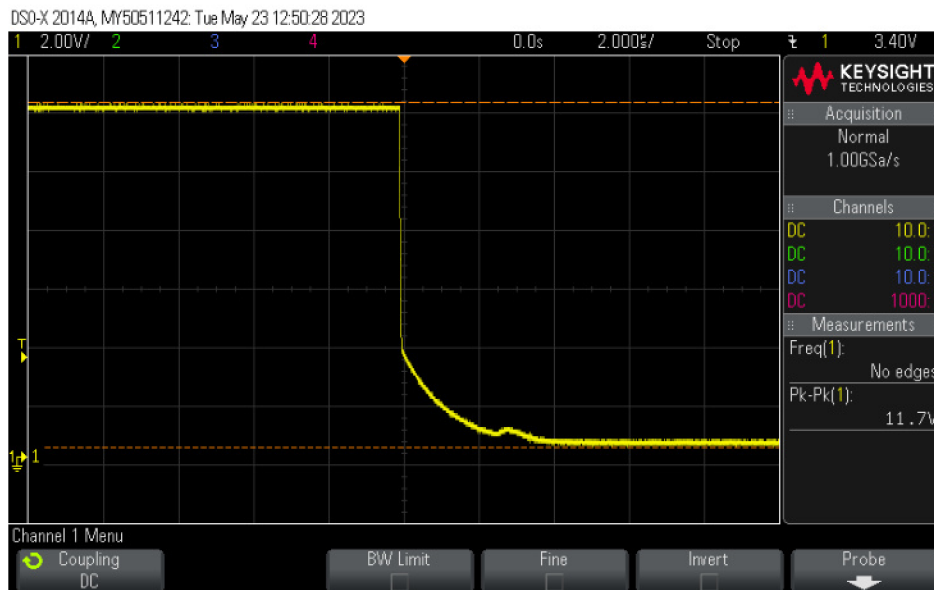


Obr. 5.4: Náběžná hrana na výstupu budiče na portu CL

Následně bylo ověřeno chování tranzistorů. Na dalších obrázcích 5.5 a 5.6 je vidno náběžnou a sestupnou hranu na gatu tranzistoru. Lze vidět očekávanou úroveň napětí 12 V a zpomalení hrany.

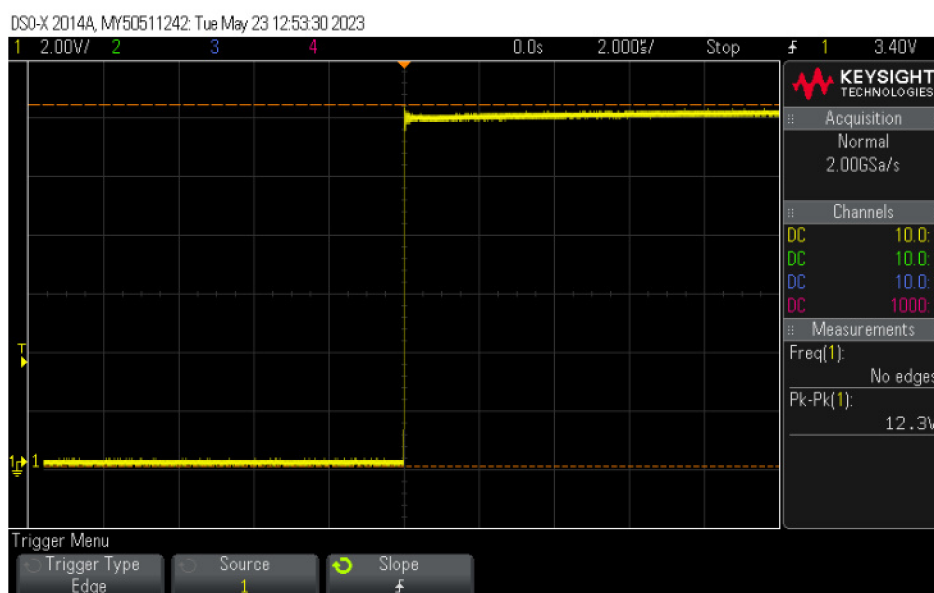


Obr. 5.5: Náběžná hrana na výstupu tranzistoru



Obr. 5.6: Sestupná hrana na výstupu tranzistoru

Na následujícím obrázku 5.7 lze pro porovnání s výstupem na gatu tranzistoru vidět nástupní hrana na výstupu bridge, která je perfektně pravoúhlá.



Obr. 5.7: Náběžní hrana na výstupu bridge

Závěr

Výsledkem bakalářské práce je návrh a samotná realizace budiče stejnosměrného elektromotoru 28V/1A pro použití v letecké palubní síti. Zařízení bylo navrženo jako H-můstek včetně ochranných obvodů a bloků pro napájení.

Při návrhu se dbalo na správné uzpůsobení pro využití v letectví. Jednotlivé části museli být navrženy univerzálně, jelikož používání velice specifických obvodů vyráběných jenom jedním výrobcem by mohlo přinést v budoucnu problém. Ochranné a logické části byly odsimulovány pomocí programu PSpice. Ze simulací je jasná správná funkce navrženého bloku.

Deska byla navržena jako čtyřvrstvá, což zefektivnilo samotný návrh a umožnilo tak zmenšit rozměry na co nejkompaktnější.

Pro ovládní budiče byl použit mikroprocesor od firmy STMicroelectronics, který má za úkol zapínat, vypínat desku a roztáčet motor do jedné či druhé strany. Pomocí LED je možné ověřit, zda je deska zapnutá nebo vypnutá. V případě vzniku možného přepětí nebo nadproudu se LED rozblíká.

Na základě návrhu byla deska vyrobena, osazena a následně oživena. Schéma návrhu, osazovací plán desky a seznam použitých součástek lze najít v přílohách práce.

Měřením se ověřila správná funkčnost. Z výsledku lze říct, že se deska chová dle očekávání a nevykazuje žádné znatelné chyby.

Výsledkem práce je funkční budič stejnosměrného elektromotoru spolu s jednoduchým softwarem pro mikroprocesor.

Literatura

- [1] *Permanent Magnet DC Motor (PMDC Motor): What is it? (And How Does it Work)*. Electrical4U [online]. 2020, 27.12.2020 [cit. 2022-11-12]. Dostupné z URL:
<<https://www.electrical4u.com/permanent-magnet-dc-motor-or-pmdc-motor/>>.
- [2] *Stejnoseměrný motor*. Wikipedia. [online]. [cit. 2022-11-12]. Dostupné z URL:
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Stejnoseměrný_motor>.
- [3] *LUCA ZACCARIAN, DC motors: dynamic model and control techniques* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z URL:
<<https://homepages.laas.fr/lzaccari/seminars/DCmotors.pdf>>.
- [4] *RTCA DO-160G. Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment. 1*. Washington, DC: RTCA, Inc., 2010.
- [5] *HOROWITZ, P., HILL, W. The Art of Electronics*. New York: Cambridge University Press, 2015.
- [6] *INA293 Ultra-Precise Current Sense Amplifier*. Texas Instruments [online]. 2019, [cit. 2022-12-05]. Dostupné z URL:
<<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina293-q1.pdf>>.
- [7] *NCP5104, NCV5104. Single Input High Voltage, High and Low-Side MOSFET or IGBT Drivers*. ON Semiconductor [online]. Červen 2015, [cit. 2022-12-21]. Dostupné z URL:
<<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/ncp5104-d.pdf>>.
- [8] *Bridging The Gaps, H-Bridges: For Motors, and More!* Diyode [online]. 2018, 12.06.2018 [cit. 2022-12-09]. Dostupné z URL:
<https://diyodemag.com/projects/bridging_the_gaps>.
- [9] *LT8303 100VIN Micropower Isolated Flyback Converter with 150V/450mA Switch*. Analog Devices [online]. [cit. 2022-12-21]. Dostupné z URL:
<<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/lt8303.pdf>>.
- [10] *DEMO MANUAL DC2490A LT8303 Micropower No-Opto Isolated Flyback Converter*. Linear Technology [online]. 2004, [cit. 2022-12-22]. Dostupné z URL:
<<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/DC2490AF.PDF>>.

- [11] *750312558 WE-FLYLT Flyback Transformer*. Würth Electronics [online]. 2022, 10.11.2022 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z URL: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/445/750312558-3097030.pdf>.
- [12] *TVS Diodes, Surface Mount - 600W > SMBJ series*. Littelfuse, Inc. [online]. 2020, 06.03.2020 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z URL: <https://www.littelfuse.com/media?resourcetype=datasheets&itemid=fc83cff9-7655-4e4e-b1dc-e1b436c0b632&filename=littelfuse-tvs-diode-smbj-datasheet>.
- [13] *MEL CLARK, Microsemi Corporation - Scottsdale* Lightning Protection for aircraft electrical power and data communication systems, 2004

Seznam použitých skratek

DPS	Deska plošných spojů
MLCC	Multi-Layer Ceramic Capacitor, Vícevrstvý keramický kondenzátor
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
NAND	Logická operace Not-AND
PMDC	Permanent Magnet Direct Current, Stejnoseměrný motor s permanentním magnetem

A Zdrojový kód pro MATLAB

```
%identifikace motoru
clear;

data = load("28 V.txt");      %nacteni souboru s datami
Rs = 0.75;                   %seriovy snimaci odpor na pripravku
Rsina = 0.05;                %seriovy snimaci odpor u INA293
Ra = 12;                      %DC odpor motorku
nnom = 5000 / 60;            %nominalni otacky 5 tis. ot/min
Unom = 28;                    %nominalni napeti

%cas od 0
tt = data(:,1) - data(1,1);
vv = data(:,2);

%nulovani offsetu
II = (tt < 18e-3);           %od 0 do 18ms byl nulovy proud
v0 = mean(vv(II));           %prumer
vv = vv - v0;                 %odecist od namereneho napeti

%finalni hodnota - prumer z useku 185ms - 195ms
II = (tt >= 185e-3) & (tt <= 195e-3);
vust = mean(vv(II));
inom = vust / Rs;             %prepocet na proud

%vypocet parametru A a B
KK = (Unom - Ra*inom) / (2*pi*nnom);
BB = KK*inom / (2*pi*nnom);

%vypis vysledku
fprintf('Iust = %g A\n', inom);
fprintf('K = %g\n', KK);
fprintf('B = %g\n', BB);

%vyber napeti pro cas >= 21ms
%posuneme okamzik sepnuti do pocatku
II = (tt >= 21e-3);
```

```

tt2 = tt(II);
tt2 = tt2 - tt2(1);
vv2 = vv(II);

%filtrace prumerovanim pres poslednich Na vzorku
a=1;
Na = 10;
b= ones(1,Na) /Na;
vv3 = filter(b,a,vv2);

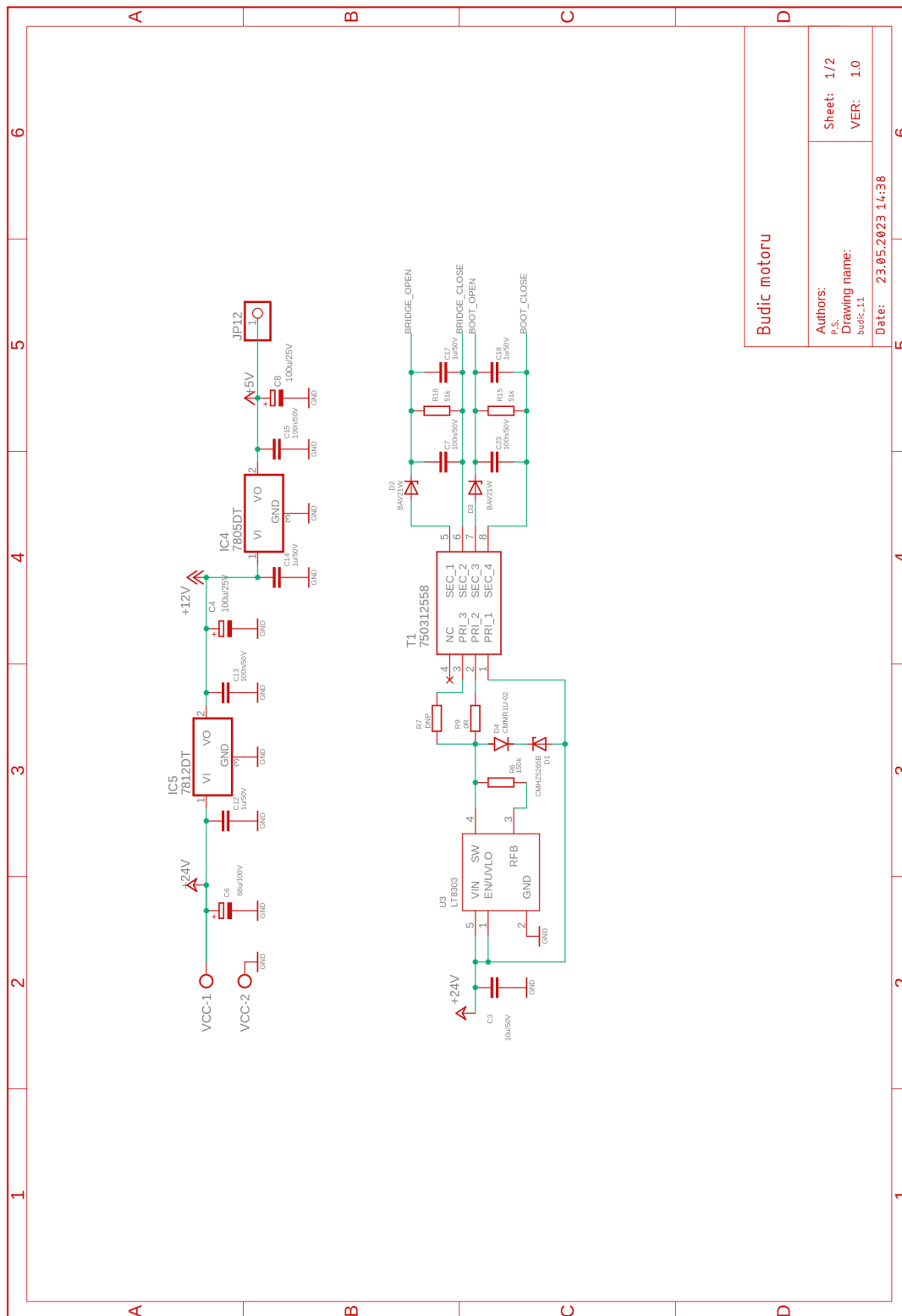
%prepocet napeti na proud
ii = vv3 / Rs;

%zobrazeni
plot(tt2*1000,ii);
grid on;
xlabel('tu[ms]');
ylabel('iu[A]');

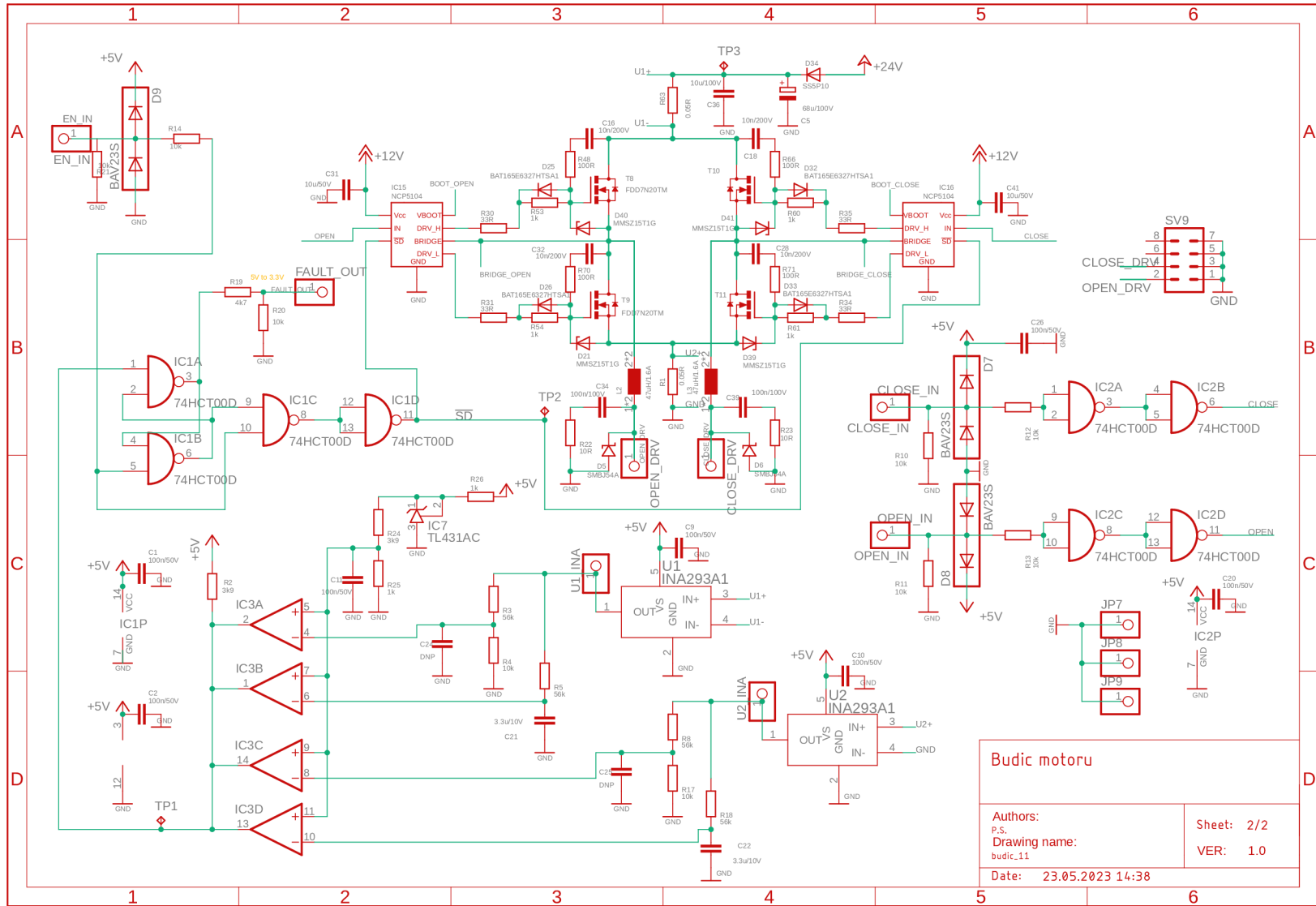
%export dat pro PSpice jako ubytek na odporu 50mOhm
vs = ii * Rsina;
datan = [tt2,vs];
save('datan.txt','datan','-ascii');

```

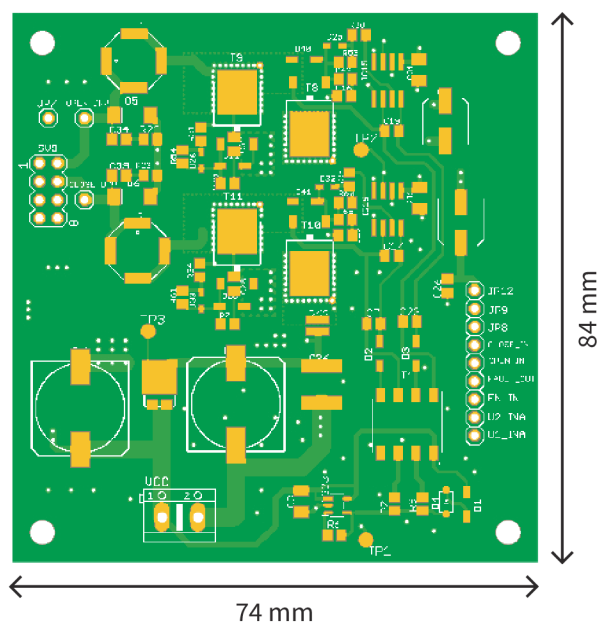
B Návrh budiče



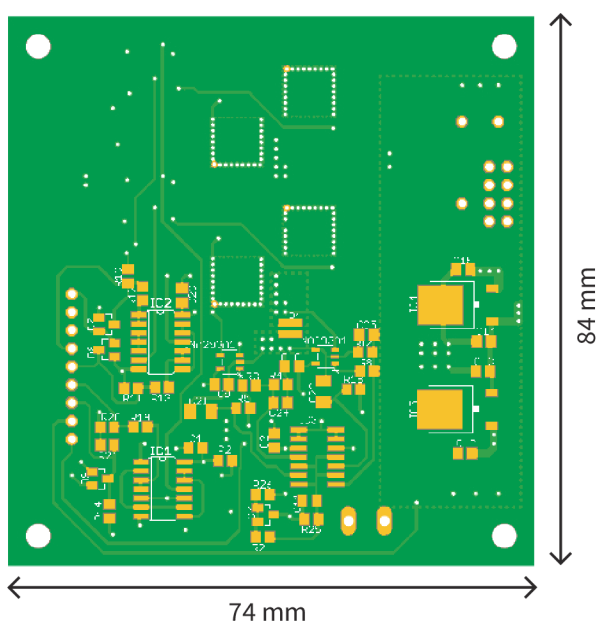
Budič motoru	
Authors:	Sheet: 1/2
P.S. Drawing name:	budic_1.1
VER: 1.0	
Date: 23.05.2023 14:38	



C Provedení plošního spoje



Obr. C.1: Strana top



Obr. C.2: Strana bottom

E Seznam součástek

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	100n/50V	C0805K	MLCC
C2	100n/50V	C0805K	MLCC
C3	10u/50V	C1206K	MLCC
C4	100u/25V	-	Al elektrolytický kapacitor
C5	68u/100V	12.5-SMD	Al elektrolytický kapacitor
C6	68u/100V	12.5-SMD	Al elektrolytický kapacitor
C7	100n/50V	C0805K	MLCC
C8	100u/25V	-	Al elektrolytický kapacitor
C9	100n/50V	C0805K	MLCC
C10	100n/50V	C0805K	MLCC
C11	100n/50V	C0805K	MLCC
C12	1u/50V	C0805K	MLCC
C13	100n/50V	C0805K	MLCC
C14	1u/50V	C0805K	MLCC
C15	100n/50V	C0805K	MLCC
C16	10n/200V	C0805K	MLCC
C17	1u/50V	C0805K	MLCC
C18	10n/200V	C0805K	MLCC
C19	1u/50V	C0805K	MLCC
C20	100n/50V	C0805K	MLCC
C21	3,3u/10V	C1206K	tantalový kapacitor
C22	3,3u/10V	C1206K	tantalový kapacitor
C23	100n/50V	C0805K	MLCC
C24	1n	C0805K	MLCC
C25	1n	C0805K	MLCC
C28	10n/200V	C0805K	MLCC
C31	10u/50V	C1206K	MLCC
C32	10n/200V	C0805K	MLCC
C34	100n/100V	C0805K	MLCC
C36	10u/100V	C2220K	MLCC
C39	100n/100V	C0805K	MLCC
C41	10u/50V	C1206K	MLCC
D1	CMHZ5265B	SOD123	Zenerova dioda
D2	BAV21W	SOD123	malá signálová dioda

D3	BAV21W	SOD123	malá signálová dioda
D4	CMMR1U-02	SOD123	výkonová dioda
D5	SMBJ54A	DO-214AA	transil
D6	SMBJ54A	DO-214AA	transil
D21	MMSZ15T1G	SOD123	Zenerova dioda
D25	BAT165E6327HTSA1	SOD323	Schottkyho dioda
D26	BAT165E6327HTSA1	SOD323	Schottkyho dioda
D32	BAT165E6327HTSA1	SOD323	Schottkyho dioda
D33	BAT165E6327HTSA1	SOD323	Schottkyho dioda
D34	SS5P10	TO277A	Schottkyho dioda
D39	MMSZ15T1G	SOD123	Zenerova dioda
D40	MMSZ15T1G	SOD123	Zenerova dioda
D41	MMSZ15T1G	SOD123	Zenerova dioda
IC1	74HCT00D	SO14	logické hradla
IC2	74HCT00D	SO14	logické hradla
IC3	LM139	SO14	analogové komparátory
IC4	7805DT	TO252	lineární regulátor napětí
IC5	7812DT	TO252	lineární regulátor napětí
IC7	TL431AC	SOT23	nastavitelný regulátor
IC15	NCP5104	SO8	vysokonapěťový ovladač
IC16	NCP5104	SO8	vysokonapěťový ovladač
L2	47uH/1.6A		výkonový induktor
L3	47uH/1.6A		výkonový induktor
R1	0.05R	PRL1632	SMD rezistor
R2	3k9	R0805	SMD rezistor
R3	56k	R0805	SMD rezistor
R4	10k	R0805	SMD rezistor
R5	56k	R0805	SMD rezistor
R6	150k	R0805	SMD rezistor
R8	56k	R0805	SMD rezistor
R9	0R	R0805	SMD rezistor
R10	10k	R0805	SMD rezistor
R11	10k	R0805	SMD rezistor
R15	51k	R0805	SMD rezistor
R16	51k	R0805	SMD rezistor
R17	10k	R0805	SMD rezistor
R18	56k	R0805	SMD rezistor

R19	4k7	R0805	SMD rezistor
R20	10k	R0805	SMD rezistor
R21	10k	R0805	SMD rezistor
R22	10R	R0805	SMD rezistor
R23	10R	R0805	SMD rezistor
R24	3k9	R0805	SMD rezistor
R25	1k	R0805	SMD rezistor
R26	1k	R0805	SMD rezistor
R30	33R	R0805	SMD rezistor
R31	33R	R0805	SMD rezistor
R34	33R	R0805	SMD rezistor
R35	33R	R0805	SMD rezistor
R48	100R	R0805	SMD rezistor
R53	1k	R0805	SMD rezistor
R54	1k	R0805	SMD rezistor
R60	1k	R0805	SMD rezistor
R61	1k	R0805	SMD rezistor
R63	0.05R	R0805	SMD rezistor
R66	100R	R0805	SMD rezistor
R70	100R	R0805	SMD rezistor
R71	100R	R0805	SMD rezistor
T1	750312558	750312558	výkonový transformátor
T8	FDD7N20TM	TO-252(D-PAK)	MOSFET tranzistor
T9	FDD7N20TM	TO-252(D-PAK)	MOSFET tranzistor
T10	FDD7N20TM	TO-252(D-PAK)	MOSFET tranzistor
T11	FDD7N20TM	TO-252(D-PAK)	MOSFET tranzistor
U1	INA293A1	SOT-A1IDBVR	zesilovač snímání proudu
U2	INA293A1	SOT-A1IDBVR	zesilovač snímání proudu
U3	LT8303	S-5-ADI	konvertor typu flyback