



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY**

**A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY**

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

**SPÍNAČ VYSOKÝCH PROUDU PRO MOBILNÍ  
ROBOTIKU**

HIGHT-CURRENT SWITCH FOR MOBILE ROBOTICS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Martin Buday

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Aleš Jelínek

BRNO 2017

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Martin Buday

**ID:** 173621

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2016/17

**NÁZEV TÉMATU:**

## Spínač vysokých proudů pro mobilní robotiku

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Seznamte se s problematikou spínání velkých proudů (50 – 300 A) pomocí polovodičových prvků a se specifickými potřebami mobilní robotiky. Provedte analýzu možných stavů při poruše spínače a pokuste se omezit riziko nekontrolované havárie.
2. Na základě výpočtů správně dimenzujte všechny součástky s ohledem na kvalitu přechodného děje při spínání a teplotní poměry při krátkodobém přetížení i dlouhodobém provozu.
3. Navrhněte a realizujte jednotlivé modely spínače pro různé výkony.
4. Za použití dostupné laboratorní techniky realizujte testovací pracoviště, které automaticky proměří vlastnosti připojeného spínače a vyhodnotí, jestli jsou v přednastavených mezích.
5. Zkompletujte výrobní dokumentaci všech spínačů a zapojení testovacího pracoviště. Presentujte dosažené výsledky.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

STENGL, Jens Peer a Jenő TIHANYI. Výkonové tranzistory MOSFET. 1. Praha: BEN - technická literatura, 1999. ISBN 80-86056-54-6.

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 29.5.2017

**Vedoucí práce:** Ing. Aleš Jelínek

**Konzultant:**

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

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

## **Abstrakt**

Obsahom tejto semestrálnej práce je návrh výkonového spínača ktorý je určený pre spínanie napájacieho napätia pre mobilné roboty. Práca obsahuje návrh celého zariadenia od prvotných návrhov schém až po konečný výrobok. Ďalej vysvetľuje princíp činnosti tranzistoru MOS-FET ako výkonového spínača. A zaoberá sa aj paralelným spájaním MOS-FET tranzistorov pre zvýšenie spínacieho výkonu.

## **Kľúčové slova**

MOS-FET, výkonový spínač, mobilná robotika, spínanie veľkých výkonov, tranzistor

## **Abstract**

Content of this semester work is project of the power switch which is assigned for switching of the power supply in mobile robots. The work contain design of the whole device from the initial proposals of the electro diagrams up to finished product. Further it explains the principle of the function for transistor MOS-FET as a power switch. And it also deals with the parallel connection of the MOS-FET transistors to increase switching power output.

## **Keywords**

MOS-FET, power switch, mobile robotics, High-power switching, transistor

## **Bibliografická citácia:**

BUDAY, M. *Spínač vysokých proudů pro mobilní robotiku*. Brno: Vysoké učení technické v Brne, Fakulta elektrotechniky a komunikačných technologií, 2017. 46 s. Vedúci práce Ing. Aleš Jelínek.

## **Prehlásenie**

Prehlasujem, že svoju záverečnú prácu na tému "Spínač vysokých proudů pro mobilní robotiku" som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname použitej literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nepovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobných alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka č. 40/2009 Zb.

V Brna dňa **29 mája 2017**

.....

podpis autora

## **Pod'akovanie**

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Aleš Jelínek za metodickú pedagogickú a odbornú pomoc taktiež za ďalšie cenné rady. Ďalej ďakujem firme NES Nová Dubnica s.r.o. za praktické rady a skúsenosti.

V Brne dňa **29. mája 2017**

.....  
podpis autora

## OBSAH

1	Úvod.....	6
2	Spínanie veľkých výkovov .....	7
2.1	MOS-FET tranzistory.....	7
2.2	Princíp činnosti MOS-FET tranzistoru .....	7
2.2.1	MOS-FET s ochudobňovaným kanálom .....	8
2.2.2	MOS-FET s obohacovaným kanálom.....	8
2.2.3	Výkonové MOS-FET tranzistory .....	9
2.3	Výber správneho spínacieho tranzistora .....	10
2.3.1	Parazitné kapacity MOS-FET tranzistora .....	11
2.3.2	Využitie MOS-FET tranzistorov .....	12
3	Princíp činnosti výkonového spínača pre mobilnú robotiku .....	13
3.1.1	Stratový výkon MOS-FET tranzistora .....	13
3.1.2	Popis činnosti zopnutia výkonového spínača .....	15
3.1.3	Popis činnosti vypnutia výkonového spínača .....	17
3.2	Radiace obvody výkonového spínač .....	18
3.2.1	Napájanie .....	18
3.2.2	Nábojová pumpa .....	19
3.2.3	Ovládanie výkonového spínača .....	20
3.2.4	Popis logiky výkonového spínača.....	20
3.2.5	Budič výkonového spínača .....	21
3.2.6	Ochranné prvky výkonového spínača .....	22
3.3	Výroba plošného spoja .....	23
4	Paralelne radenie MOS-FET tranzistorov .....	24
4.1	Riadenie paralelne spájaných MOS-FET tranzistorov .....	24
4.2	Paralelne spínanie MOS-FET tranzistorov .....	25
5	Teplotné zataženie .....	27
5.1	Oteplenie 20A_verzia .....	29
5.2	Oteplenie 40A_verzia .....	30
5.3	Oteplenie 80A_verzia .....	31
5.4	Oteplenie 160A_verzia .....	32
6	Meracie pracovisko.....	33
6.1	Testovací prípravok .....	34
6.1.1	Komunikácia prípravku a PC.....	34
6.1.2	Meranie teploty .....	35
6.2	Test jedna.....	36
6.3	Test dva.....	37
7	Záver.....	38

## Zoznam obrázkov

Obr.1.2-1-1 a)Zopnutý stav $U_{GS}=0V$ b)Vypnutý stav $U_{GS}=-15V$ [1].....	8
Obr.1.2-2 a)Vypnutý stav $U_{GS}=0V$ b)Zopnutý stav $U_{GS}=15V$ [1].....	9
Obr.1.2-3 a)Vypnutý stav $U_{GS}=0V$ b)Zopnutý stav $U_{GS}=+15V$ [1].....	9
Obr.1.2-4 Výkonový MOS-FET s obohacovaným kanálom[1].....	10
Obr.2.3 Reálny model MOS-FET tranzistoru[2].....	10
Obr.2.3.1 Kapacita MOS-FET tranzistoru v zopnutom stave[2].....	11
Obr.3.1.2-1 (1)Priebeh napätia na riadiacej elektróde.....	15
Obr.3.1.2-1(2)Priebeh prúdu indukovaným kanálom.....	15
Obr.3.1.2-2 Priebeh prúdu otvoreným kanálom MOS-FET tranzistoru.....	17
Obr.3.1.3-1 Priebeh napätia na riadiacej elektróde MOS-FET tranzistoru vypnutie...17	
Obr.3.1.3-2 (1)Priebeh napätia $U_G$ na hradle.....	18
Obr.3.1.3-2 (2)Priebeh prúdu na bočníku 150A/60mV.....	18
Obr.3.2.1 Zapojenie stabilizátora 78L15.....	19
Obr.3.2.2 Zapojenie nábojovej pumpy pomocou IR2153DS.....	19
Obr.3.2.3 Zapojenie ovládania logiky výkonového spínača.....	20
Obr.3.2.4 Zapojenie logiky výkonového spínača.....	21
Obr.3.2.5 Zapojenie budiča a výkonovej časti.....	22
Obr.3.2.6 Ochranné prvky výkonového spínača.....	22
Obr.3.3 Návrh plošného spoja vrstva Bottom a Top.....	23
Obr.4.3 Priebeh riadiacich pulzov nabežná hrana časová konštanta $1\mu s$ .....	25
Obr.4.3-1 Priebeh riadiacich pulzov a spínacieho prúdu kanál .....25	
Obr.4.3-2 Priebeh riadiacich pulzov dobežaná hrana časová konštanta $1\mu s$ .....26	
Obr.4.3-2 (1)Priebeh riadiacich pulzov dobežaná hrana časová konštanta $1\mu s$ .....26	
Obr.4.3-2 (2)Priebeh prúdu kanál 2.....26	
Obr.5 Prevedenie výkonových spínačov .....27	
Obr.5-1 Rekuperačná komora.....28	
Obr.5-1 Riadiaca jednotka rekuperačnej komory.....28	
Obr.5.1 Snímky merania teploty 20A MIN-MAX.....28	
Obr.5.2-1 Snímky merania teploty 40A MIN-MAX.....29	
Obr.5.3-1 Snímky merania teploty 80A MIN-MAX.....30	
Obr.5.4-1 Snímky merania teploty 160A MIN-MAX.....31	
Obr.6 Merací prípravok.....32	
Obr.6.1 Popis meracieho prípravku.....33	
Obr.6.1.1Výstup z meracieho prípravku.....34	

## **Zoznam grafov**

<i>Grf.5.1</i> Priebeh teploty verzia 20A.....	29
<i>Grf.5.2</i> Priebeh teploty verzia 40A.....	30
<i>Grf.5.3</i> Priebeh teploty verzia 80A.....	31
<i>Graf.5.4</i> Priebeh teploty verzia 160A.....	32
<i>Graf 6.1.2</i> Porovnanie teplôt s výrobcom.....	35
<i>Graf 6.1.2-1</i> Korekčná krivka.....	36



# 1 ÚVOD

V dnešnej dobe ide rozvoj elektroniky stále do vpred. Tým pádom si vyžaduje nové technológie princípy a riešenia. Dnes je veľký rozvoj robotiky kde robotika nie je len programovanie a riadiaca elektronika ale aj výkonová elektronika a spínanie veľkých výkonov. Pretože dané zariadenia je potrebná napájať. Konkrétne mobilné roboty sa napájajú z batérii. Kde je potrebné nejako tento výkon ovládať. K tomu slúžia výkonové spínače tieto spínače môžu mať rôzne podoby napríklad taký spínač môže byť realizovaný pomocou relé alebo stýkača kde tieto spínače majú radu nevýhod s ktorými musíme počítať. Napríklad jednou z nevýhod je väčšia hmotnosť rušenie keďže takýto spínač pracuje na princípe elektromagnetizmu ďalej nedokážu prenášať až také extrémne výkony ako mobilná robotika vyžaduje. Pretože im to konštrukcia nedovoľuje (opaľovanie kontaktov).

Takže sa naskytá riešenie pomocou výkonových polovodičových súčiastok. Kde v dnešnej dobe je toto odvetvie výkonových súčiastok pomerne na dobrej úrovni. Je možné si vybrať či už bipolárne alebo unipolárne tranzistory, tyristory, triaky. Takýto polovodičový výkonový spínač je pre mobilnú robotiku výhodnejší svojimi vlastnosťami ako relé alebo stýkač.

Takto konštruované výkonové spínače majú široké využitie a to nie len v robotike ale napríklad využívajú sa aj pri galvanickom pokovovaní ako reverzy (prepínač polarity anóda katóda ).

## 2 SPÍNANIE VEĽKÝCH VÝKONOV

Spínanie veľkých výkonov pomocou polovodičových súčiastkach sa v dnešnej dobe realizuje prevažne pomocou tranzistorov zo štruktúrou MOS. Pre svoje dobré vlastnosti sa používajú tyristory GOT, triaky, MOS-FET tranzistory alebo IGBT ktoré zažili veľký rozvoj hlavne v tomto storočí. Všetky tieto polovodičové prvky sa vyrábajú v rôznych prevedeniach s rôznymi parametrami a dokážu pracovať v rôznych režimoch. Pre mobilnú robotiku sú všetky tieto súčiastky atraktívne keďže ich prevedenie je pomerne malé a sú cenovo dostupné. S všetkých týchto súčiastok na spínanie veľkých výkonov je vo výkonovej elektronike najrozšírenejší MOS-FET tranzistor.

### 2.1 MOS-FET tranzistory

MOS-FET je skratkou Oxide Semiconductor Field Effect Transistor. Jedná sa o tranzistory riadené polom. Tieto tranzistory sú najpoužívanejšie vo výkonovej elektronike pre ich výborné vlastnosti ako je napríklad rýchlosť zopnutia. Možnosť spínať vysoké prúdy a tým pádom aj vysoké výkony. MOS-FET tranzistorov je viacero druhov ich základné delenie je.

- MOS-FET
  - S ochudobňovaním kanálom
    - N -kanál
  - S obohacovaním kanálom
    - N -kanál
    - P -kanál

Ďalej je možné ich deliť na:

Signálové ktoré majú kanál D-S dlhý a tenký preto majú vzopnutom stave veľký odpor. [1]

Výkonové kanál D-S je krátky a široký tým pádom má v zopnutom stave malý odpor a výborne sa hodí na spínanie veľkých výkonov. [1]

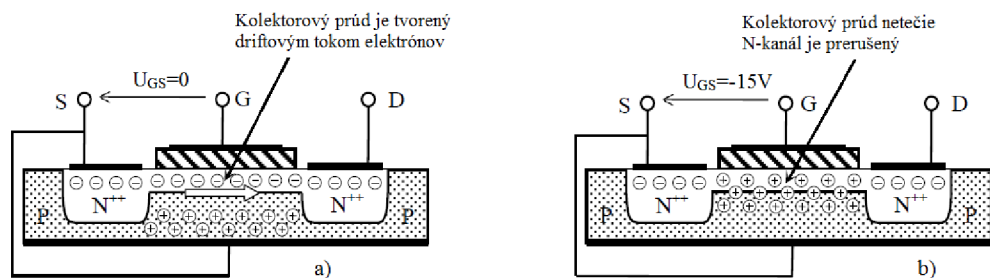
### 2.2 Princíp činnosti MOS-FET tranzistoru

MOS-FET je riadený elektrickým polom a na prechode sa podieľajú buď nosiče typu P alebo typu N. Čo závisí od vodivého kanála. Princíp činnosti MOS-FET tranzistorov je v podstate veľmi podobný či už sa jedna o tranzistor typu P alebo typu N. Vo väčšine prípadov sa jedna o trojbran kde vývody sú značené S(socure), G(gate), D(drain) v ojedinelých prípadoch sa môže vyskytnúť aj štvorbran kde je vyvedený aj substrát tento vývod sa značí rôzne ale najčastejšie sa používa

B(bulk). Pokiaľ tento vývod nie je vyvedený tak ho výrobca spojil v puzdre s editorom S(socure). Jednou z nevýhod tohto tranzistora je že je veľmi náchylný na statickú energiu. Ak pri práci s týmto tranzistorom dôjde k statickému výboju vo väčšine prípadoch sa prerazí tenká vrstva oxidu a tranzistor je nenávratne zničený. Preto je potrebné dodržiavať všetky zásady práce s MOS-FET tranzistorami.

## 2.2.1 MOS-FET s ochudobňovaným kanálom

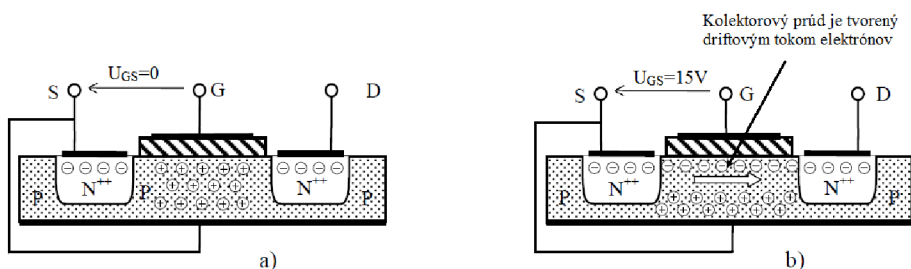
Tranzistor s ochudobňovaným kanálom je označený na Obr.2.2-1. Pri nulovom riadiacom napätí je kanál vodivý fyzicky existuje na dráhe D-S je tranzistor vodivý, tečie ním kolektorový prúd tvorený driftujúcimi elektrónmi. Kanál zaniká až privedením záporného napätia na riadiacu elektródu. Záporné napätie  $U_{GS}=-15V$  vytiahne kladné diery z oblasti P smerom hore do kanála, čím sa stane kanál nepriechodný pre driftujúce elektrónmi. Kanál sa zavrie Tieto tranzistory nie sú príliš vhodné pre výkonové aplikácie. Hlavným dôvodom je fakt, že pri výpadku riadiaceho napätia dochádza k otvoreniu čiže trvalému zopnutiu. Jediné rozumné použitie týchto tranzistorov je vo výkonových kaskádach kde sa tieto vlastnosti využívajú.[1]



Obr.2.2-2-1 a) Zopnutý stav  $U_{GS}=0V$  b) Vypnutý stav  $U_{GS}=-15V$ [1]

## 2.2.2 MOS-FET s obohacovaným kanálom

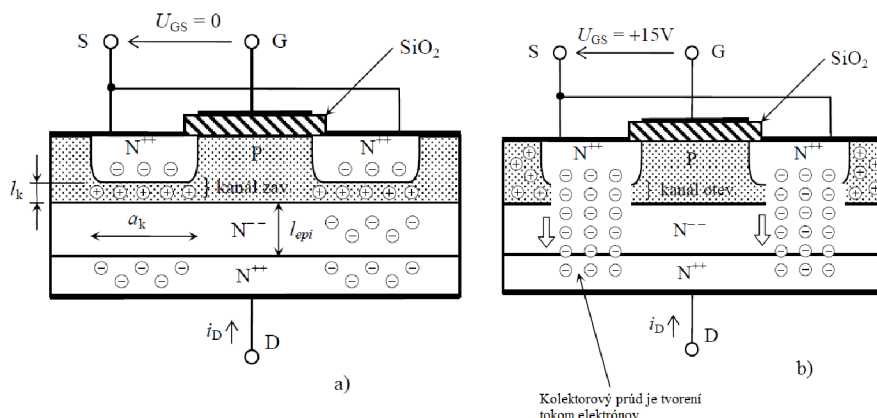
Tranzistor s obohacovaným kanálom je naznačený na obrázku Obr 2.2-2. pri nulovom riadiacom napätí kanál fyzicky neexistuje, čiže medzi D-S netečie žiadny kolektorový prúd. Tranzistor je zatvorený. Kanál sa začne indukovať až vplyvom riadiaceho napätia privedeného na riadiacu elektródu jedná sa o kanál typu N napätie  $U_{GS}$  musí byť kladné inak sa nezačne indukovať kanál a tranzistor nevedie žiaden prúd. Vodivý kanál vznikne vyprázdnením oblasti P, z ktorej sú odsaté diery. Kolektorový prúd je tvorený elektrónmi driftujúcimi cez vzniknutý kanál.[1] Po vytvorení vodivostného kanála a nabití parazitných kapacít do hradla tečie veľmi malý prúd rádovo mikro ampéry. Tieto typy tranzistorov sú najpoužívanejšie v elektronike či sa už jedná o signálové alebo výkonové tranzistory.



Obr.2.2-2 a) Vypnutý stav  $U_{GS}=0V$  b) Zopnutý stav  $U_{GS}=15V$ [1]

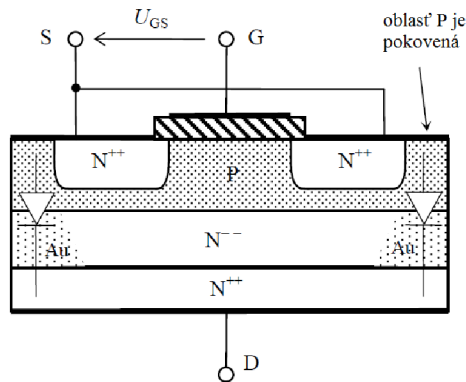
### 2.2.3 Výkonové MOS-FET tranzistory

Ako je z obrázka Obr.2.2-3 vidno tak výkonový MOS-FET tranzistor má podstatne kratší kanál ako signálové MOS-FETy. Firmy sa pri výkonových MOS-FEToch snažia navrhnúť geometriu kremíkového čipu tak aby dosiahli čo najkratší kanál. A tým je možné spínať väčšie výkony lebo sa zmenší odpor kanála a sú na ňom menšie výkonové straty.



Obr.2.2-3 a) Vypnutý stav  $U_{GS}=0V$  b) Zopnutý stav  $U_{GS}=+15V$ [1]

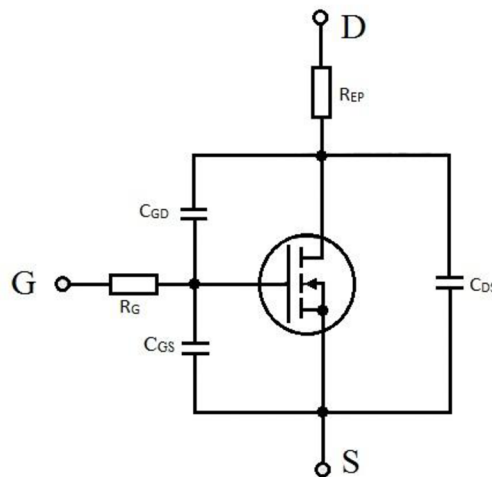
Principiálne každý výkonový MOS-FET musí obsahovať parazitnú diódu, je antiparalerne pripojená k elektródam D-S. Na okrajoch čipu totiž musí byť oblasť P pokovaná a vodivo spojená s emitorom S. Pokiaľ by nebola oblasť P pokovaná, v tom prípade po privedení kladného napätia na riadiacu elektródu by tranzistor nebol schopní vindukovať vodivý kanál (nepodarilo by sa vytlačiť kladné diery k okraju čipu) dané prevedenie je možné vidieť na obrázku Obr.2.2-4. Väčšinou je dióda dimenzovaná rovnako ako daný tranzistor.[1] Jej nevýhodou je že je pomalá preto sa do substrátu dodávajú atómy ťažkých kovov. Táto dióda je následne mnoho násobne rýchlejšia. A jej použitie môže byť napríklad ako nulová dióda alebo sa jej vlastnosti môžu uplatňovať v synchronných usmerňovačoch či už samo riadených alebo riadených.



Obr.2.2-4 výkonový MOS-FET s obohacovaným kanálom [1]

## 2.3 Výber správneho spínacieho tranzistora

Pri výbere tranzistora je potrebné sa riadiť jeho parametrami a dokonale poznať jeho funkciu ktorá je vysvetlená vyššie. Ako už to prírode býva nič nie je ideálne ani spínací MOS-FET nie je ideálny a nie je možné ho ideálne vyrobiť. Preto na obrázku Obr.2.3 je znázornený model výkonového tranzistora s parazitnými kapacitami a rezistormi. Väčšinu týchto údajov a hodnôt udáva výrobca vo svojich katalógoch. Ale je potrebné vedieť čítať tie správne údaje. My sme si vybral MOS-FET tranzistor IRFS 4010 od firmy International Rectifier. Kde nižšie budú opisované dynamické vlastnosti tohto tranzistora.



Obr.2.3 Reálny model MOS-FET tranzistoru [2]

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n \cdot C_{ox} \frac{W}{L} (U_{GS} - U_T)^2 \quad 2.3-1$$

$$C_{ox} = \epsilon_0 \cdot \frac{\epsilon_r}{t_{ox}} \quad 2.3-2$$

$\mu_n$ - pohyblivosť elektrónu

L- dĺžka kanálu

W -šírka kanálu

$t_{ox}$ - hrúbka oxidu

### 2.3.1 Parazitné kapacity MOS-FET tranzistora

MOS-FET je tranzistor riadený napätím ale to platí iba v prípade že  $U_G$  sa veľmi pomaly mení. Čo vo výkonových spínačoch nie je možné pretože pri pomalom otváraní tranzistora by hrozil teplotný prieraz prechodu ktorý je nevratný. Čiže pokiaľ chceme MOS-FET rýchlo spínať je potrebné dodať na začiatku veľkú energiu aby sa nabili kapacity ktoré sú zobrazené na obrázku Obr.2.3  $C_{GD}$  je spätnoväzobná kapacita  $C_{DS}$  je kapacita kolektor emitor,  $C_{GS}$  je kapacita hradlo emitor tieto kapacity spolu s odporom  $R_G$  určujú spínaciu dobu. Výhodou je že všetky tri kapacity sú v podstate teplotne nezávislé. Tieto parazitné kapacity sú nežiaduce a výrobca sa ich snaží minimalizovať. Hodnota  $R_G$  rezistor sa môže líšiť v závislosti na štruktúre čipu, hodnoty od niekoľko ohmov do  $20\Omega$ . [2]

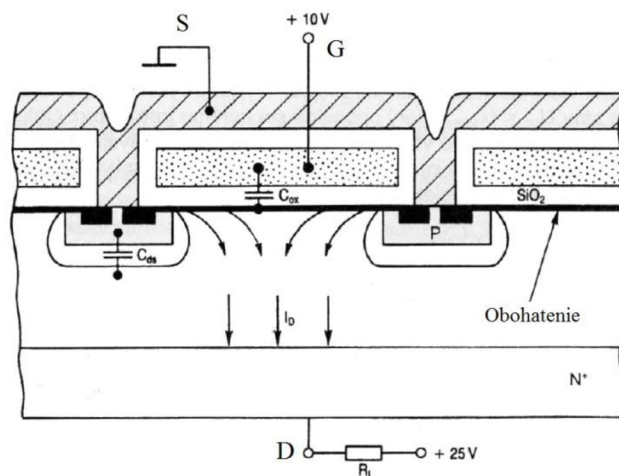
Značenie kapacít v datasheetoch:

$$C_{OSS} = C_{DS} + C_{GD}$$

$$C_{RSS} = C_{GD}$$

$$C_{ISS} = C_{GD} + C_{GS}$$

Kapacita  $C_{GD}$  nazýva sa aj spätnoväzobná alebo Millerova kapacita pozostáva zo sériovo zapojenej kapacity hradla (kapacita oxidovej vrstvy ) a kapacita kolektorovej oblasti priestorového náboja. Ak je tranzistor plne zopnutý, teda prechádza ním veľký prúd, a malé kolektorové napätie bude spätnoväzobná kapacita ešte väčšia ako keď je tranzistor úplne vypnutý. Čo je zrejme aj z obrázka Obr.2.3.1 ten ukazuje stav zopnutého tranzistora. Kde oblasť priestorového náboja zmizla existuje ale vodivá obohatená vrstva, pozostávajúca z elektrónov ktoré boli pritiažené k povrchu kladným napätím hradla [2]



Obr.2.3.1 Kapacita MOS-FET tranzistoru v zopnutom stave [2]

Pre porovnanie nám výrobca udáva kapacity pri zopnutom MOS-FETe tranzistore aj pri rozopnutom.

V rozopnutom stave má kapacita  $C_{RSS}$  hodnotu:

$$C_{RSS} = 260 \text{ pF}$$

V zopnutom stave má kapacita  $C_{RSS}$  hodnotu:

$$C_{RSS} = 48 \text{ nF}$$

Z príkladu je možné vidieť že kapacity sa líšia viac ako o rád. Všetky tieto tri kapacity majú vplyv na funkciu spínača a hlavne na jeho rýchlosť zopnutia a vypnutia, keďže je potrebné tieto kapacity nabiť a následne vybiť.

### **2.3.2 Využitie MOS-FET tranzistorov**

MOS-FET tranzistory nemusia byť prioritne použité ako výkonové spínače ich využitie je omnoho rozsiahlejšie. MOS-FET tranzistory je možné využívať napríklad aj ako zosilňovače kde je v podstate dosť zložitá nastaviť správne pracovný bod takéhoto zosilňovača a nemajú také zosilnenie ako bipolárne tranzistory. Ďalej sa tieto tranzistory využívajú vlastnosti svojej parazitnej diódy, keďže táto dióda je dimenzovaná rovnako ako tranzistor ale je omnoho rýchlejšia a na dióde vzniká menší úbytok. Preto sa tranzistory zapájajú aj ako ochranné diódy a usmerňovacie členy

## 3 PRINCÍP ČINNOSTI VÝKONOVÉHO SPÍNAČA PRE MOBILNÚ ROBOTIKU

Spínanie veľkých výkonov mobilnej robotike vyžaduje pomerne vysoké nároky na všetky oblasti. Jedným z hlavných požiadavkou je aby výkonový spínač mal malý stratový výkon. Čo znamená že v zopnutom stave musí mať daný výkonový spínač čo najmenší prechodový odpor a zase naopak pri rozopnutom stave musí mať čo najväčší odpor aby boli unikajúce prúdy čo najmenšie.

Ďalším požiadavkou je aby bolo možné výkonový spínač čo najjednoduchšie chladiť, keďže spínač je umiestnený v útrobach robota musíme eliminovať teplo. Ktoré by nám mohlo prehrievať riadiacu elektroniku robota. V niektorých prípadoch je to ešte komplikovanejšie keďže sa nemôže použiť aktívne chladenie napríklad pre armádne mobilné roboty. Pre tieto roboty je to obrovský problém keďže v niektorých prípadoch sa nesmie ohrievať ani ich plášť aby neboli spozorované nepriateľom. Preto je potrebné zabezpečiť výborný odvod tepla a čo najmenšie straty.

Je treba dbať aj na veľkosť a hmotnosť spínača. Takže nie je možné tranzistory umiestniť na objemný chladič aby sa chladili. Tým pádom by nám v útrobach robota neostalo miesto na pohony a riadiacu elektroniku. A pokiaľ by sme do daného robota umiestnili takýto objemný chladič je potrebné dbať na to že nám stúpa hmotnosť a tým je potrebné zase zabezpečiť väčší výkon.

Bezpečnosť tiež nie je zanedbateľný parameter kde v útrobach robota je veľa mechanických častí ktoré sa pohybujú napríklad pohony. Kde pokiaľ dôjde k prerušeniu niektorého z vodičov spínač sa musí automaticky vypnúť do nejakého definovaného stavu. Aby nedošlo k skratovaniu riadiacich obvodov a následne k fatálnemu zlyhaniu robota, prípadne požiaru.

A v neposlednom rade hrá úlohu aj cena a dostupnosť daných komponentov k opakovanému zhotoveniu výkonového spínača.

V podstate nie je možné splniť všetky tieto požiadavky na sto percent ale je potrebné venovať spínaču veľkú pozornosť, keďže je to kľúčový prvkom robota. V prípade nefunkčnosti spínača je celý robot nepojazdný. Preto treba klásť veľký doraz na výber výkonového tranzistora. A správni návrh riadiacej elektroniky a budenia pre tranzistor.

### 3.1.1 Stratový výkon MOS-FET tranzistora

Ako je možné vidieť na obrázku Obr.3.1.1 tranzistor sa skladá z dvoch rezistorov, kde  $R_{EP}$  je vlastne odpor prívodu a kanála. Výrobca špecifikuje tento odpor pri určitých podmienkach, keďže tento odpor závisí na tom v akej časti sa nachádza pracovný bod tranzistor. Výrobca garantuje že pokiaľ na riadiacej elektróde bude



napätie  $U_{GS}=10V$  a potečie kanálom  $110A$  v tom prípade bude mať odpor hodnotu  $3,3m\Omega$  pri teplote okolia  $20^{\circ}C$  [2] v praxi to znamená že pri otvorenom tranzistore bude na ňom úbytok ktorý je možné dopočítať zo vzťahu 3.1.1-1 a stratový výkon ktorý sa vyžiari v teplo bude udáva vzťah 3.1.1-2. V našom prípade je menovitý prúd ktorý by mal tiecť kanálom je  $I=20A$ . A odpor kanála pri riadiacom napätí  $U_{GS}=15V$  budeme uvažovať  $R_{EP}=4m\Omega$ .

$$U_s = I \cdot R_{EP} \quad [V] \quad 3.1.1-1$$

$$U_s = 20 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = \underline{0,08V}$$

$$Q_s = I^2 \cdot R_{EP} \quad [W] \quad 3.1.1-2$$

$$Q_s = 20^2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = \underline{1,6W}$$

Je zrejme že úbytok na našom tranzistore bude  $U_s=0,08V$  a stratový výkon bude  $Q_s=1,6W$ . Preto je potrebné klásť veľký dôraz pri výbere tranzistora aby mal čo najmenší odpor zopnutého kanála. Pretože od veľkosti odporu kanála závisí stratový výkon čo je zrejme z rovnice 3.1.1-2.

Ďalší parameter ktorý udáva výrobca aký výkon je schopný daný tranzistor u chladiť a aké má puzdro tranzistora teplotný odpor . Tepelný odpor nám výrobca udáva  $R_{JC}=0,4^{\circ}C/W$ . Kde  $R_{JC}$  výrobca označuje teplotný odpor prechodu tepla medzi povrchom čipu a puzdrom. Teplotný odpor prechodu tepla medzi puzdrom a chladičom ktorý sa značí  $R_{JA}$  a má hodnotu  $R_{JA}=40^{\circ}C/W$ . Všetky teplotné odpory sú uvádzané pri teplote okolia  $T_0=20^{\circ}C$ . Z týchto hodnôt vieme zistiť ako sa nám tranzistor zohreje pri danom stratovom výkone. Použijeme k tomu vzorec 3.1.1-3

$$T_j = T_o + Q_s \cdot R_{Jc} [^{\circ}C] \quad 3.1.1-3$$

$$T_j = 20 + 1,6 \cdot 0,4 = \underline{20,64^{\circ}C}$$

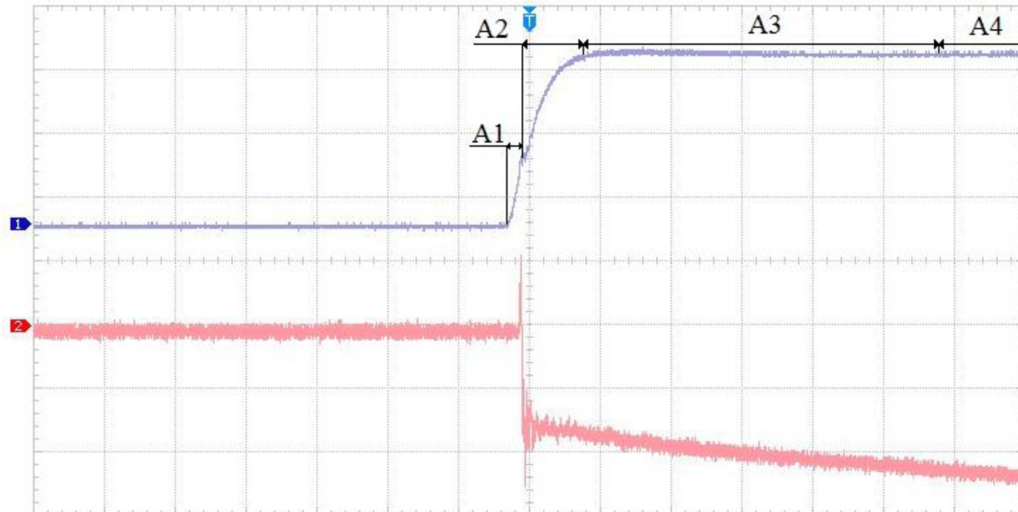
$$T_j = T_o + Q_s \cdot R_{JA} [^{\circ}C] \quad 3.1.1-4$$

$$T_{jA} = 20 + 1,6 \cdot 40 = \underline{84^{\circ}C}$$

Z výpočtu vidíme že teplota tranzistoru(čip - plocha) pri  $20A$  je okolo  $21,44^{\circ}C$  čo nie je mnoho. Puzdro sa ohreje podľa vzťahu 3.1.1-4 je vidieť že teplota puzdra by mala byť  $84^{\circ}C$  táto teplota je ideálna pre chod tranzistora kde výrobca udáva maximálnu teplotu  $175^{\circ}C$ . Nie je vhodné ísť až na hranu tejto teploty a to preto že pri zvyšovaní teploty sa zvyšuje dynamický odpor celého tranzistora a tým sa zase zvyšujú straty následne dochádza k deštrukcii. Pri teplote nad  $170^{\circ}C$  dochádza k degradácii plošného spoja čo má väčšinou fatálne následky prerušenie vodivých ciest prípadne požiar.

### 3.1.2 Popis činnosti zopnutia výkonového spínača

Ako bolo vyššie spomenuté na spínací dej a jeho rýchlosť majú vplyv parazitné kapacity a odpory. Preto sme realizovali praktické zapojenie podľa obrázku Obr3.3 kde nameraný priebeh zopnutia výkonového spínača pri prúde asi 30A je na obrázku Obr.3.1.2



Obr.3.1.2-1 (1) Priebeh napätia na riadiacej elektróde MOS-FET tranzistoru.

parametre merania 5V/1 $\mu$ s

(2) Priebeh prúdu indukovaným kanálom parametre merania 50mV/1 $\mu$ s.

Na nábežnej hrane je oblasť A1 veľkosť tohto úseku závisí na prahovom napätí a kapacite  $C_{iss}$ . Tranzistor sa ešte stále nachádza vo vypnutom stave. Potom čo hradlo prekročí prahovú hodnotu  $U_{GS}$  tranzistor sa stáva vodivým. Kanálom začína pretekať kolektorový prúd a klesá kolektorové napätie. Pokles kolektorového napätia ovplyvňuje napätie hradla spätnou väzbou cez  $C_{RSS}$  a pôsobí proti jeho rastu. Výsledkom je že rýchlosť poklesu výstupného napätia je daná kapacitou  $C_{RSS}$  a vstupným prúdom. Ako je zrejme napätie hradla pomaly stúpa oblasť A2, podľa pohybu pracovného bodu po VA charakteristike. Ako náhle klesne kolektorové napätie pod napätie hradla a tým sa spomaľuje ďalší pokles napätia hradla. táto oblasť je u MOS-FET tranzistor pomerne krátka.[2] Omnoho dlhšiu dobu trvá kým spínač prejde do úplného zopnutia čo je oblasť A3. o doznení toho deju je MOS-FET plne zopnutý oblasť A4.[2] Tým pádom sú nabité všetky kapacity a hradlo neodoberá žiaden prúd čo je stav ktorého sme chceli dosiahnuť. Tranzistor je momentálne možné udržať v tomto stave prakticky bez výkonu a po akú dlhú dobu je potrebné. Že hradlo neodoberá žiaden prúd znamená že do hradla tečú iba zvodové prúdy. Dobu zopnutia MOS-FETu nie je problém vyčísliť z hradlového odporu a kapacity. Keďže výrobca udáva hodnotu  $R_G=2,1\Omega$  a v našom zapojení pre do série k tomuto rezistorov pridali ešte rezistor  $R_{10}=3,3\Omega$ . Ďalej nám výrobca udáva celkovú hodnotu kapacity ktorú je potrebné nabiť aby sa tranzistor otvoril

$C_c = 150\text{nF}$ . S týchto hodnôt vieme vypočítať približnú dobu zopnutia tranzistora podľa vzorca 3.1.2.1-1 aj veľkosť prúdu ktorý je potrebné dodať aby sa tranzistor zopol za definovaný čas.[2]

$$\tau = R_{G10} * C_c \quad [\text{s}] \quad 3.1.2.1-1$$

$$R_{G10} = R_{10} \cdot R_G \quad [\Omega] \quad 3.1.2.1-2$$

$$R_{G10} = 3,3 + 2,1 = \underline{5,4\Omega}$$

$$\tau = 5,4 * 150 \cdot 10^{-9} = \underline{0,815\mu\text{s}}$$

Z výpočtu je zrejmé že tranzistor by mal zopnúť približne do  $0,8\mu\text{s}$  čo sme v podstate potvrdili naše meranie kde vzniknuté odchýlky sú spôsobené nepresnosťami súčiastok a meracích prístrojov. Prvotnú špičku prúdu vieme vypočítať zo vzorca 3.1.2.1-6 kde riadiace napätie  $U_G$  vyjadríme zo vzorca 3.1.2.1-4.  $U_{DF}$  je úbytok napätia na dióde D1,D3 a PN priechode tranzistora T7

$$U_{DF} = U_{D1} + U_{D3} + U_{T7} \quad [\text{V}] \quad 3.1.2.1-3$$

$$U_{DF} = 0,6 + ,06 + 0,6 = \underline{1,8\text{V}}$$

$$U_G = U_{CC} - U_{DF} \quad [\text{V}] \quad 3.1.2.1-4$$

$$U_G = 15 - 1,8 = \underline{13,2\text{V}}$$

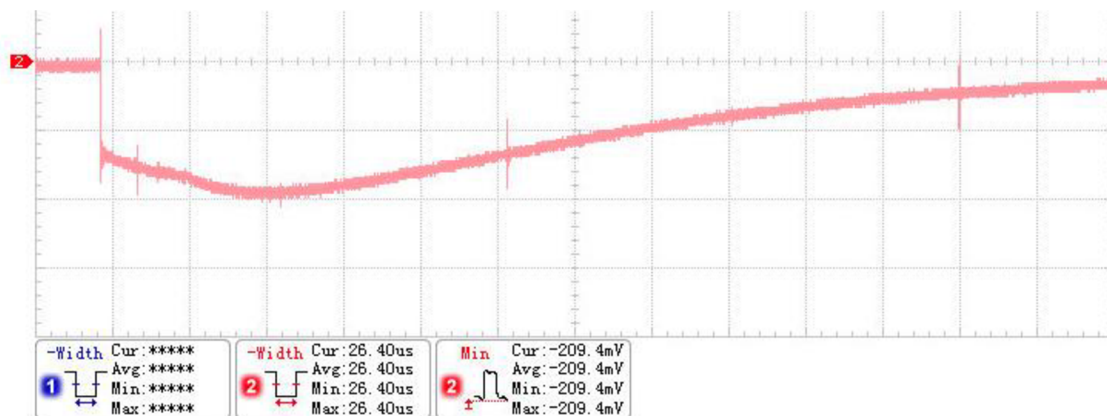
$$I_{G0} = \frac{U_G}{R_G} \quad [\text{A}] \quad \text{v čase } t=0 \quad 3.1.2.1-5$$

$$I_{G0} = \frac{13,2}{12,1} = \underline{1,09\text{A}}$$

$$i_G = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad 3.1.2.1-6$$

$$i_G = 1,09 \cdot e^{-\frac{0,5}{1,8}} = \underline{0,825\text{A}}$$

Z výpočtov je zrejmé že v okamihu zopnutia čiže v hodnote času  $t=0$  je prúd do hradla skoro  $I_{G0}=1\text{A}$ . Po uplynutí  $500\text{ns}$  je teoretická hodnota  $0,825\text{A}$  zo vzorca 3.1.2.1-6 je zrejmé že nabíjací prúd má exponenciálny priebeh a je závislý na čase z čo vyplýva že po doznení spínacích dejov nabití kapacít je tranzistor schopný pracovať bez akéhokoľvek prúdu do hradla. Na obrázku Obr.3.1.2.3 vidno priebeh prúdu otváraným kanálom MOS-FET tranzistora do odporovej záťaže.

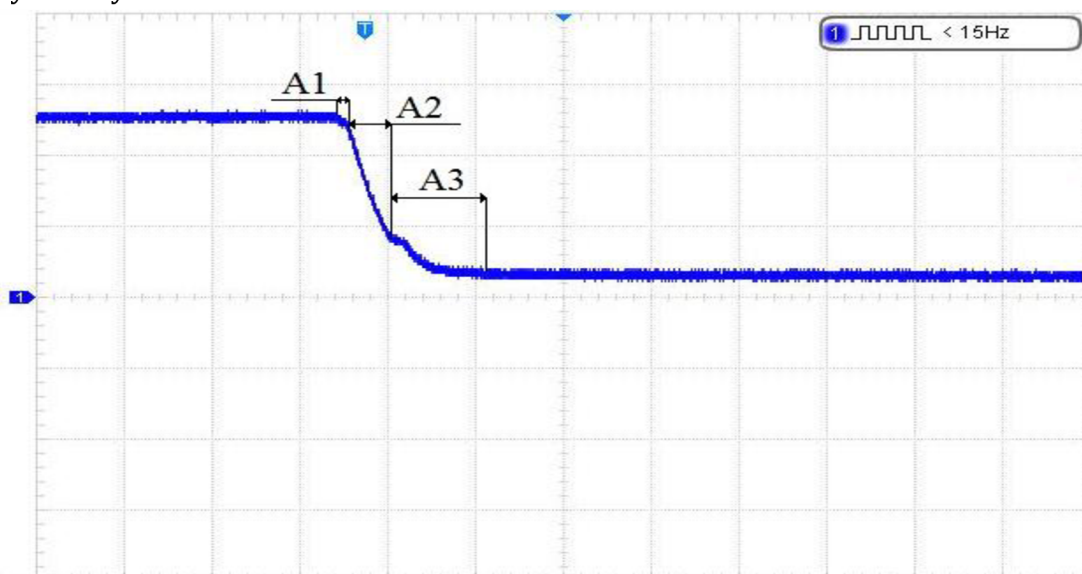


Obr.3.1.2-2 Priebeh prúdu otvoreným kanálom MOS-FET tranzistoru

Meranie prúdu bolo realizované pomocou bočníka 150A/60mV čiže z obrázku Obr.3.1.2.1 že špička prúdu ktorý prechádzal cez MOS-FET pri zopnutí bol približne 325A až 500A a následne sa prúd ustálil nikde na 50A. Tieto prúdové špičky je tranzistor schopný zniesť pretože sú rádovo v mikro sekundách.

### 3.1.3 Popis činnosti vypnutia výkonového spínača

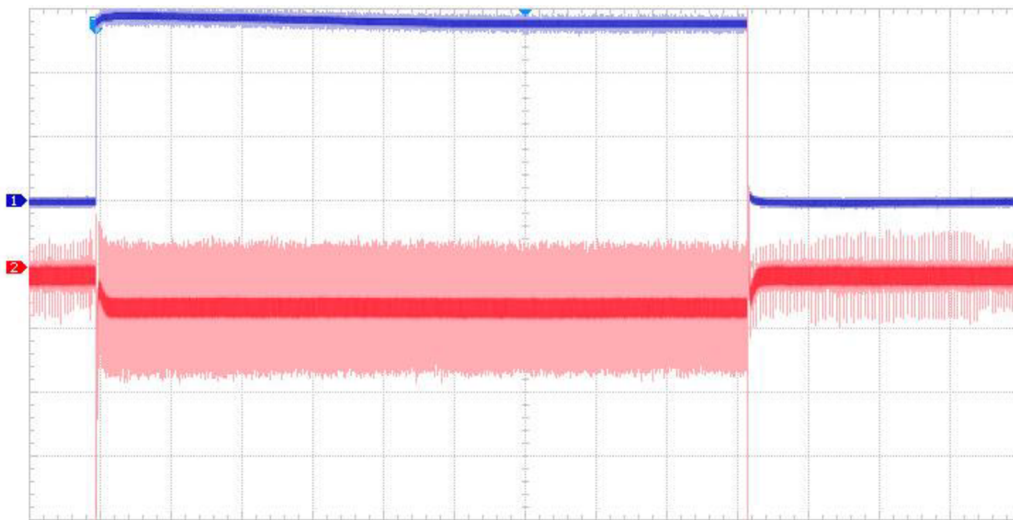
Výkonový spínač nie je potrebné len správne zapnúť ale aj správne vypnúť výkonový tranzistor MOS-FET čo udáva obrázok Obr.3.1.2.2.



Obr.3.1.3-1 Priebeh napätia na riadiacej elektróde MOS-FET tranzistoru vypnutie. parametre merania 5V/1 $\mu$ s

Pri vypnutí MOS-FET tranzistora je potrebné zase vybiť všetky kapacity. Priebeh vypnutia prebieha úplne identicky ako pri zapnutí ale v opačnom smere. Začiatok charakteristiky v úseku A1 sa začínajú sa vybíjať kapacita a zvyšovať sa odpor kanálu. Ako náhle klesne napätie hradla pod úroveň, pri ktorej už nie je schopný

udržať výstupná napätie kolektoru pri danom prúde. Začína sa prejavovať Millerov jav a v závislosti na momentálnej klesajúcej hodnote spätnoväzobného kondenzátora  $C_{GD}$  je najskôr pomalý úsek charakteristiky A2. Napätie hradla klesá ďalej pretože je na ňom ešte napätie. Po dosiahnutí prahového napätie úsek charakteristiky A3 sa zníži kapacita  $C_{RSS}$  ktorá sa vybije. Po vybití všetkých kapacít je tranzistor pripravený na ďalší cyklus.[2] Rýchlosť vypnutia je taktiež ako rýchlosť zapnutia závislá na veľkosti hradlového odporu a kapacity je daná vzťahom 3.1.2.1-1.



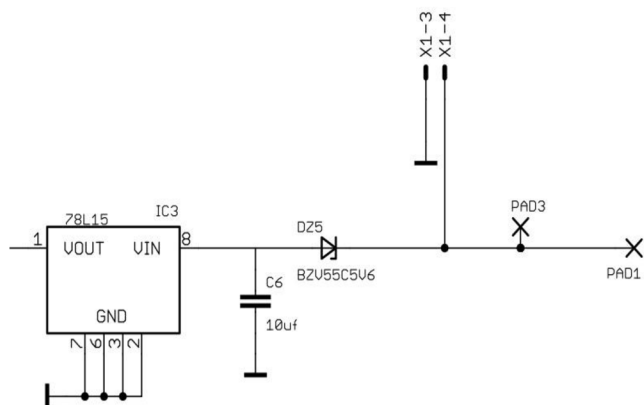
Obr.3.1.3-2 (1)Priebeh napätia UG na hradle parametre merania 5V/2ms  
 (2)Priebeh prúdu na bočníku 150A/60mV parametre merania 50mV/2ms

## 3.2 Radiace obvody výkonového spínača

Riadiace obvody sú navrhnuté tak aby čo najefektívnejšie spínali výkonový tranzistor schému zapojenia je možné vidieť v prílohe.

### 3.2.1 Napájanie

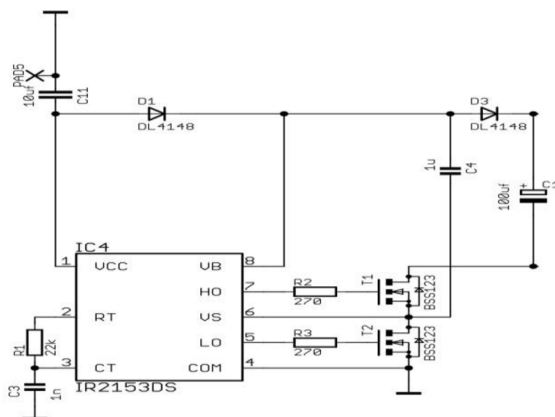
Napájacie napätie výkonového spínača je brané zo silovej časti kde to napätie je následne stabilizované lineárnym stabilizátorom 78L15 na nominálnu hodnotu  $U_{CC}=15V$ . Pre zvýšenie účinnosti by bolo možné použiť aj impulzný stabilizátor. S tým rizikom že by nám do obvodu mohol zanášať rušenie. Ďalšia nevýhoda je finančne náročnejší ako lineárni. Maximálny výstupný prúd stabilizátora je 500mA a maximálne vstupné napätie je 35V čo je v našom prípade ideálni pomer keďže máme dve paralelne zapojené batérie čo znamená že vstupné napätie máme niekde okolo 28V pri dobre nabitej batérii. A prúd spínača v kľudovom stave sa pohybuje okolo 7mA v zopnutom stave tento prúd vzrastie na 25mA.



Obr.3.2.1 Zapojenie stabilizátora 78L05

### 3.2.2 Nábojová pumpa

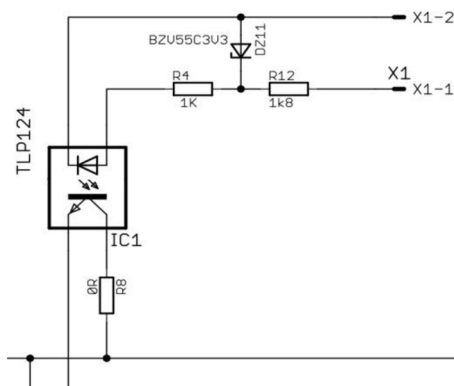
DC/DC menič v podobe nábojovej pumpy používajúci princíp spínania kapacít ktoré sa využívajú na uskladnenia energie. Výhodou nábojových pump s kondenzátorom je že je možné náhle zmeniť hladiny napätia. Kapacitná konverzia napätia je dosiahnutá periodickým spínaním kondenzátoru. Túto funkciu v našom prípade zastáva polo mostu IR 2153. Princíp činnosti nábojovej pumpy je obdobný ako funkcia step-up meniča len stým rozdielom že miesto uskladnenia energie v cievkach sa uskladňuje v kondenzátoroch ktoré následne slúžia ako zdroj energie pre spotrebiče. V našom prípade využívame nábojovú pumpu na vyrovnanie potenciálov. Čo znamená že po zopnutí výkonového MOS-EET tranzistoru musíme zabezpečiť aby napätie na kondenzatore C1 nebolo väčšie ako 20V Inak by sa mohlo stať že sa nám na hradle výkonového tranzistora objaví toto napätie a následne môže dôjsť k prerazu hradla. Tak že nábojová pumpa sa stará o to aby napätie na kondenzátore C1 neprekročilo 15V. Kde po zopnutí spínača pumpa zdvihne potenciál voči zemi aby na kondenzátore bolo napätie 15V. Kde táto nábojová pumpa je veľký rušiaci element preto je potrebné brať tento fakt do úvahy pri návrhu plošného spoja.



Obr.3.2.2 Zapojenie nábojovej pumpy pomocou IR2153DS

### 3.2.3 Ovládanie výkonového spínača

Signál či sa má spínač zopnúť alebo rozopnúť je galvanicky oddelený od silovej časti pomocou optočlenu IC1 ako je to znázornené na obrázku Obr.3.2.3. Takto sme vyriešili problém s možnými unikajúcimi prúdmi alebo inými poruchami spojenými so silovou časťou. Ďalšou výhodou je že pri prerušení či už jedného alebo druhého riadiaceho vodiča sa spínač vypne a prechádza do nami definovaného stavu tento stav je stav vypnutý. Odpor R4, R12 a zenerova dióda DZ11 slúžia ako ochrana optočlenu kde zenerova dióda zaisťuje stabilizáciu napätia. A tým pádom je možné spínač napájať priamo zo silovej časti. Po zopnutí optočlenu je privedený signál na logický člen IC2.



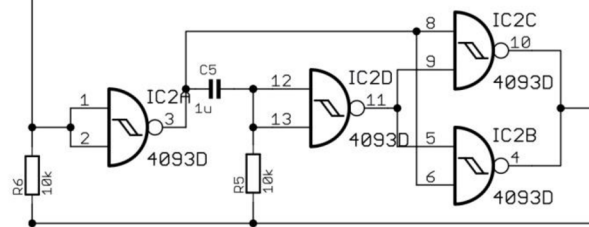
Obr.3.2.3 Zapojenie ovládania logiky výkonového spínača

### 3.2.4 Popis logiky výkonového spínača

Schmittov preklápací obvod je preklápací obvod, ktorého napätie na výstupe sa mení skokovo so zmenou napätia na vstupe, pričom zmena výstupu pri náraste napätia vstupu nastane až pri vyššom napätí než zmena výstupu pri poklese napätia vstupu. Táto vlastnosť vstupu sa nazýva hysterézia. Vďaka hysterézii sú tieto obvody imúnne voči superponovanému šumu na vstupe. Používajú sa ako vstupné obvody v prípadoch, keď sa do digitálneho obvodu privádza signál zvonka zariadenia, kde je možnosť, že signál bude zašumený.[4]

V našom prípade sme tiež použili schmittov klopní obvod NAND so štyrmi hradlami zapojenie na obrázku Obr.3.2.4. kde výstup z optočlenu je privedený na obidva vstupy hradla jedna čo znamená že pokiaľ je optočlen zopnutý a teda je v stave log.1 na výstupe hradla bude 0 a naopak pokiaľ bude optočlen rozopnutý a teda bude v stave log. 0 na výstupe prvého hradla bude 1. Pokiaľ sa na výstupe hradla jedna objatý logická úroveň 1 začne sa nabíjať kondenzátor C1 cez odpor R8. Spolu tvoria RC člen ich časová konštanta  $\tau$  je 10 milisekúnd ten ton RC člen v obvode pracuje ako dopravné oneskorenie. Toto dopravné oneskorenie je do obvodu vložené zámerne aby boli odstránené náhodné kmity ktoré boli spôsobené

zopnutím vypínača kmity je možné vidieť na obrázku v prílohe. Inak okrem doby dopravného oneskorenia je výstup hradla stále v logickej jednotke takže na vstupe máme logickú nulu. Následne sú dve logické hradlá spojené a výstup ide do budiča. Pokiaľ je na výstupe logická 1 výkonový spínač je zopnutý a pokiaľ je výstupe z hradiel 0 spínač je vypnutý.



Obr.3.2.4 Zapojenie logiky výkonového spínača

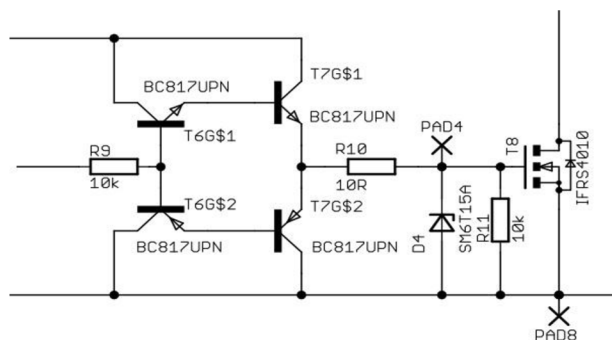
### 3.2.5 Budič výkonového spínača

Budiaci obvod tranzistoru budič jeho funkciou je na svojom výstupe generovať kvalitný riadiaci signál pre riadiacu elektródu výkonového tranzistora. [3] Keďže mi nepracujeme s nebezpečným sieťovým napätím ako napríklad impulzné zdroje kde je potrebné aby budič bol galvanicky oddelený od sieťového napätia či už optočlenom alebo nejakou transformátorovou väzbou. V našom prípade tato väzba nie je potrebná pretože pracujeme z bezpečným napätím okolo 30V. Ďalšou potrebnou vlastnosťou budiča je rýchlosť keďže po zopnutí spínača v podstate hneď potrebujem obrovské množstvo energie na riadiacej elektróde.

Aby by budič mohol generovať kvalitný signál. Táto energia je nahromadená v kondenzátore C1. Kapacita C1 je teda veľmi dôležitá pretože po pripojení na napájanie sa kapacita nabije na napájacie napätie a pri zopnutí výkonového tranzistora sa kapacita C1 začne vybíja a dodáva energiu potrebnú na nabitie hradlovej kapacity MOS-FETu po doznení prechodného deja sa znova nabije na nominálne napätie. Takto sa prelieva energia medzi kapacitami. Pokiaľ by táto kapacita bola príliš malá nezvládla by nabiť hradlovú kapacitu a tranzistor by sa neotvoril alebo by sa otvoril iba čiastočne. Pri čiastočnom otvorení by okamžite došlo k prehriatiu a následnému fatálnemu zlyhaniu tepelným prierazom.

Budič je realizovaný pomocou komplementárnej dvojice tranzistorov PNP a NPN výhodou týchto tranzistorov je že sú umiestnené na jednom kremíkovom čipe tým pádom majú rovnaké vlastnosti veľmi podobné charakteristiky.

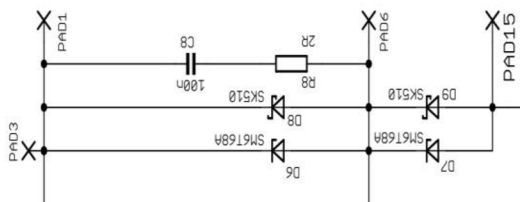




Obr.3.2.5 Zapojenie budiča a výkonovej časti

### 3.2.6 Ochranné prvky výkonového spínača

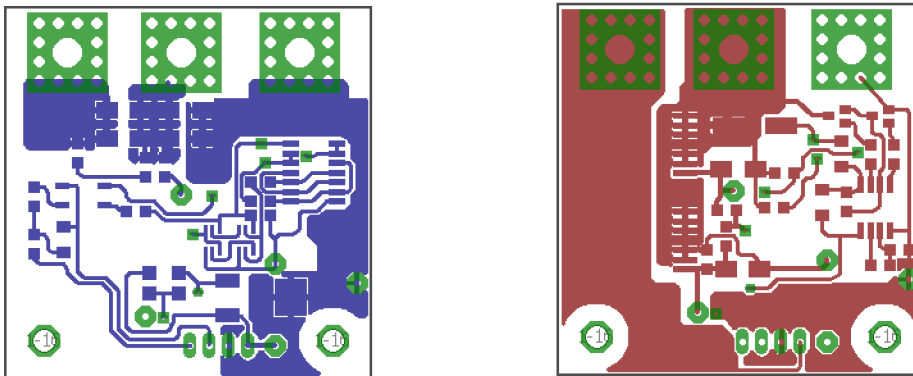
V danom výkonovom Spínači sú zabudované ochrany ktoré chránia Výkonový MOS-FET pred zlyhaniami niektorých častí. Dióda D4 je zenerova dióda a chráni riadiacu elektródu pred napätím vyšším ako 15V mala by sa aktivovať v prípade výpadku stabilizátora a ochrániť tranzistor. Ďalšie ochranné diódy sú umiestnené na výstupe spínača ktoré sa uplatnia hlavne pri rozpínaní indukčne záťaže . Ďalšia ochrana je RC člen na výstupných svorkách ktorý má eliminovať vzniknuté prepätia.



Obr.3.2.6 Ochranné prvky výkonového spínača

### 3.3 Výroba plošného spoja

Celkový návrh plošného spoja bol realizovaný v programe Eagle. Kde bol kladený veľký dôraz na správnu dimenzáciu medených ciest na plošnom spoji vzhľadom k výkonu ktorý majú preniest'. Preto je potrebné na výrobu DPS použiť materiál s hrúbkou medi 70 $\mu$ m. Čo pri tak veľkých výkonoch nemusí byť postačujúce preto je potrebné tieto plochy posilniť cínom prípadne medenými pásmicami. Snažili sme sa plošný spoj čo najviac minimalizovať preto je navrhnutý ako obojstranný. Plošný spoj bol vyrobený nažehlovacou metódou. Na obrázku Obr.3.3 je vidno návrh DPS kde zdrojové súbory a dokumentácia k všetkým výkonovým verziám sú umiestnené v prílohe.



Obr.3.3 Návrh plošného spoja vrstva Bottom a Top

## 4 PARALELNE RADENIE MOS-FET TRANZISTORV

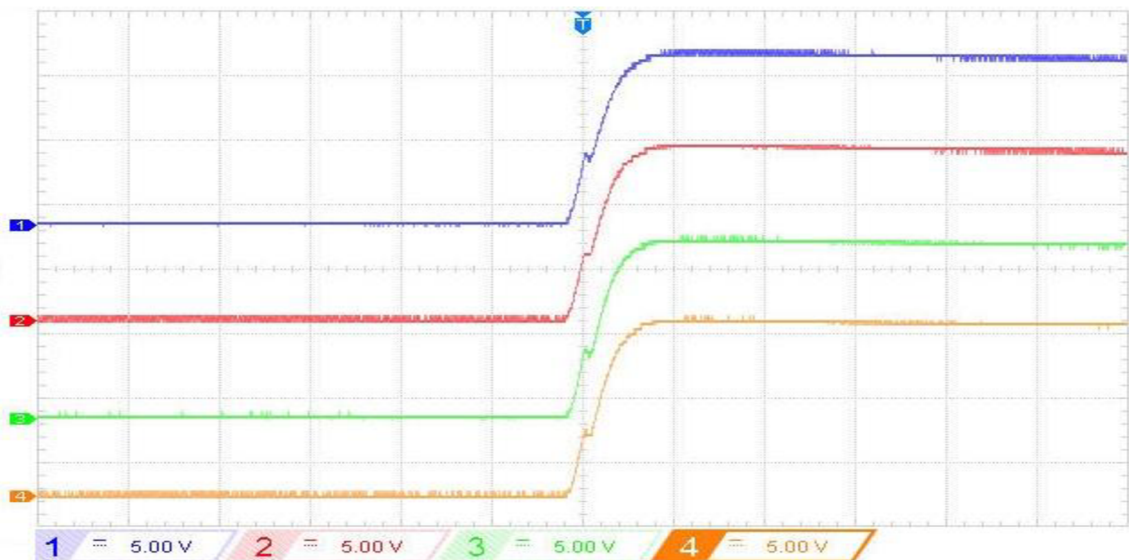
Náš spínač funguje bezproblémovo ale v mobilnej robotike je potrebné spínať aj väčšie výkony na aký je tento spínač navrhnutý. Preto je potrebné MOS-FET tranzistory spájať paralelne. Nesmiernou výhodou týchto tranzistorov je že majú pozitívni teplotný súčiniteľ odporu v zopnutom stave takže nehrozí ako pri bipolárnych tranzistoroch že sa jeden tranzistor trošku viac ohreje a bude zaťažovaný veším prúdom než tie ostatné. Ale je potrebné mať na všetkých tranzistoroch rovnaké hradlové napätie a rovnako kvalitný spínací signál. Ďalšia vec je rýchlosť otvárania tranzistorov ta by mala byť rovnaká inak hrozí to že jeden tranzistor sa otvorí skôr a potečie ním väčší špičkový prúd ako tými ostatnými a zničí sa väčšinou to má za následok lavínový efekt že sa spínač oslabí a následne dôjde k prierazu aj ostatných tranzistorov. Preto je potrebné aby tranzistory mali identické parametre hlavne sa jedná o odpor kanálu  $R_{EP}$  pretože ako je vyššie spomenuté od neho sa odvíja stratový výkon. Ďalej je dosť dôležité aby MOS-FET tranzistory boli umiestnené na rovnakom podklade aby mali aspoň približne rovnakú teplotu. Inak by sme zbytočne namáhali.

### 4.1 Riadenie paralelne spájaných MOS-FET tranzistorov

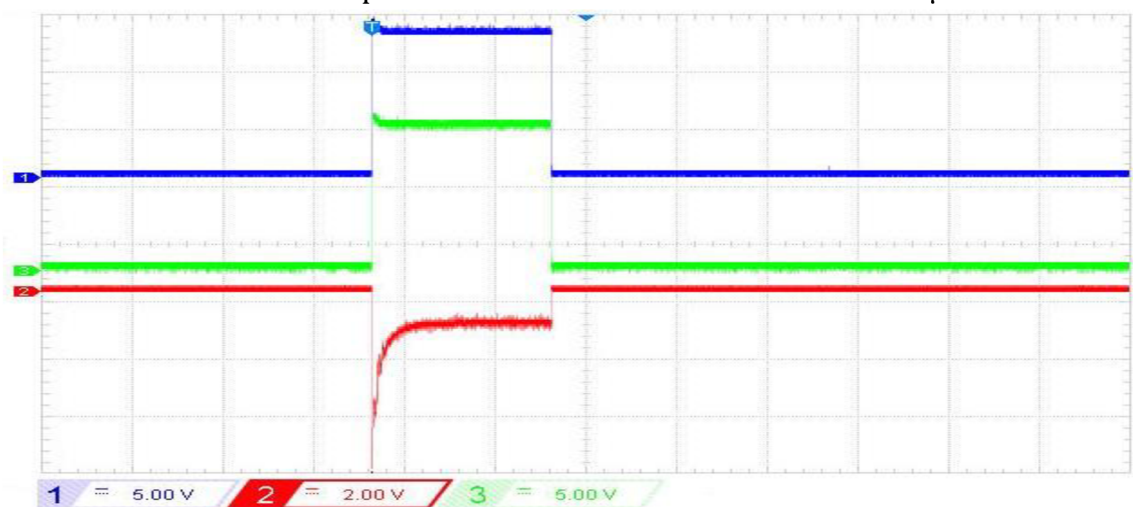
Pre riadenie takejto skupiny tranzistorov je možné pre každý tranzistor použiť zvlášť budič. Čo v našom prípade nie je potrebné pretože by to bola len komplikácia tým že dané budiče by museli byť časovo zosynchronizované. Preto sme na riadený MOS-FET tranzistorov použili iba jeden budič ako sme použili aj v prototypovom zapojení. Pred každý tranzistor sme umiestnili hradlový odpor pri jeho výbere sme sa riadili výpočtami z prototypového zapojenia akurát sme vybrali rezistory s rovnakou hodnotou a čo najmenšou odchýlkou aby sa tranzistory otvárali približne rovnakou rýchlosťou. Ďalšou zmenou je že sme vymenili tranzistory budiča keďže pri troch a viac tranzistoroch paralelne zapojených musia zvládnuť tri krát taký spínací prúd ako pri našom prototypovom zapojení ďalšou vecou bolo posilnenie napäťového stabilizátoru a kapacity C1 ktorá je najviac namáhaná pi zopnutí. Inak sme zachovali koncepciu z prototypu.

## 4.2 Paralelne spínanie MOS-FET tranzistorov

Pri spájaní MOS-FET tranzistorov sme teda testovali všetky vyššie uvedené parametre. Ako je veľkosť riadiaceho pulzu, musí byť pri všetkých tranzistoroch rovnaká inak by sa tranzistory chovali ako odpor pretože by mali len čiastočne vy indukovaný kanál a tým pádom by sa viac ohrievali. Ďalší parameter sme testovali rýchlosť nabežnej hrany čo je možné vidieť obrázku Obr.4.3 .Kde je potrebné aby tranzistory mali približne rovnakú nabežnú hranu. Tu môže nastať problém že montážnik zle osadí hradlové odpory (osadí inú hodnotu) tým pádom sa spomalí spínací dej a tranzistory s rýchlejším spínacím dejom budú viac špičkovovo zaťažené a tým pádom môže pri zopnutí dôjsť k prierazu tranzistora preto je potrebné na tento problém klásť veľký dôraz.



Obr.4.3 Priebeh riadiacich pulzov nabežná hrana časová konštanta  $1\mu\text{s}$

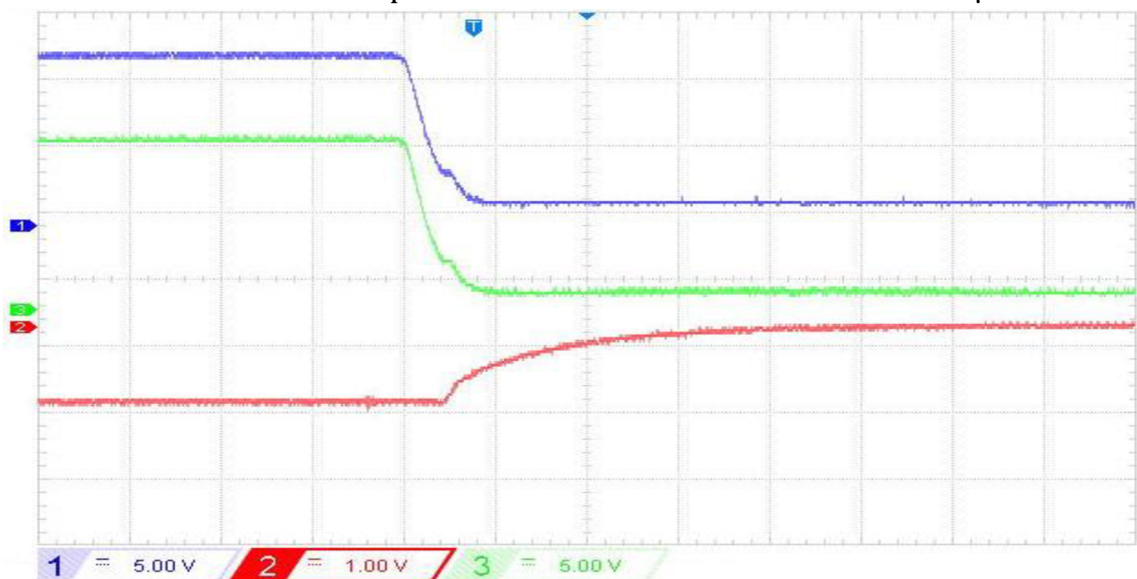


Obr.4.3-1 Priebeh riadiacich pulzov a spínacieho prúdu kanál 2, časová konštanta  $1\mu\text{s}$

Taktiež je potrebné kontrolovať zostupnú hranu pri nej je tiež potrebné aby bola pri všetkých tranzistoroch rovnaká. Nesmie byť závislá na druhu záťaže. To znamená že či je na výstupe indukčná alebo kapacitná záťaž na zostupnej hrane sa vplyvy záťaže nesmú prejavovať pokiaľ sa prejavujú tak je potrebné ich eliminovať do čo najmenšej miery. Najčastejšie sa prejavuje indukčná záťaž v podobe spätne indukovaných špičiek. Tento jav je pomerne dosť nebezpečný pretože amplitúda špičky môže byť niekoľko krát väčšia ako menovitý signál a tým pádom môže zase dôjsť k prerazu. Ako pri náběžnej tak aj pri zostupnej je dobré aby vypnutie tranzistorov bolo čo najrýchlejšie pretože pri pomalom vypínaní hrozí teplotný preraz čo je nevratný dej ktorý zničí tranzistor. Kde na obrázku Obr.4.3-2 je vidno vypínací dej dvoch tranzistorov



Obr.4.3-2 Priebeg riadiacich pulzov dobežaná hrana časová konštanta  $1\mu\text{s}$



Obr.4.3-2 (1) Priebeg riadiacich pulzov dobežaná hrana časová konštanta  $1\mu\text{s}$   
 (2) Priebeg prúdu kanál 2

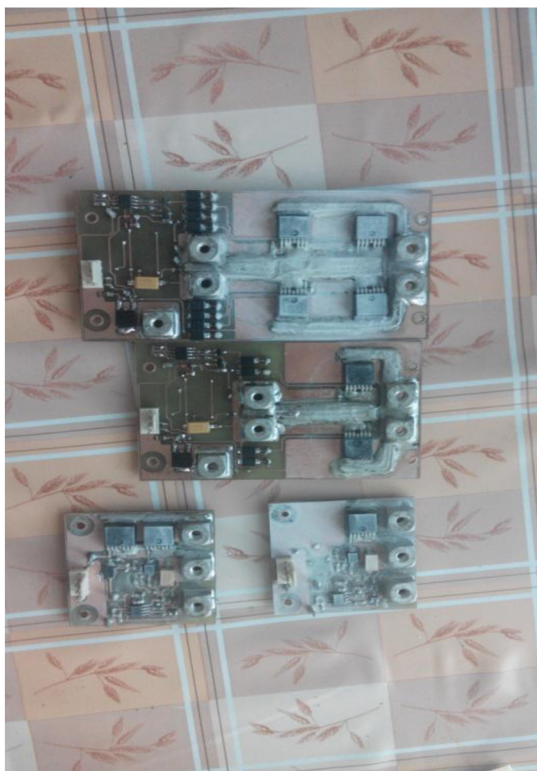
## 5 TEPLOTNÉ ZATAŽENIE

Teplotné zaťaženie daného spínača je veľmi dôležité pretože spínač by mal prenášať obrovské výkony a jeho montáž je v útrobach robota ktorý je väčšinou uzatvorený. Teplotné zaťaženie vyplýva zo stratového výkonu na tranzistoroch ďalej na medených spojoch keďže sa tu bavíme rádovo o stovkách ampéroch. Daný prúd podstatne ovplyvňuje oteplenie nielen samotného tranzistora ale aj prívodných vodičov. Tento problém je možné minimalizovať správnou dimenzáciou prívodných vodičov. Pri tak obrovských spínacích prúdoch ako sme realizovali nám samotný prierez medenej vrstvy plošného spoja nestačil. Tento problém sa dá riešiť niekoľkými spôsobmi.

Prvým je pásnicovými rozvodmi kde toto riešenie je veľmi efektívne a elegantné ale pre mobilnú robotiku má podstatnú nevýhodu a tou je váha medených pásnic.

Ďalšia metóda je posilnenie medených plôch výkonovej časti spínača napríklad cínom alebo medeným drôtom. Tuto metódu sme použili na posilnenie výkonových ciest.

Pri teplotných skúškach sme dbali na to aby pri meraní termovíznou kamerou nedochádzalo k odleskom a nebolo meranie skreslené nesprávnymi hodnotami teploty. Na spínač bol nanesený špeciálny sprej s emisivitou približujúcou sa 1.



Obr.5 Prevedenie výkonových spínačov

Meranie bolo realizované postupne na všetkých štyroch prototypoch výkonového spínača a boli overené vyššie vypočítané hodnoty stratového výkonu. Merané pracovisko bolo realizované pomocou katodického zdroja s parametrami 40V/200A a ochranou dynamických prúdov na 220A. Ako záťaž bola použitá 300A rekuperačná komora.

Pri začiatku bola zaznamenaná teplota okolia kde následne v určitých časových intervaloch boli teploty zaznamenávané až pokiaľ nedošlo k ustáleniu teploty na určitej hodnote táto hodnota vychádza niekde okolo 15minút plného zaťaženia spínača. Kde 15minút daný spínač pri 160A v reálnych podmienkach mobilnej robotiky nemá šancu bežať pretože dôjde k vybitiu batérie. Ako je vidno z teplotných charakteristík prvé dve minúty bol spínač zaťažený iba polovičným výkonom a to preto aby sme dodržali časovú kompatibilitu rekuperačnej komory ktorá je spôsobená nábehom rekuperačnej jednotky. Toto nerovnomerné zaťaženie sa premietlo do aj do výslednej charakteristiky. Preto začiatok charakteristiky nie je logaritmický.



Obr.5-1 Rekuperačná komora



Obr.5-1 Riadiaca jednotka rekuperačnej komory

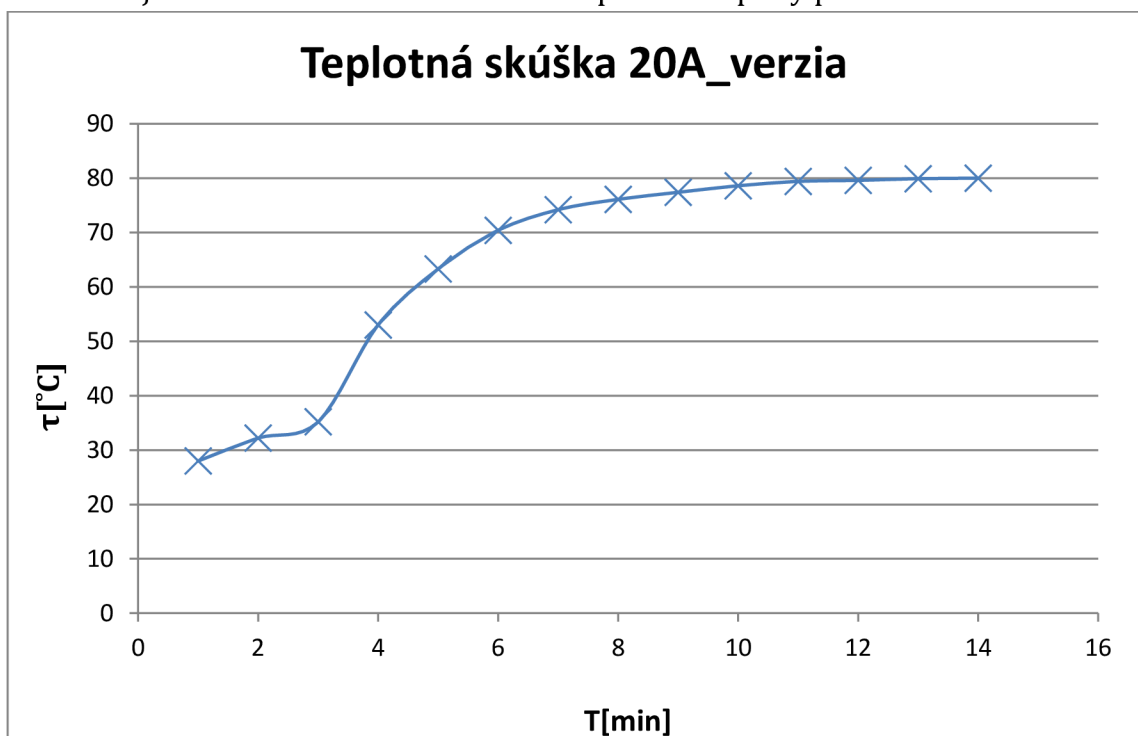
## 5.1 Oteplenie 20A\_verzia

Skúška oteplenia prebiehala nasledovne na zdroji nastavených 20V/30A rekuperačná komora bola nastavená na 20A. Po zopnutí spínačom tiekol prvú minútu spínačom poloviční prúd teda asi 10A následne po prebudení rekuperačných jednotiek začal spínačom tiecť plný prúd čiže 20A tento jav je vidno aj na teplotnej charakteristike. Úbytok na tranzistore v zopnutom stave pri menovitom prúde činil 108mV. Z čoho vyplýva stratový výkon podľa vzorca 5.5-1.

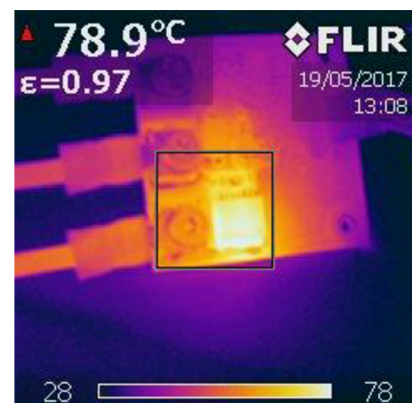
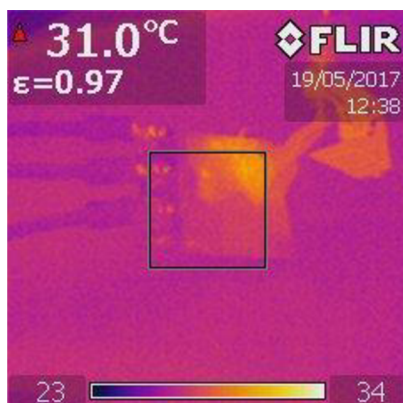
$$P = U \cdot I \quad 5.5-1$$

$$0,108 \cdot 20 = 2,16W$$

Z výpočtu je vidieť že na tranzistore sa spálil výkon 2,16W čo približne zodpovedá teoretickej hodnote. Na Grafe Grf.5.1 vidieť priebeh teploty počas celého merania.



Graf.5.1Priebeh teploty verzia 20A



Obr.5.1-1 Snímky merania teploty 20A MIN-MAX

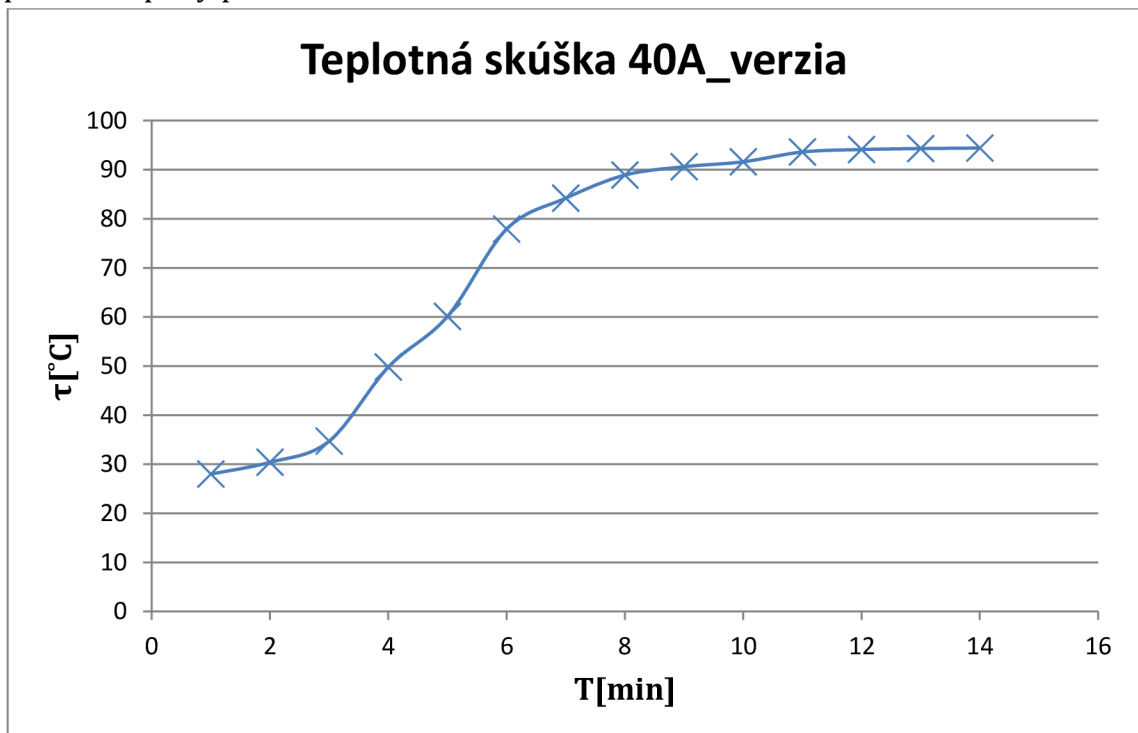


## 5.2 Oteplenie 40A\_verzia

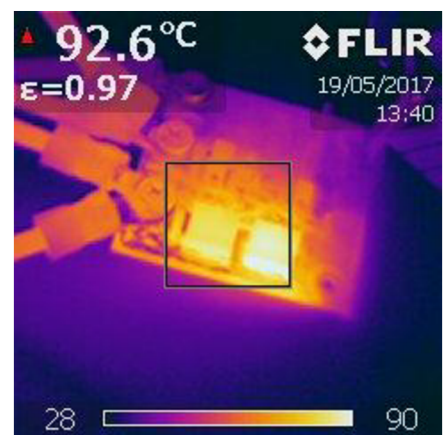
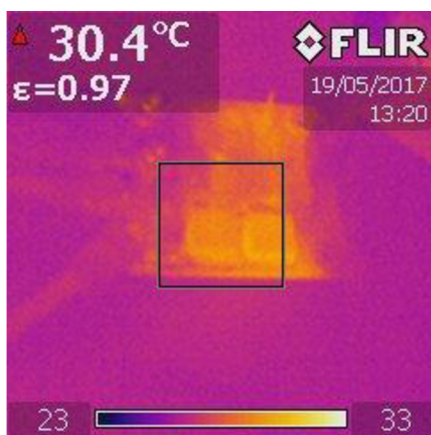
Na Zdroji nastavených 20V/50A rekuperačná komora bola nastavená na 40A. Po zopnutí spínača zase tiekol asi prvú minútu prúd 10A a následne začal tiecť menovitý prúd 40A. Úbytok na tranzistore činil 82mV. Z čoho vyplýva stratový výkon.

$$0,92 \cdot 40 = 3,68W$$

Z výpočtu je vidieť že na tranzistoroch sa spálil výkon 3,68W čo znamená že na jednom tranzistore sa vyžiarilo teplo o veľkosti 1,81W. Na Grafe Graf.5.2 vidieť priebeh teploty počas celého merania.



Graf.5.2 Priebeh teploty verzia 40A



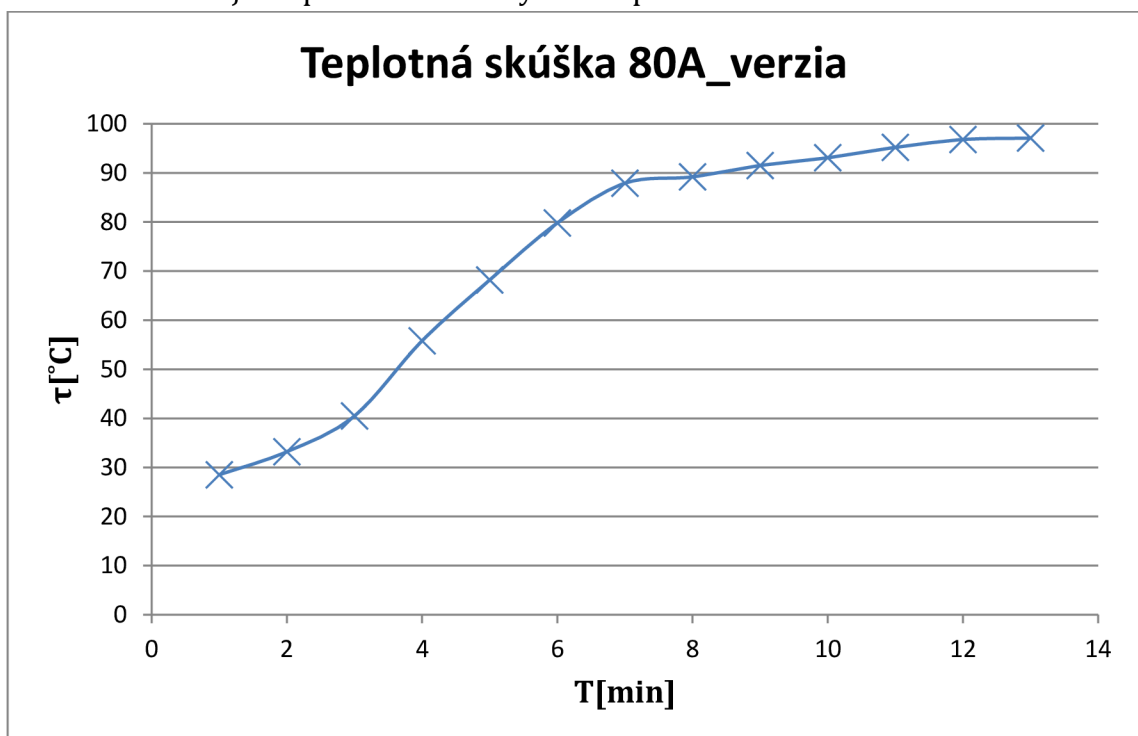
Obr.5.2-1 Snímky merania teploty 40A MIN-MAX

### 5.3 Oteplenie 80A\_verzia

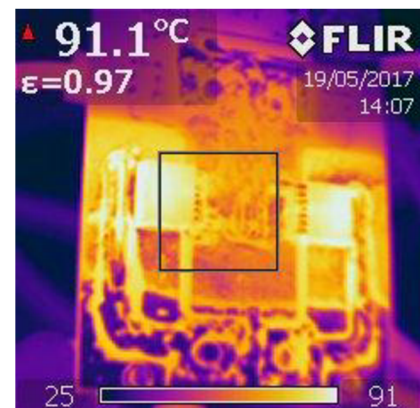
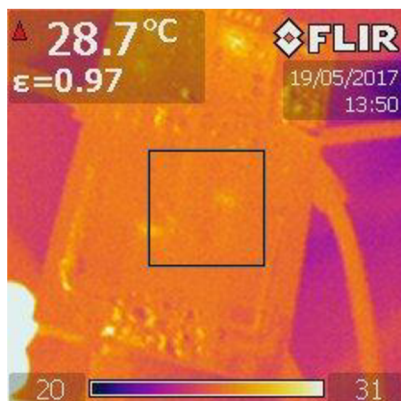
Zdroji nastavených 20V/90A rekuperačná komora bola nastavená na 80A. Po zopnutí spínača začal tiecť najskôr prúd 10A obdobne ako v predchádzajúcich prípadoch a následne menovitý prúd 80A. Kde daný spínač bol osadený štyrmi paralelne zapojenými tranzistorami. Pre lepšie rozloženie teplôt boli dva na vrchnej a dva na spodnej strane. Úbytok na tranzistoroch činil 63mV.

$$0,063 \cdot 80 = 5,04W$$

Z výpočtu je vidieť že na tranzistoroch sa spálil výkon 5,04W čo znamená že na jednom tranzistore sa vyžiarilo teplo o veľkosti 1,26W. Na Grafe Graf.5.3 vidieť priebeh teploty počas celého merania. Kde je vidieť že teplota sa ustálila niekde na hodnote 96°C čo je už pomerne dosť vysoká teplota.



Graf.5.3 Priebeh teploty verzia 80A



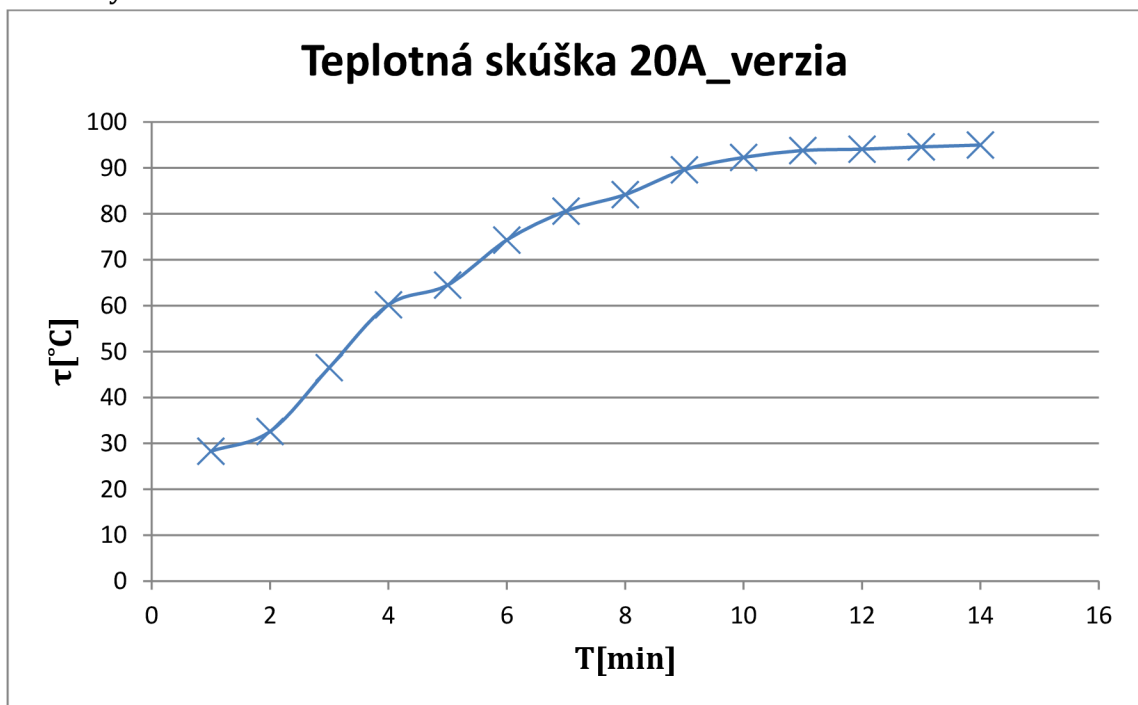
Obr.5.3 Snímky merania teploty 80A MIN-MAX

## 5.4 Oteplenie 160A\_verzia

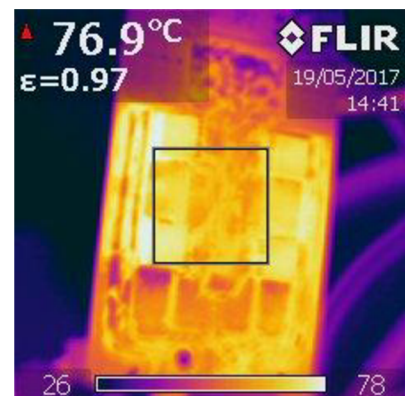
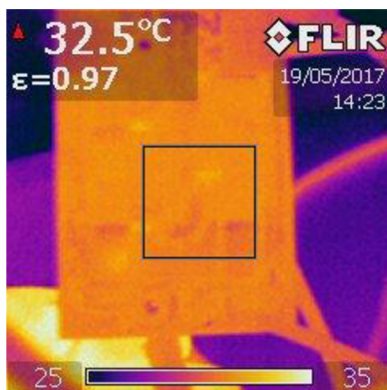
Na Zdroji nastavených 20V/170A rekuperačná komora bola nastavená na 160A. Po zopnutí spínača ako v predchádzajúcich prípadoch najskôr menší prúd a následne menovitý prúd 160A. Kde daný spínač bol osadený ôsmimi paralelne zapojenými tranzistorami. Pre lepšie rozloženie teplôt boli štyri na vrchnej a štyri na spodnej strane Úbytok na tranzistoroch činil 58mV.

$$0,058 \cdot 160 = 9,28W$$

Z výpočtu je vidieť že na tranzistoroch sa spálil výkon 9,28W čo znamená že na jednom tranzistore sa vyžiarilo teplo o veľkosti 1,16W. Na Grafe Graf.5.4 vidieť priebeh teploty počas celého merania. Kde je vidieť že teplota sa ustálila niekde na hodnote 98°C čo je už pomerne dosť vysoká teplota. A ako je vidno aj na obrázkoch z termovízie celí spínač je už dosť prehriaty. Ale teplota je stále v norme stým čo udáva výrobca tranzistorov.



Graf.5.4 Priebeh teploty verzia 160A



Obr.5.4-1 Snímky merania teploty 160A MIN-MAX

## 6 MERACIE PRACOVISKO

K rýchlemu a jednoduchému testovaniu týchto spínačov bolo vytvorený testovací prípravok. Ktorý otestuje funkčnosť spínača a uloží zmerané dáta ktoré môže následne obsluha vyhodnotiť a prehlásiť či daný spínač vyhovela alebo nie. Testovanie by malo prebiehať vo viacerých fázach.

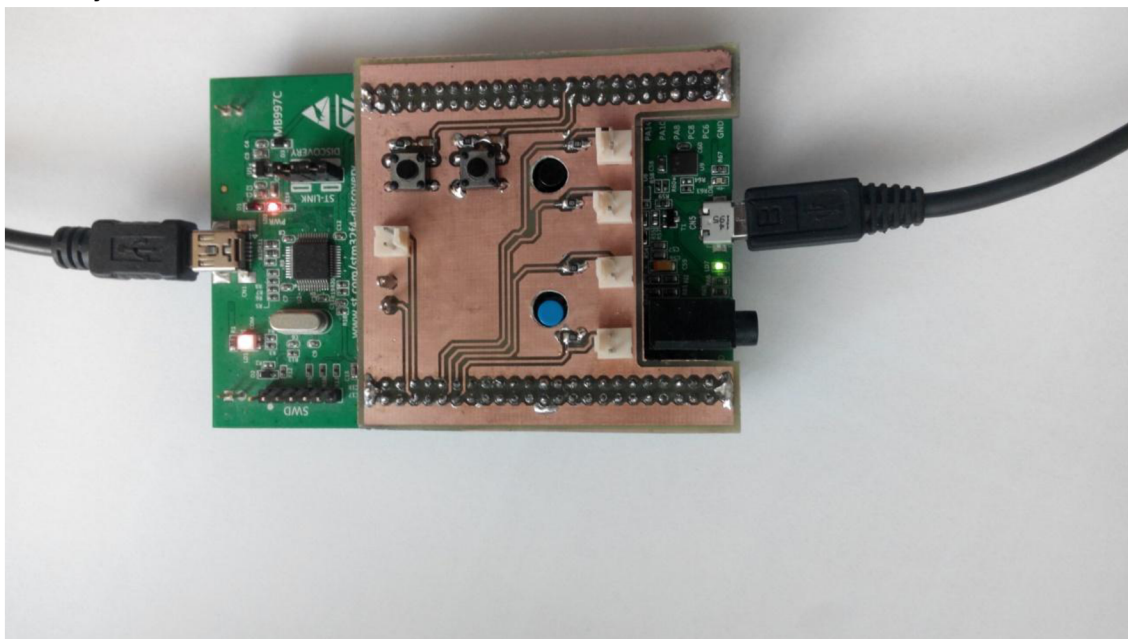
Prvá fáza je dôkladná vizuálna kontrola osadeného plošného spoja. Správnosť osadenia komponentov a ich hodnôt. Ďalej skontrolovať či spínač nie je nijak mechanicky poškodený.

Po tejto kontrole ho je možné pripojiť k napájaniu. Treba sa riadiť schematickým zapojením a dodržať správnu polaritu napájania. Ďalej je potrebná aby nebolo prekročené maximálne napätie čo je 30V.

Pokiaľ zapneme napájanie spínača riadiace vodiče sú odpojené spínač by mal byť v stave vypnutý pokiaľ nie je tak je na danom spínači porucha a je potrebné spínač okamžite odpojiť od napájania inak by mohlo dôjsť k deštrukcii spínacieho prvku.

Pokiaľ je všetko v poriadku je možné pripojiť riadiace vodiče k meraciu prípravku. Kde tento prípravok ma na to určené špeciálne svorky pozri obrázok Obr.6.1. Ďalšie svorky má na externý trigger ktorý môže ale nemusí byť zapojený môže sa tigrovať aj manuálne osciloskopom a prevedie sa test1 pokiaľ všetky charakteristiky zodpovedajú referenčným v teste vyhovela pokiaľ nie spínač je vlnadný

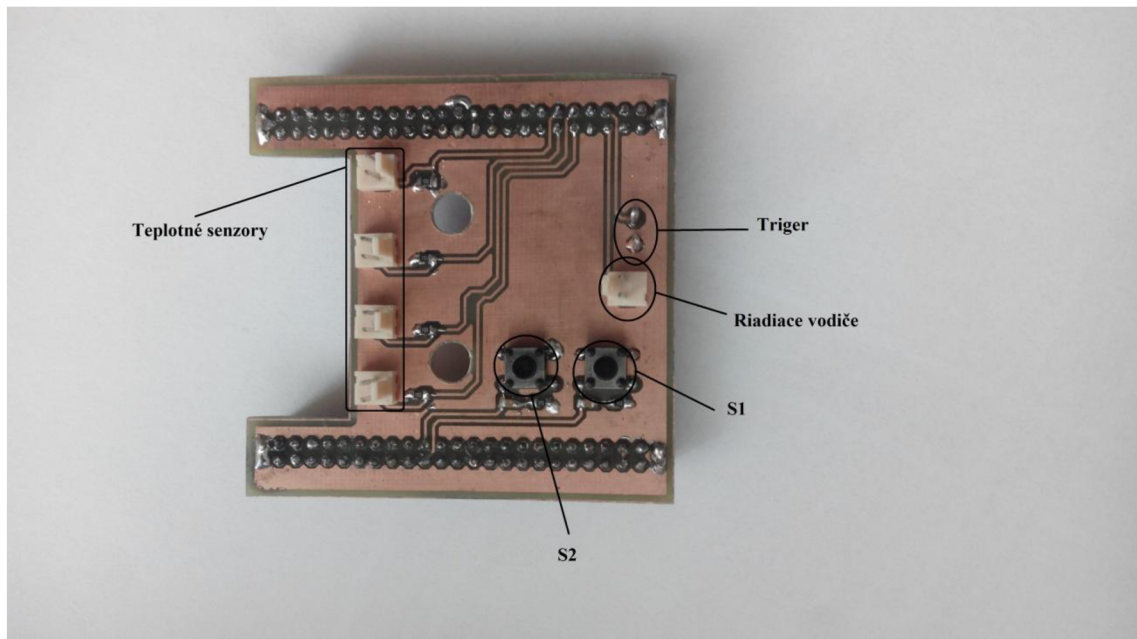
Následne pokiaľ je všetko v poriadku prevedie sa test 2 kde tento test trvá približne 15 min a je k nemu potrebné adekvátni zdroj prúdu (podľa verzie)a adekvátna záťaž po vyhovený aj v tomto teste je možné spínač prehlásiť za plne funkčný.



Obr.6 Merací prípravok

## 6.1 Testovací přípravok

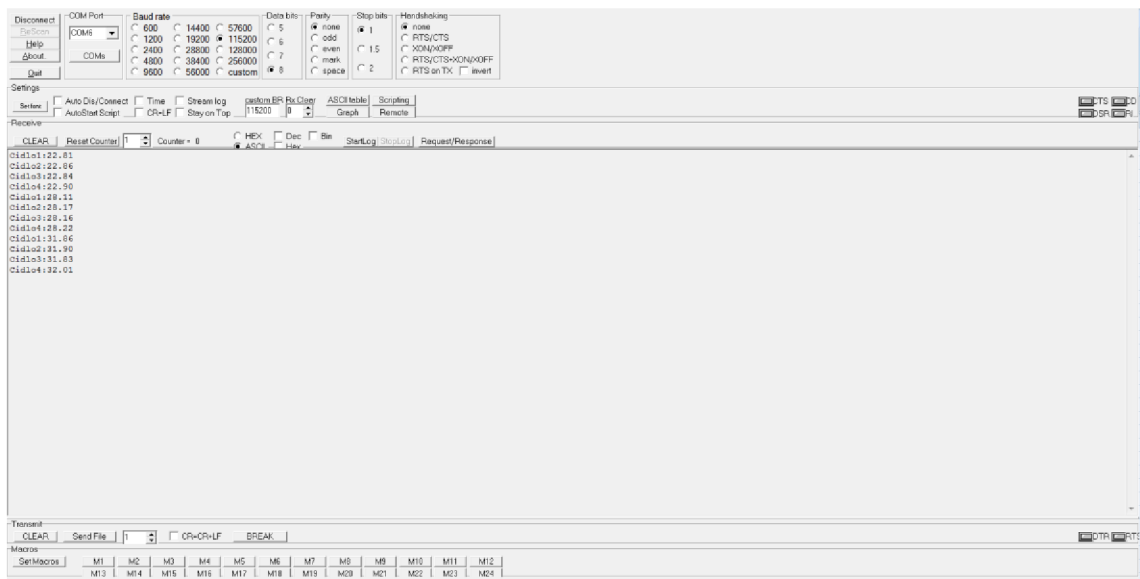
Testovací přípravok je zhotovený z vývojového kitu STM32 MCU Discovery a pomocnej redukcie na tento kit. Táto redukcia má vyvedené štyri konektory na teplotné senzory. Ďalej má jeden riadiaci konektor a trigrovacie špičky. Dve tlačidlá tlačidlo S1 na test jedna tlačidlo S2 na test dva. Prípadné rozloženie konektorov je na obrázku Obr.6.1. Ďalej tento pripravok je schopní komunikovať cez virtuálny com port na ktorý odosiela nameranú teplotu tieto hodnoty je možné ďalej spracovať.



Obr.6.1 Popis meracieho pripravku

### 6.1.1 Komunikácia pripravku a PC

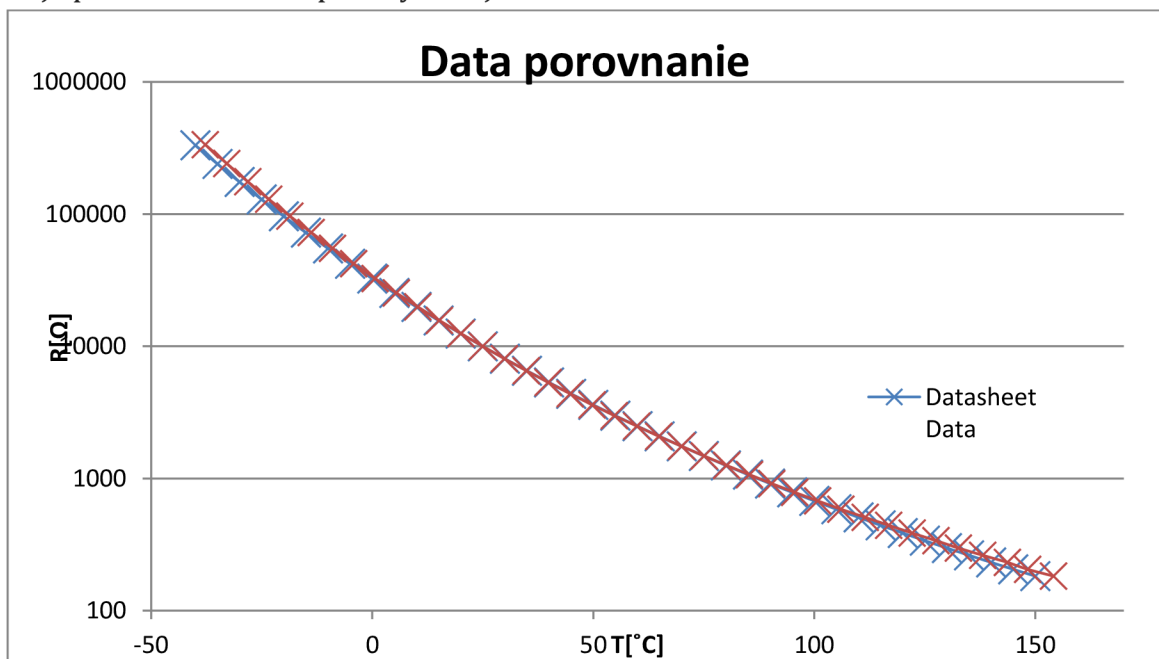
Je realizovaná pomocou USB pripravok sa po pripojení k PC tvári ako virtuálny com port. A teda je možné ho len jednoducho pripojiť k PC a otvoriť si ľubovoľne dostupný terminál v ktorom sa nám budú zobrazovať hodnoty tieto hodnoty teploty je následne dobré skopírovať a vyhodnotiť nejakom tabuľkovom software. Toto posielanie teplôt funguje iba v teste dva to znamená po stlačení tlačidla S2. Problém môže nastať pokiaľ pripájate testovacie pracovisko prvý krát k PC váš počítač nemusí rozpoznať tento virtuálny com port preto je potrebné ho manuálne doinštalovať kde daný ovládač je umiestnení v prílohe. Pokiaľ vlastníte iní operační systém je možné ho siahnuť na stránkach výrobcu vývojového kitu.



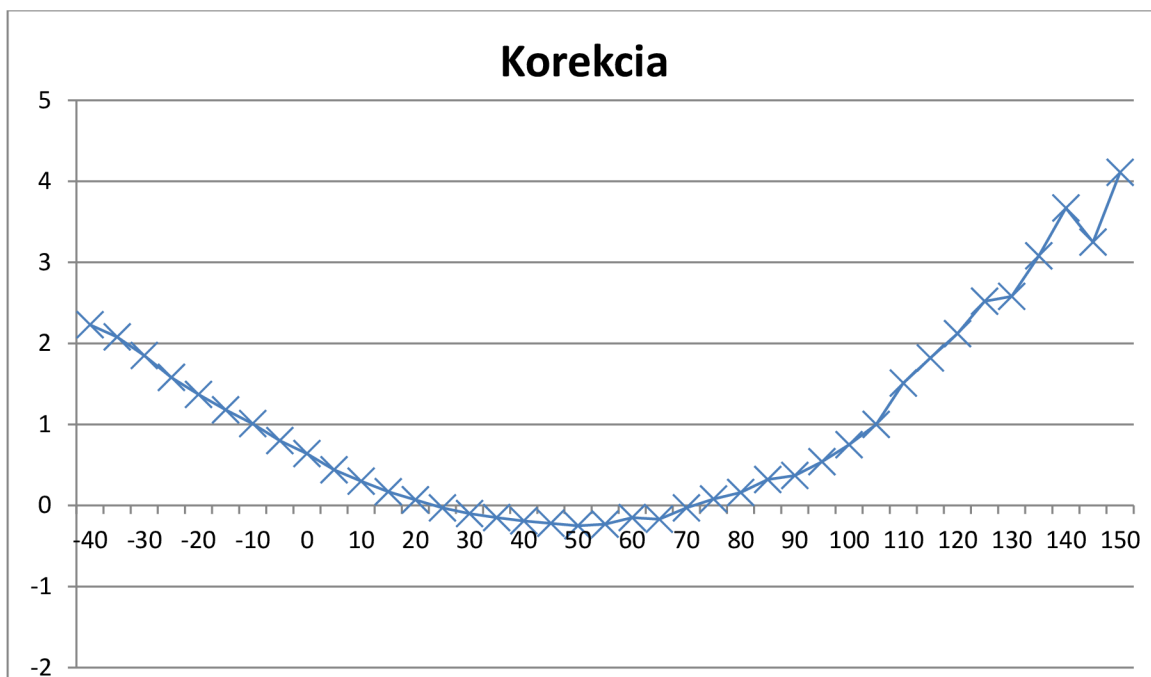
Obr.6.1.1 Výstup z meracieho prípravku

## 6.1.2 Meranie teploty

Meranie teploty je realizované pomocou NTC termistoru zapojeného v deliči kde zmenu teploty sa danému termistoru mení odpor tým sa nám mení pomer deliča a tým pádom napätie na výstupe deliča ktoré po vhodnej linearizácii prevedieme na teplotu. Takto namerané hodnoty sme vyniesli do grafu a porovnali s výrobcom a zostrojili sme korekčnú krivku a zistili sme že meranie sa odchyľuje najviac o 4°C čo je pre naše meranie plne vyhovujúce



Graf 6.1.2 Porovnanie teplôt s výrobcom



Graf 6.1.2-1 Korekčná krivka

### 6.1.2.1 Linearizácia a prevod na teplotu

Kalibrácia prebiehala v izbovej teplote tým pádom sa predpokladá že aj meranie bude prebiehať v podobných podmienkach ale nie je to priama nutnosť

```

measure_data=10000/((4093/measure_data)-1);
temperature=measure_data/10000;
temperature=logf(temperature);
temperature/=3977.0;
temperature+=1/(25.0+273.15);
temperature=(1/temperature)-273.15;
return temperature;

```

Ako z prvej časti kódu vyplýva najskôr prevádzame hodnoty registru na napätie a následne na teplotu kde spravíme logaritmus tým hodnoty linearizujeme následne spravíme korekcie aby hodnota bola v stupňoch Celzia a dané hodnoty vracia funkcia následne ich posielame na virtuálni port

## 6.2 Test jedna

Pri teste jedna je potrebné pripojiť k spínaču zdroj napätia záťaž a merací prípravok. Ten je potrebné napájať osve napríklad z USB portu. následne je za potreby na spínač umiestniť meracie sondy do osciloskopu vložiť USB disk. Pokiaľ máme takto zapojené pracovisko môžeme začať merať. Meranie sa spúšťa

tlačidlom S1 a následne sa nám na osciloskope zobrazia priebehy riadiacich pulzov meraných tranzistorov tieto údaje je dobré si uložiť na USB vo formáte .csv kde tento formát je veľmi jednoduché importovať do Excelu a následne vytvoriť graf prípadne porovnať namerané hodnoty s referenčnými.

### **6.3 Test dva**

Pokiaľ spínač vyhovel je možné pokračovať v teste dva kde je potrebné odpojiť sondy osciloskopu po predchádzajúcom meraní a následne pripojiť meracie senzory teploty. Pri tomto meraní je potrebné mať zdroj ktorý vydrží aspoň 15minút dodávať konštantný prúd. Kde ďalej je potrebné mať PC do ktorého sa zasunie USB a do terminálu bude posielat' namerané hodnoty teploty na všetkých štyroch senzorech, ktoré je možné zase porovnať s referenčnými krivkami. Pokiaľ spínač vyhoví aj v tomto teste je plne pripravený na prevádzku.



## 7 ZÁVER

Oboznámili s problémami výkonového spínania v mobilnej robotike a zistili sme nákovky na takýto výkonový spínač. Kde výkonový spínač môže byť realizovaný rôznymi spôsobmi ale pre mobilnú robotiku najviac vyhovuje polovodičový spínač ktorý je zvyčajne realizovaný MOS-FET tranzistorom. A preto sme sa aj mi vybrali túto cestu. Zopakovali sme si princíp výroby MOS-FET tranzistorov a ich principiálne fungovanie. Následne sme zistili že MOS-FET tranzistor má parazitne zložky ktoré sa veľkou mierou podieľajú na kvalite spínania veľkých výkonov. Dané parazitné vlastnosti sme zakreslili do modelu. Pre overenie teoretických znalostí a výpočtov sme realizovali praktický návrh na ktorom sme následne overili všetky teoreticky nadobudnuté znalosti. Kde pre realizáciu sme použili MOS-FET tranzistor IRFS4010 pre jeho dobré vlastnosti a rozšírené použitie. po prevedení meraní na prototyp sa nám potvrdili vypočítané hodnoty kde následne sme prototyp dimenzovali na 20A tento prúd je závislý na teplote daného tranzistora počas jeho funkcie kde teplota nám pri 20A vyšla niekde okolo 80°C. Ako už bolo spomenuté dimenzácia súčiastok pre prototyp vychádzala z vypočítaných hodnôt a požiadavkov kladených na výkonový spínač pre mobilnú robotiku. Keďže 20A je v celku malý výkon bolo potrebné navrhnuť spínače ktoré vydržia väčšie zaťaženie. Preto sme spravili návrh štyroch výkonových verzii o menovitých prúdoch 20A, 40A, 80A a 160A. pri každej verzii sme dôkladne realizovali meranie kde následne sme tieto hodnoty prehlásili za referenčné. Pri realizácii týchto verzii sme využili dobrých vlastností MOS-FET tranzistorov a spájali sme ich paralelne A tak sa nám podarilo dosiahnuť celkom dobré výsledky. Pre jednoduchosť testovania bol zhotovený prípravok na ktorom je možné daný spínač jednoducho a efektívne otestovať. Kde po meraní máme veľké množstvo údajov s ktorých je možné rozhodnúť o kvalite spínača.

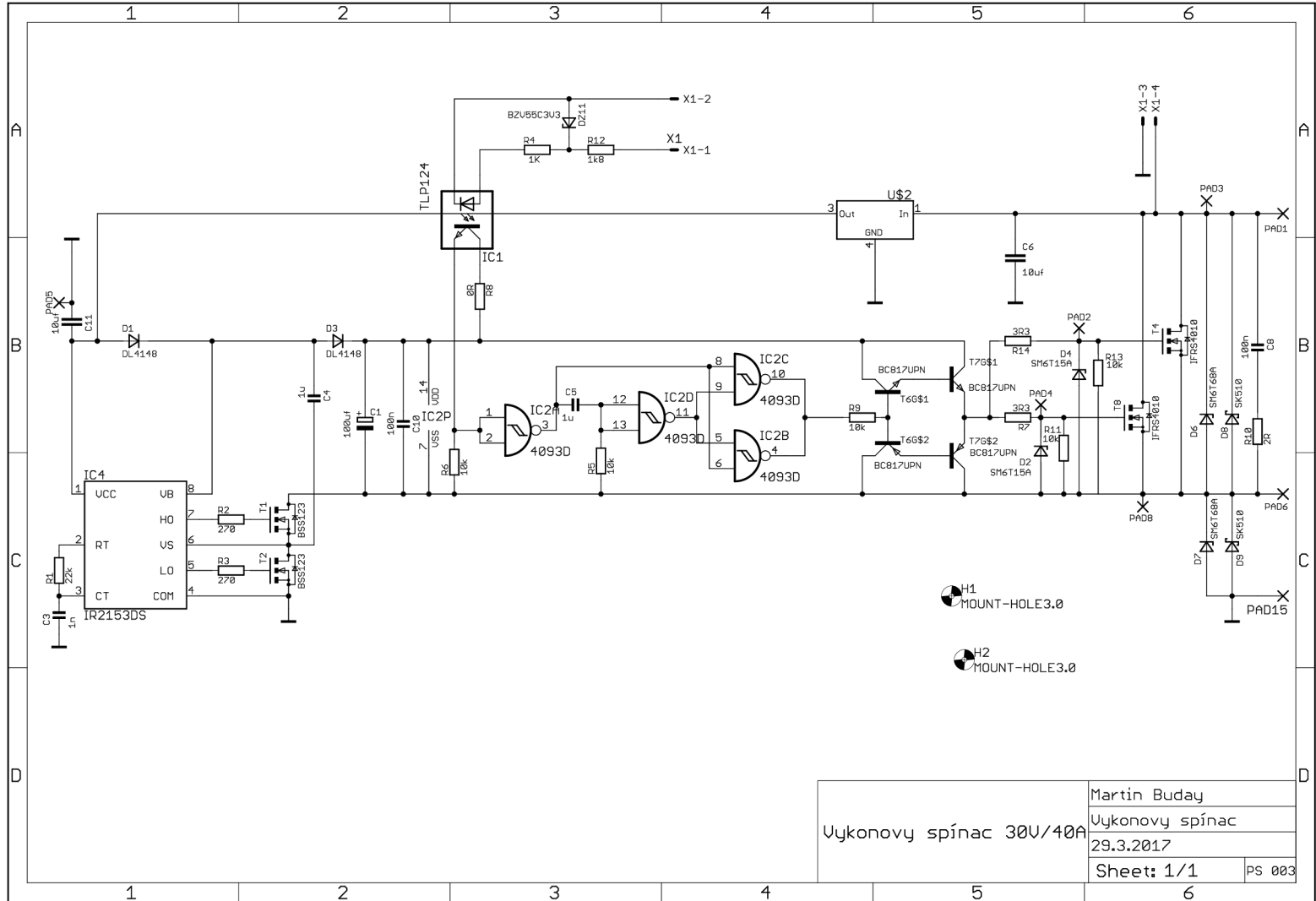
# Literatúra

- [1] PATOČKA, M. Výkonové polovodičové spínací součástky. Brno: FEKT, VUT v Brně, 2014. s. 1-179.
- [2] STENGL, Jens Peer a Jenö TIHANYI. Výkonové tranzistory MOSFET. Praha: BEN - technická literatura, 1999. ISBN 80-860-5654-6.
- [3] Budiče výkonových tranzistorů MOSFET a IGBT [online]. [cit. 2017-01-03]. Dostupné <http://www.elektrorevue.cz/clanky/04030/index.html>
- [4] Preklápací obvod. In: : the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: [https://sk.wikipedia.org/wiki/Prekl%C3%A1pac%C3%AD\\_obvod](https://sk.wikipedia.org/wiki/Prekl%C3%A1pac%C3%AD_obvod)
- [4] *STM32 Virtual COM Port Driver: STSW-STM32102* [online]. [cit. 2017-05-28]. Dostupné z: <http://www.st.com/en/development-tools/stsw-stm32102.html>
- [5] *Reference manual: STM32F407* [online]. [cit. 2017-05-28]. Dostupné z: [http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference\\_manual/3d/6d/5a/66/b4/99/40/d4/DM00031020.pdf/files/DM00031020.pdf/jcr:content/translations/en.DM00031020.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/3d/6d/5a/66/b4/99/40/d4/DM00031020.pdf/files/DM00031020.pdf/jcr:content/translations/en.DM00031020.pdf)
- [6] *Mikrocontroller: STM32F407* [online]. [cit. 2017-05-28]. Dostupné z: [http://mikrocontroller.bplaced.net/wordpress/?page\\_id=744](http://mikrocontroller.bplaced.net/wordpress/?page_id=744)

# Zoznam príloh

1. Meracia stanica
  - DPS
  - Meranie Teploty kalibrácia
  - Ref hodnoty
  - SW
  - Foto
2. Meranie teploty
  - 20A\_verzia
  - 40A\_verzia
  - 80A\_verzia
  - 100A\_verzia
  - Foto
  - Grafy
3. Plány pre výrobu
  - 20A\_verzia
  - 40A\_verzia
  - 80A\_verzia
  - 160A\_verzia

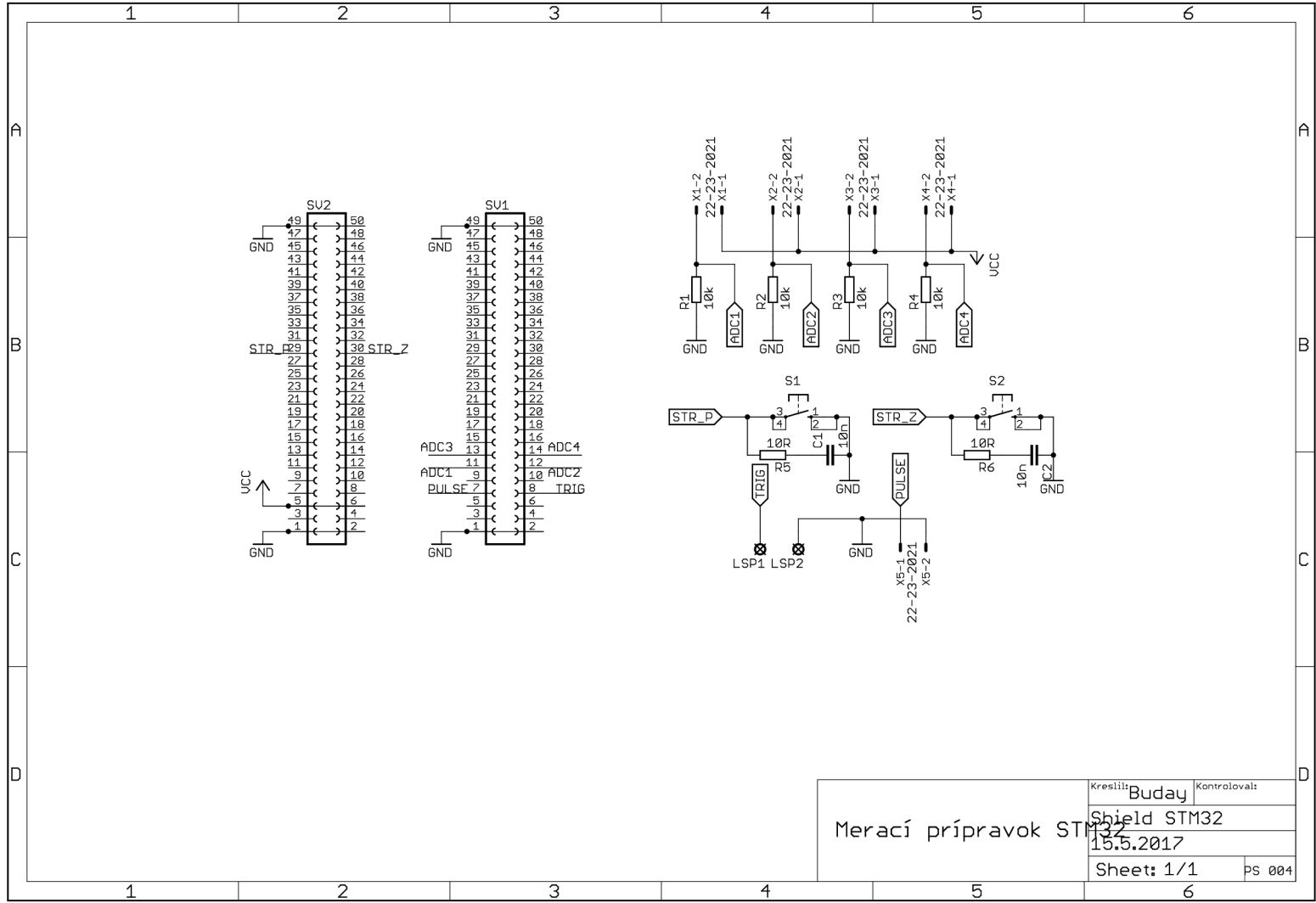
Schéma zapojenia výkonového spínača



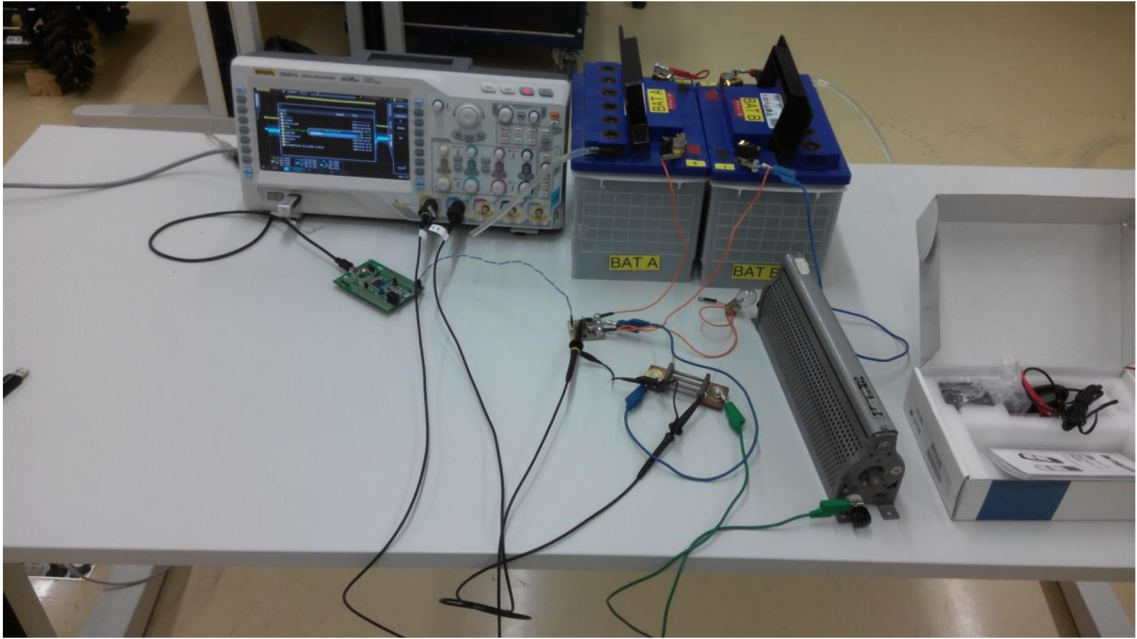
Uykonovy spínac 30V/40A

Martin Buday
Uykonovy spínac
29.3.2017
Sheet: 1/1     PS 003

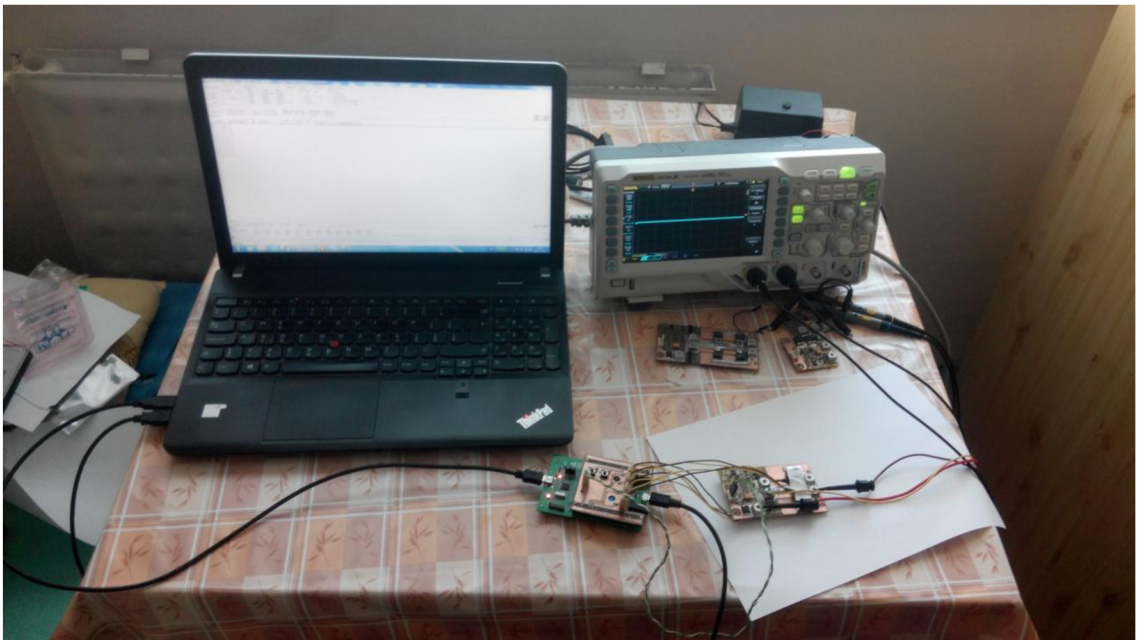
Schéma zapojenia meracieho prípravku



Merací prípravok STM32		Kreslil: Buday	Kontroloval:
		Shield STM32	
		15.5.2017	
		Sheet: 1/1	PS 004



Zapojenie meracieho pracoviska



Zapojenie meracieho pracoviska