

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2020

Dávid Čunderlík





# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## PRŮMYSLOVÝ NAPÁJECÍ ZDROJ S OVLÁDÁNÍM VÝSTUPŮ

INDUSTRIAL POWER SUPPLY WITH OUTPUT CONTROL

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dávid Čunderlík

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Krajsa, Ph.D.

BRNO 2020



# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

**Student:** Dávid Čunderlík

**ID:** 195295

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Průmyslový napájecí zdroj s ovládáním výstupů

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Navrhněte a realizujte zdroj 12/24V napájený ze sítě 230V. Zdroj bude disponovat dvěma výstupy, monitoringem stavu a možností řízení výstupů pomocí počítačové sítě. Bude možné měnit proudové omezení a odpínat jednotlivé výstupy. Finální provedení zdroje bude s montáží na DIN lištu.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] KREJČIŘÍK, Alexandr. Lineární napájecí zdroje. Praha: BEN - technická literatura, 2001, 136 s. : il. ISBN 80-7300-002-4.

[2] MANIKTALA, Sanjaya. Switching power supply design & optimization. New York: McGraw-Hill, 2005, xvi, 395 s. : il. ISBN 0-07-143483-6.

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 8.6.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Ondřej Krajsa, Ph.D.

**prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
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

Táto práca sa zaoberá problematikou napájacích zdrojov a ich použitíu. Popisom blokových častí zdrojov je bližšie popísaná ich funkcia ale aj kladené požiadavky pri návrhu. Je kladený väčší dôraz na popis fungovania spínaných zdrojov a meničov. V práci je navrhnutý priemyslový zdroj s možnosťou ovládania výstupov ktorý je možné umiestniť na lištu DIN. Zdroj obsahuje 6 nezávislých ovládateľných výstupov s celkovým výkonom 120W. Teoreticky je rozpísaný výber a použitie komponentov pre riadenie a komunikáciu. Praktickou časťou je zostavenie a navrhovaného zdroja, 3D model a jeho technická dokumentácia.

## KLÚČOVÉ SLOVÁ

spínané zdroje, TOPswitch, návrh, ATmega328, DC/DC meniče, testovanie

## ABSTRACT

This bachelor's thesis covers basic theory about power supplies, it's design and usage. Theory provide detailed information about each functional part in PSU. The main object are switch-mode power supplies and converters, their function and design. Industrial power supply is designed with functions of controlling the outputs. This power supply is designed to be mounted on DIN rail. Designed power supply have 6 independent regulated outputs with total power of 120W. Theory about components for controlling and communicating are discussed on theoretical basis. Practical part of thesis is assembly of a whole power supply, 3D model and it's technical documnetation.

## KEYWORDS

switch-mode power supply, TOPswitch, design, ATmega328, DC/DC converters, testing

ČUNDERLÍK, Dávid. *Průmyslový napájecí zdroj s řízením*. Brno, 2020, 72 s. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedúci práce: Ing. Ondřej Krajsa, Ph.D.





## VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému „Průmyslový napájecí zdroj s řízením“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora



## POĎAKOVANIE

Rád by som sa poďakoval vedúcemu bakalárskej práce pánovi Ing. Ondřej Krajsa Ph.D. za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci.



# Obsah

|   |           |
|---|-----------|
| Úvod  | 15        |
| <b>1 Konceptia napájacích zdrojov</b>           | <b>17</b> |
| 1.1 Lineárne zdroje                             | 18        |
| 1.1.1 Vstupný transformátor                     | 18        |
| 1.1.2 Usmerňovač                                | 18        |
| 1.1.3 Filter                                    | 19        |
| 1.1.4 Lineárny regulátor napätia                | 19        |
| 1.2 Spínané zdroje                              | 20        |
| 1.2.1 Izolované zdroje                          | 20        |
| 1.2.2 Topológie spínaných zdrojov               | 22        |
| 1.2.3 Dvojčinné zdroje                          | 23        |
| 1.2.4 Neizolované zdroje                        | 24        |
| 1.2.5 Porovnanie lineárnych a spínaných zdrojov | 26        |
| <b>2 Návrh zdroja</b>                           | <b>27</b> |
| 2.1 Zadanie                                     | 27        |
| 2.2 Voľba zdroja                                | 27        |
| 2.3 Popis napájacej časti zdroja                | 27        |
| 2.3.1 TOPswitch-GX                              | 27        |
| 2.3.2 Návrh zdrojovej časti                     | 30        |
| 2.4 Meniče napätia                              | 31        |
| <b>3 Riadenie a komunikácia</b>                 | <b>33</b> |
| 3.1 Mikrokontrolér                              | 33        |
| 3.2 Ovládacie prvky výstupných vetiev           | 33        |
| 3.3 Komunikácia                                 | 34        |
| 3.3.1 Modul W5500                               | 34        |
| 3.3.2 RS-485                                    | 34        |
| <b>4 Výsledky práce</b>                         | <b>35</b> |
| 4.1 3D model zdroja                             | 35        |
| 4.2 Zdrojový kód                                | 35        |
| <b>Záver</b>                                    | <b>37</b> |
| <b>Literatúra</b>                               | <b>39</b> |
| <b>Zoznam príloh</b>                            | <b>41</b> |

|   |  |    |
|---|--|----|
| A | Technická správa                       | 43 |
| B | Fotografie zostavenej testovacej časti | 65 |
| C | Ukážka 3D modelu                       | 67 |
| D | Graf zaťažovacej charakteristiky       | 69 |
| E | Obsah priloženého CD                   | 71 |

# Zoznam obrázkov

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.1 | Spínaný zdroj napätia formátu ATX [1] a príklad lineárneho zdroja . . . . . | 17 |
| 1.2 | Bloková schéma lineárneho zdroja . . . . .                                  | 19 |
| 1.3 | Bloková schéma izolovaného spínaného zdroja . . . . .                       | 21 |
| 1.4 | Zjednodušená schéma akumuláčného zdroja . . . . .                           | 22 |
| 1.5 | Zjednodušená schéma priepustného zdroja . . . . .                           | 23 |
| 1.6 | Zjednodušená schéma zdroja typu PUSH-PULL . . . . .                         | 24 |
| 1.7 | Zjednodušená schéma boost meniča . . . . .                                  | 25 |
| 1.8 | Zjednodušená schéma buck meniča . . . . .                                   | 25 |
| 2.1 | Blokový diagram TOP2xxY/R/F . . . . .                                       | 28 |
| 2.2 | Závislosť pracovného cyklu a frekvencie na vstupnom CONTROL prúde           | 29 |





# Úvod

Táto práca sa venuje problematike spínaných zdrojov. Cieľom bol kompletný návrh priemyslového zdroja s funkciou ovládania a regulovania vlastností výstupov. Zdroj obsahuje šesť regulovateľných výstupov o napätí 2x5 V, 2x12 V a 2x24 V. Výstupy je možné externe odpájať a výstupný prúd je možné obmedziť. Celkový výkon zdroja spĺňa požadovaných 120 W pri maximálnom vyťažení.

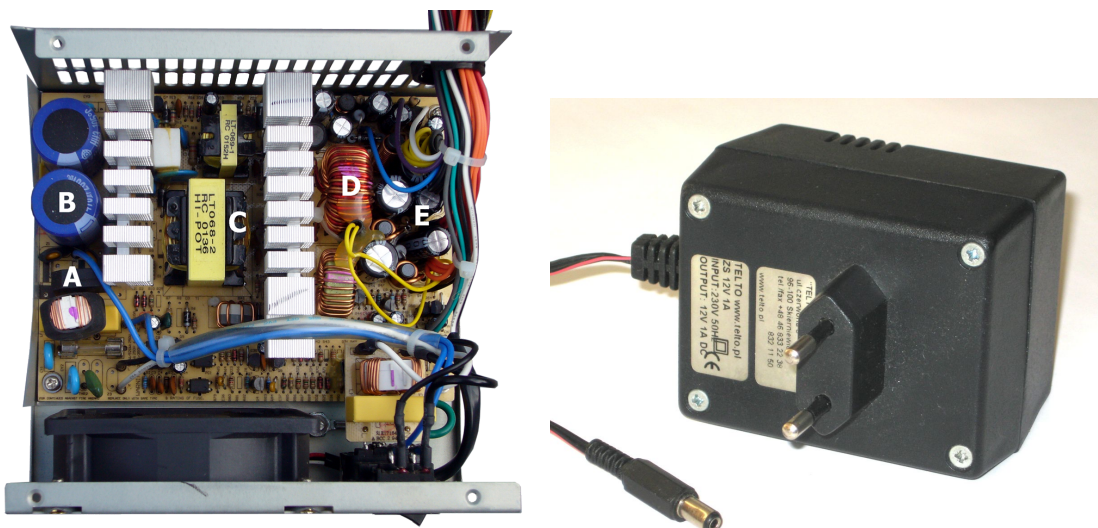
Práca je rozdelená do niekoľkých častí. V prvej sú popísané vlastnosti a funkčné bloky lineárnych a spínaných zdrojov, ako tiež princíp ich fungovania. Druhá je zameraná na návrh zdroja, jeho princípu fungovania a návrhu dosky plošných spojov ale taktiež sa zaoberá teoretickou časťou ovládania a regulácie výstupov následne aj spôsobmi a možnosťami externej komunikácie. Posledná časť obsahuje sprievodnú technickú správu hotového zdroja s popisom kompletného návrhu dosky zoznamu komponentov a ukážku zdrojového kódu.



# 1 Koncepcia napájacích zdrojov

Napájací zdroj môže byť vo všeobecnosti definovať ako menič vstupnej energie (elektrickej, elektrochemickej, solárnej, atď.) na výstupnú elektrickú energiu. Tieto zariadenia plnia dve základné funkcie: zmenu priebehu a veľkosti vstupného napätia a prúdovú či napäťovú stabilizáciu výstupu. Obecne môžeme tieto zdroje rozdeliť z hľadiska ich fungovania na lineárne a spínané napájacie zdroje. [2]

V dnešnej dobe je väčšina používaných zdrojov v bežnej elektronike typu spínaného zdroja, hlavne pre ich nižšiu hmotnosť a veľkosť proti lineárnym zdrojom a taktiež vyššiu účinnosť. Napriek tomu majú lineárne zdroje stále svoje použitie, vďaka svojmu jednoduchšiemu návrhu a konštrukcií a jednak kvôli nižšiemu výstupnému rušeniu.



Obr. 1.1: Spínaný zdroj napätia formátu ATX [1] a príklad lineárneho zdroja

## 1.1 Lineárne zdroje

Lineárne zdroje zväčša vstupné napätie len znižujú. Z hľadiska fungovania jednotlivých častí zdroja ich môžeme rozdeliť na 4 základné bloky obr. 1.2.

### 1.1.1 Vstupný transformátor

Úlohou transformátora v lineárnom zdroji je vstupné striedavé napätie znižovať alebo zvyšovať. Skladá sa z dvoch (prípadne viacerých) cievok zvaných vinutia) umiestnených na spoločnom feromagnetickom jadre. Jedná sa o galvanicky oddelenú zmenu napätia t.j. sekundárne vinutie je elektricky izolované od primárneho vinutia.

Primárne vinutie slúži k prevodu elektrickej energie na magnetickú, kde prúd, ktorý preteká vinutím, vytvára v jadre transformátora magnetický tok  $\Phi$ . Ten následne vybudí napätie na sekundárnom vinutí transformátora. Jadro je zväčša tvorené z izolovaných kusov železo-kremíkového plechu (trafoplech) pre zamedzenie tvorby nežiadúcich indukovaných vírivých prúdov, ktoré vznikajú zmenou magnetického toku v jadre. Pre pomer indukovaných napätí platí rovnica transformátora 1.1 kde  $U_1$  je napätie pripojené k primárnemu vinutiu,  $U_2$  je napätie na sekundárnom vinutí a analogicky  $N_1$  a  $N_2$  počty závitov jednotlivých vinutí. Výstupné napätie  $U_2$  musíme voliť o niečo vyššie než bude nami požadované napätie na výstupe zdroja z dôvodu úbytkov napätia na usmerňovači a stabilizátore.

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.1)$$

Zvolený transformátor musí byť správne dimenzovaný pre požadovaný výkon zdroja. Rozmery transformátorov však rastú s výkonom, pretom transformátory pre lineárne zdroje o veľkom výkone dosahujú obrovských rozmerov a hmotností. [3]

### 1.1.2 Usmerňovač

Úlohou usmerňovača je prevedenie striedavého napätia na jednosmerné. Požiadavky na výstupné napätie, prúd a množstvo zvlnenia nám určia ktorý typ usmerňovača je vhodný pre naše použitie. V dnešných lineárnych napájacích zdrojoch sa vyskytujú hlavne mostíkové (Graetzove) a dvojcestné zapojenia, kde v prípade dvojcestného usmernenia je potrebné aby mal tzv. symetrické sekundárne vinutie. Jednocestné usmernenie je zväčša používané pri transformátoroch, ktoré majú výstupné napätie mnohonásobne vyššie než je vstupné tzv. VN transformátory. Podľa veľkosti prúdu, ktorý má usmerňovač dodávať, volíme taktiež medzi mostíkovým a dvojcestným usmernením pri zdrojoch s väčším výkonom, a podobne je to aj pri výstupnom zvlnení, kde jednocestné usmernenie vnáša horšie zvlnenie do výstupu zdroja.

### 1.1.3 Filter

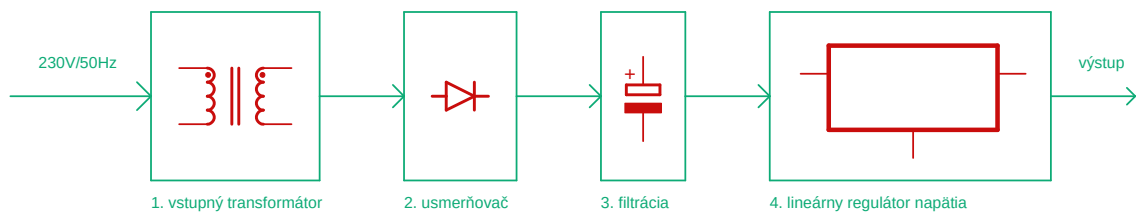
Keďže výstupné napätie za usmerňovačom je už síce jednosmerné, stále sa nejedná o konštantné napätie ktoré je potrebné na napájanie stabilizátora. Použitie filtračného kondenzátora zabezpečuje napájanie stabilizátora a záťaže čase, keď pulzujúce napätie z usmerňovača dosahuje nižšie napätie než je napätie požadované na výstupe zdroja. Rozhodujúcim kritériom pri voľbe filtračného kondenzátora je jeho kapacita, ktorej hodnotu môžeme určiť podľa rovnice 1.3 prevzatej z [4],  $U_{\min}$  určíme minimálnu hodnotu napätia v rámci prípustného kolísania výstupného napätia.  $E_C$  1.2 predstavuje energiu dodávanú z filtračného kondenzátora, kde  $P_{\text{out}}$  predstavuje celkový výkon zdroja,  $f$  je pracovná frekvencia zdroja a  $\gamma$  účinnosť zdroja.

$$E_C = \frac{P_{\text{out}}}{2 \cdot f \cdot \gamma} \quad (1.2)$$

$$C = \frac{4 \cdot E_C}{U_{\min}^2 - (0,85 \cdot U_{\min})^2} \quad (1.3)$$

### 1.1.4 Lineárny regulátor napätia

Lineárny regulátor/stabilizátor napätia, zabezpečuje konštantné výstupné napätie alebo prúd na výstupe zdroja. V závislosti na type použitého stabilizátora môže rozširovať výstup zdroja o regulovaný výstup napätia alebo prúdu, poprípade ochrany proti preťaženiu alebo skratu. Hlavným problémom týchto stabilizátorov je to, že všetku prebytočnú energiu, ktorá je dodávaná z usmerňovača a filtra, ostáva nevyužitá a je premenená na formu tepla, čo rapídne znižuje efektivitu týchto zdrojov. [3]



Obr. 1.2: Bloková schéma lineárneho zdroja

## 1.2 Spínané zdroje

Spínané zdroje sa rozdeľujú v závislosti na topológii ich zapojenia na izolované a neizolované.

### 1.2.1 Izolované zdroje

Všetky topológie izolovaných zdrojov obsahujú transformátor, ktorý zabezpečuje zmenu napätia ale zároveň poskytuje aj galvanické oddelenie. Zjednodušený model izolovaného zdroja sa skladá z nasledovných blokov obr. 1.3:

#### Usmerňovač

Usmerňovač plní v prípade spínaných zdrojov rovnakú funkciu ako pri použití v lineárnych zdrojoch napätia. Rozdiel v tomto prípade je, že sa usmerňuje priamo vstupné napätie zo siete. Používané sú hlavne mostíkové zapojenia, poprípade jednocestné usmernenie pri zdrojoch s veľmi malým výkonom.

#### Filter

Taktiež tu, filter plní rovnakú funkciu, len vyhladzuje usmernené sieťové napätie. Dôležité je tu okrem kapacity aj menovité napätie kondenzátora, keďže usmernením sieťového napätia 230 VAC dostávame 325 VDC. Preto sa odporúča použiť vhodné kondenzátory s menovitým napätím aspoň 400 V.

#### Spínač

Po usmernení je znova nutné priviesť na vstup vysokofrekvenčného transformátora striedavé napätie aby mohlo byť následne transformované. K tomuto účelu slúži výkonný spínač vo forme bipolárneho tranzistora alebo tranzistor typu FET. Frekvencia spínania sa môže pohybovať v rádoch niekoľkých desiatok kHz až po desiatky MHz. Túto frekvenciu určuje riadiaci obvod spínania.

#### Vysokofrekvenčný transformátor

Princíp fungovania je rovnaký ako v prípade lineárneho transformátora s rozdielom, že frekvencia budiaca primárne vinutie je mnohonásobne vyššia. Z toho dôvodu sa ako jadro používa ferit, pre zníženie strát vírivými prúdmi a hysteréznymi strát, ktoré vznikajú pri týchto frekvenciách.

## Výstupný usmerňovač

Princíp fungovania rovnaký ako v prípade lineárneho usmerňovača s rozdielom, kde je nutné použiť schottkyho diódy ktoré majú nižšiu spínaciu a vypínaciu dobu na-proti bežným usmerňovacím diódám a zvládajú tak usmerňovanie vyšších frekvencií. Z toho dôvodu je bežné použitie jednocestného alebo dvojcestného usmernenia.

## Výstupný filter

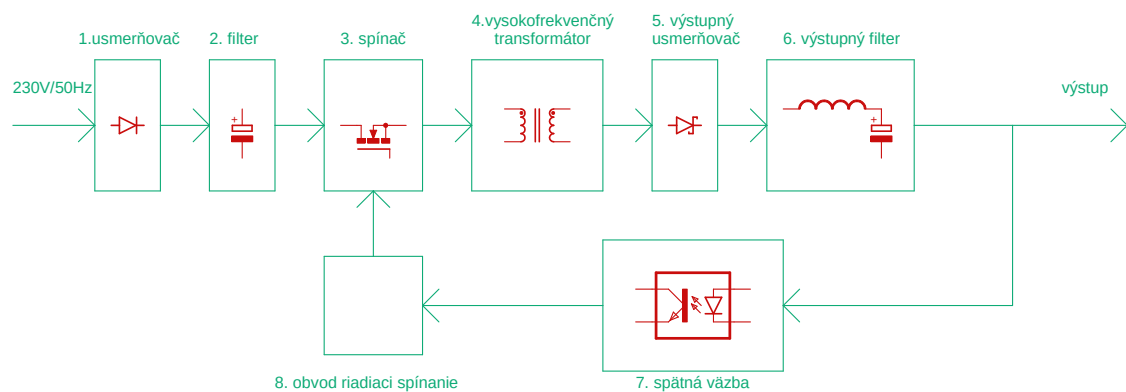
Filtračný kondenzátor tu rovnako plní tú istú funkciu ako v prípade lineárneho zdroja, avšak býva rozšírený ešte o LC filter s dolným priepustom, ktorý má za úlohu odfiltrovanie nežiadúcich vysokofrekvenčných zložiek napätia, ktoré môžu spôsobiť rušenie na pripojenej záťaži.

## Spätná väzba

Veľkosť prenášaného výkonu je úmerná dobe trvania impulzu budenia vysokofrekvenčného transformátora. Aby sa dosialo konštantné napätie na výstupe zdroja je do riadiaceho obvodu spínača za pomoci optočlena prenesená informácia o výstupnom napätí, avšak ostane zachované galvanické oddelenie.

## Obvod riadiaci spínač

Ten následne hodnotu spracuje a upraví dĺžku trvania impulzov. Toto konštantné monitorovanie výstupného napätia a prispôsobovanie prenášaného výkonu zaručuje vysokú účinnosť, keďže sa zbytočne neprenáša energia, ktorá by potom podobne ako v prípade lineárnych zdrojov ostala nevyužitá a premenená na formu tepla. [5]

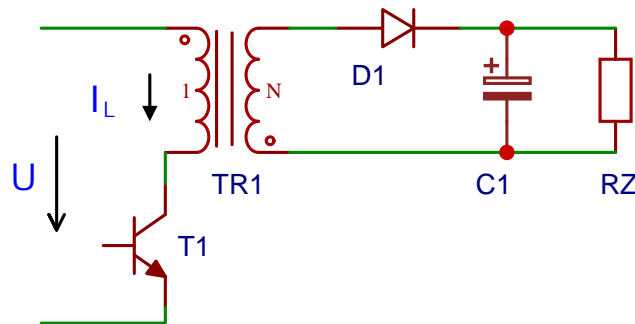


Obr. 1.3: Bloková schéma izolovaného spínaného zdroja

## 1.2.2 Topológie spínaných zdrojov

### Akumulačný menič (flyback)

Jedná sa o najjednoduchšie zapojenie spínaného izolovaného zdroja. Zopnutím tranzistora T1 začne prúd tiecť primárnym vinutím transformátora. Pri akumuláčnych zdrojoch sa energia prenáša v čase keď je spínací tranzistor v rozpojenom stave. Zmena prúdu vyvolá zmenu magnetického toku ktorý následne indukuje napätie na sekundárnom vinutí. Nakoľko má ale transformátor opačne polarizované sekundárne vinutie, dióda D1 je zapojená ako jednocestný usmerňovač no pre naindukované napätie je zapojená v závernom smere. Po rozpojení tranzistora sa napätie na vinutiach



Obr. 1.4: Zjednodušená schéma akumuláčného zdroja

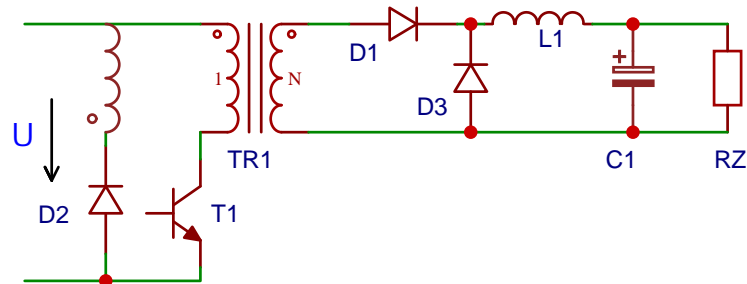
transformátora otáča. Dôvodom je demagnetizácia jadra transformátora ktoré bolo pri zopnutí tranzistora zmagnetizované. Pre opačné napätie je dióda D1 pripojená v priepustnom smere a po usmernení sekundárne vinutie nabíja kondenzátor a napája záťaž. Kondenzátor napája záťaž počas doby zmagnetizovania jadra pri zopnutom tranzistore. Na primárnom vinutí však vzniká napätová špička nakoľko sa vinutie snaží udržať prúd ktorý tiekol pred rozpojením. Táto vzniknutá napätová špička sa objaví medzi kolektorom a emitorom tranzistora a jej napätie môže byť niekoľko stoviek voltov. Aby sa teda predišlo zničeniu tranzistora je nutné paralelne s primárnym vinutím pripojiť demagnetizačný prvok. Môže sa jednať zväčša o zenerovú diódu pripojenú v závernom smere vzhľadom na polaritu vstupného napájania alebo kombináciou zenerovej diódy a demagnetizačného vinutia. Pre väčšie výkony sa do série pripája transil z dôvodu veľkých špičkových prúdov mimo rozsah samotnej zenerovej diódy. Použiteľné sú v rozsahu do 150W. [5]

### Priepustný menič (forward)

Zapojenie toho meniča sa podobá meničom flyback. Pracuje však na opačnom princípe ako menič flyback. Energia je prenášaná počas doby zopnutia tranzistora čo



dovoľuje použitie menšieho transformátora. Po zopnutí spínača, prúd pretekajúci primárnym vinutím transformátora naindukujú napätie na sekundárnom vinutí. Dióda D1 je pripojená v priepustnom smere a naindukované napätie napája cez cievku L1 záťaž a dobíja kondenzátor. Cievka L1 sa počas tejto doby správa ako spotrebič a prechádzajúcim prúdom sa naindukujú a energiu uloží vo forme magnetického poľa. Dióda D2 zabráňuje prechodu prúdu demagnetizačným vinutím. Po rozpojení



Obr. 1.5: Zjednodušená schéma priepustného zdroja

tranzistora sa zmení polarita na všetkých cievkach a vinutiach. Cievka L1 sa stane zdrojom a napája spolu s kondenzátorom záťaž a obvod uzatvára dióda D3. Dióda D1 pripojená v závernom smere k opačnému sekundárnemu napätiu. Vznikajúce špičky na primárno vinutí ohrozujú tranzistor a je nutné ich znova podobne ako pri flyback meniči odstrániť. V tomto prípade je použitý tranzistor s demagnetizačným vinutím. Jedná sa o efektívnejší spôsob ako vyriešiť napätové špičky. Výstupné napätie tohto vinutia musí byť však vyššie než je vstupné napätie zdroja aby bolo schopné prebytočnú energiu vrátiť v forme nabíjania vstupného kondenzátora. [5]

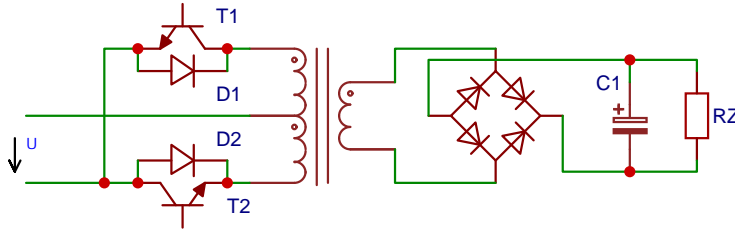
### 1.2.3 Dvojčinné zdroje

Jednočinné meniče poskytujú jednoduché zapojenia no sú použiteľné iba pre pomerne nízke výkony nakoľko jednosmerná magnetizácia jadra nevyužíva celú plochu jeho hysteréznej slučky.

#### Menič PUSH-PULL

Toto zapojenie využíva dvojicu symetrických primárnych vinutí k budeniu za pomoci dvojici spínacích tranzistorov. Tranzistory spínajú striedavo svoje náležité vinutia tak, že v čase zopnutia jedného tranzistora je druhý tranzistor vypnutý. Je nutné dodržať aby sa doby zopnutia tranzistorov neprekrývali, ináč dôjde vyskratovaniu napájania cez tranzistor a vinutie. Výstupné napätie je možné usmerniť dvojcestným usmerňovačom alebo usmerňovacím mostíkom. Spínacie tranzistory sú pri tomto

zapojení vystavené dvojnásobku vstupného napätia. Preto je nutné pri ich výbere túto požiadavku dodržať aby nedošlo k ich zničeniu. Táto topológia je vhodná pre väčšie výkony a je často používaná v PC zdrojoch ATX. [5]



Obr. 1.6: Zjednodušená schéma zdroja typu PUSH-PULL

### Topológie mostíkových zapojení

Využívané zapojenie polomostu (half-bridge) a plného mostu (full-bridge) nachádza použitie pri zdrojoch s väčším výstupným výkonom. Topológie na rozdiel od zapojenia PUSH-PULL nevyžadujú dvojité primárne vinutie avšak jedná sa ale o zložitejšie zapojenie.

Polomost rovnako ako PUSH-PULL využíva dvojicu tranzistorov na budenie primárneho vinutia. Druhú časť mosta predstavujú kondenzátory ktoré zaisťujú napájanie špičkových prúdov. Tie by ináč museli byť napájané zo vstupného napätia. Tranzistory sú spínané podobným spôsobom ako pri zdrojoch PUSH-PULL. Zdroje tejto topológie sa využívajú v rozsahu do 450W.

Zapojenie plného mosta využíva štyri spínacie tranzistory. Primárne vinutie je následne spínané vždy dvojicou tranzistorov. Tie striedavo pripájajú vinutie striedavo k vstupu. Prúd prechádzajúci vinutím tak dosahuje maximálne hodnoty pre oba smery a využíva sa tak celková plocha hysteréznej slučky. Jedná sa o najzložitejšie zapojenie budenia ale používa sa pre zdroje presahujúce výkony 500W. [5]

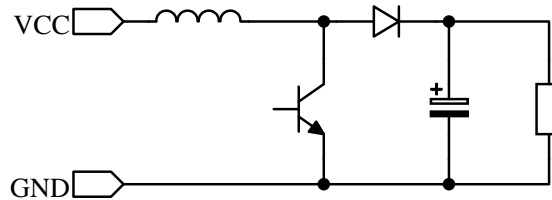
### 1.2.4 Neizolované zdroje

Táto topológia spínaných zdrojov sa bežne nazýva aj ako napätové meniče. Obsahujú spoločnú zem pre vstup a výstup a z hľadiska zmeny výstupného napätia ich rozdelujeme na 3 základné typy:

1. jednočinný blokovací menič (Step-up/Boost converter)
2. jednočinný priepustný menič (Step-down/Buck converter)
3. kombinované meniče (Buck-boost: invertujúce/SEPIC/Ćuk)

## Boost menič

Jedná sa o jeden zo základných typov, kde výstupné napätie je vyššie než vstupné. V momente zopnutia spínača tečie prúd len cez cievku, energia sa naakumuluje vo

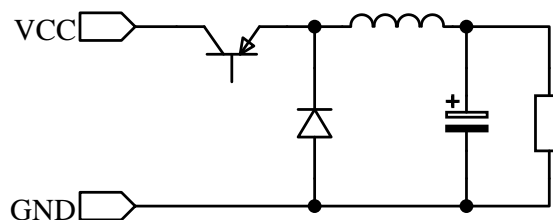


Obr. 1.7: Zjednodušená schéma boost meniča

forme magnetického poľa a záťaž je napájaná z výstupného kondenzátora. Vyskrotovaníu kondenzátora zabraňuje dióda zapojená v závernom smere. Po rozpojení spínača sa na cievke obráti polarita napätia a začne sa správať ako samostatný zdroj napätiam, ktorý je zapojený v sérii zo vstupným napätím. Vzniknuté spoločné zdroje dodávajú prúd do záťaže cez diódu a zároveň nabíjajú výstupný kondenzátor.

## Buck meniče

Ďalším základným typom je buck/step-down menič, ktorý vstupné napätie znižuje. Zopnutím spínača začne do záťaže cez cievku tiecť prúd ktorý zároveň nabíja kon-



Obr. 1.8: Zjednodušená schéma buck meniča

denzátor. Dióda je polarizovaná v závernom smere a preto ňou netečie žiaden prúd. V čase rozpojenia spínača, vzniknuté magnetické pole v okolí cievky, začne indukovať opačné napätie na cievke a tá sa začne chovať ako zdroj. Dióda pre tento vzniknutý zdroj je polarizovaná v priepustnom smere a tak uzatvára okruh. Nevýhodou toho meniča je, že v prípade skratu na výstupe môže dojsť k zničeniu spínača.

## Buck-boost meniče

Jedná sa o typ DC/DC meniča ktorého výstupné napätie je možné nastaviť takmer od 0 V až po niekoľkonásobok vstupného napätia. Dve základné topológie sú

nazývané buck-boost a to invertujúce topológie a kombinované buck a boost meniče.

Pri použití invertujúcej topológie je výstupné napätie obrátené oproti vstupu. Jeho topológia je podobná s boost a buck meničom. Hlavná nevýhoda použitia tohto zdroja je hlavne v tom, že nemá spoločnú zem s vstupným napätím čo komplikuje reguláciu za pomoci spätnej väzby.

Kombinované buck-boost meniče sa skladajú z kombinácie dvoch meničov so spoločnou cievkou pre buck aj boost režim a použitím spínačov (najčastejšie typu FET) namiesto diód. Je možné meniče zapojiť aj s viacerými induktormi a jediným spínačom napr. v SEPIC a Čuk topológii.

### **1.2.5 Porovnanie lineárnych a spínaných zdrojov**

Hlavná výhoda lineárnych zdrojov spočíva v ich jednoduchosti, nízkom výstupnom šume, nízkou hodnotou výstupného odporu a malým elektromagnetickým rušením. Avšak nízka efektivita a veľké rozmery ich v dnešnej dobe vytláčajú z bežnej elektroniky. Spínané zdroje sú naopak pre svoje malé rozmery a vysokú efektivitu používané takmer vo väčšine zdrojov. Ich hlavnou nevýhodou je rušenie ktoré spôsobujú spínacie prvky, vyšší výstupný šum ale aj nižšia životnosť, hlavne z dôvodu zaťažovania filtračných kondenzátorov. [3]

## 2 Návrh zdroja

V tejto časti sú popísané možné riešenia návrhu zdroja a porovnanie ich vlastností ktoré nakoniec viedli k výslednému konceptu. K overeniu funkčnosti zdrojovej časti bol spracovaný testovací prototyp. K návrhu schémy zapojenia a dosky plošných spojov bol použitý program EAGLE ver.9.5.1. Študentská licencia bola poskytnutá spoločnosťou AutoDesk po overení náležitých informácií. Navrhnutá schéma bola následne prekreslená v tomto programe a pomocou funkcie „switch to board“ bolo navrhnutá vhodné rozloženie komponentov na doske plošných spojov.

### 2.1 Zadanie

Cieľom práce je navrhnuť priemyslový zdroj s možnosťou regulácie ktorý bude možné umiestniť do montážnej krabice značky PHOENIX CONTACT typ BC-107.6 ktorú bude možné zdroj uchytiť na lištu DIN. Bude sa jednať o náhradu už existujúceho zdroja ktorý je však rozmerovo a výkonovo nevyhovujúci. Požadované výstupné parametre boli pre výstupné napätie 5 V, 12 V a 24 V. Výkon na jeden kanál bol definovaný približne na 20 W, čo dokopy predstavuje celkový výkon približne 120W. Priemerné vyťaženie zdroja sa predpokladá na úrovni 60W. Napájanie bude realizované zo jednej fáze siete 230 V/50 Hz.

### 2.2 Voľba zdroja

Vzhľadom na požiadavku výstupného výkonu 120W a malým rozmerom zdroja bol jasne zvolený spínaný zdroj. Použitie lineárneho zdroja z dôvodu ich veľkosti a hmotnosti nebolo možné. Následné znižovanie napätia pre 5 V a 12 V vetvy je taktiež riešené použitím buck meničov. Pre reguláciu napätia pre napájanie riadenia a komunikácie bude však použitý lineárny regulátor nakoľko ich konštrukcia je pre malé výkony menšia než spínané meniče.

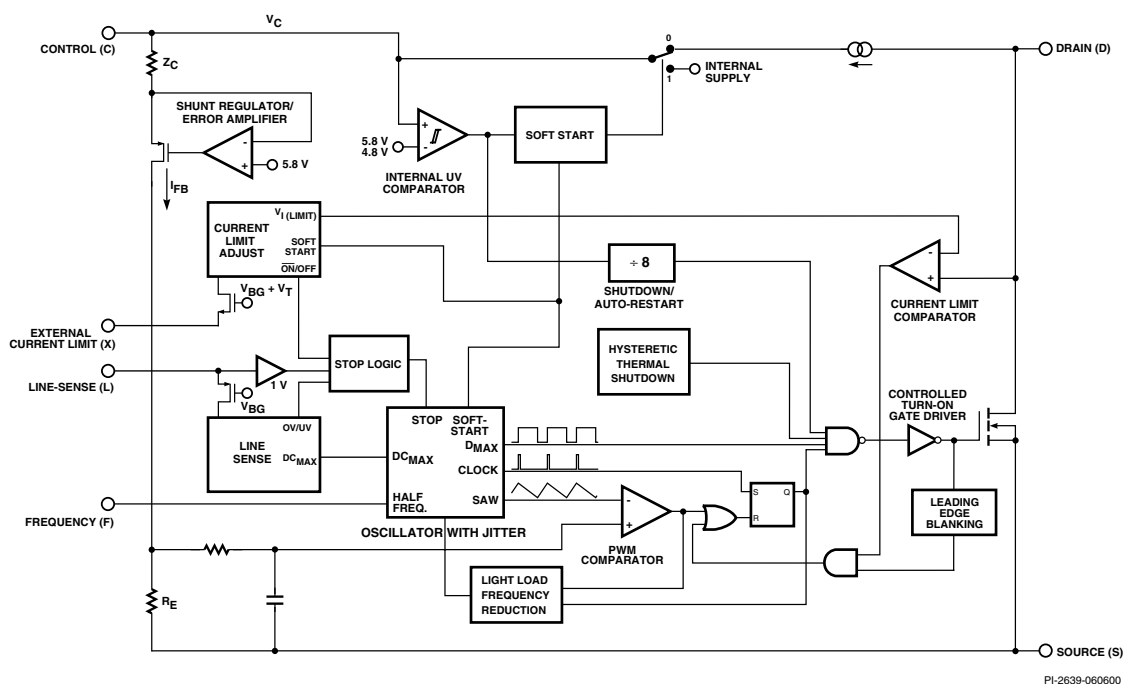
### 2.3 Popis napájacej časti zdroja

#### 2.3.1 TOPswitch-GX

Keďže požiadavka na vytvorenie pomerne silného zdroja v malom fyzickom prevedení, bol ako driver zvolený TOP247YN od spoločnosti PowerIntegrations. Jedná sa o tzv integrovaný off-line switcher, ten v jednom puzdre zahŕňa výkonný MOSFET ako aj jeho riadiacu časť s pripraveným vstupom pre spätnú väzbu. Toto riešenie vyžaduje minimum externých komponentov, a preto poskytuje vhodné riešenie pre

návrh konkrétneho zdroja. Maximálny spínaný výkon zdroja pre konkrétne zvolený model 247Y je 165W čo bezproblémovo spĺňa požiadavku navrhovaného zdroja. Z doplnkových funkcií TOP ponúka Line-sense funkciu s ochranou proti prepätiu a podpätiu vstupného napätia, prúdovým obmedzením a možnosťou nastavovania spínanej frekvencie zdroja. Použitý model 247Y v púzdre TO-220 obsahuje 6 vývodov s nasledujúcimi funkciami:

1. CONTROL (C) - vstupný pin pre spätnú väzbu,
2. LINE-SENSE (L) - vstupný pin pre ochranu proti predpätiám a podpätiám,
3. EXTERNAL CURRENT LIMIT (X) - vstupný pin pre prúdové obmedzenie externým rezistorom,
4. SOURCE (S) - výstupný source pin MOSFETu,
5. FREQUENCY (F) - vstupný pin pre definíciu spínanej frekvencie,
6. DRAIN (D) - výstupný pin drain-u MOSFETu.

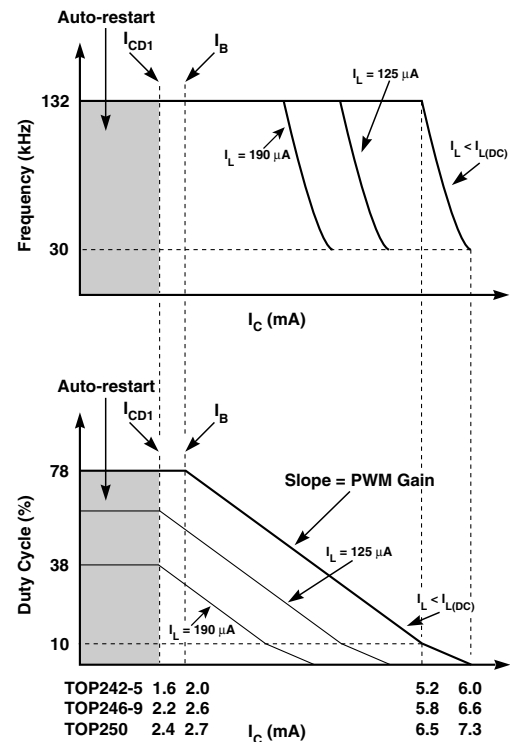


Obr. 2.1: Blokový diagram TOP2xxY/R/F

## Obvod TOP247

Je integrovaný čip spínaných napájacích zdrojov ktorý konvertuje prúd na vstupe CONTROL, na PWM signál riadiaci drain výstupného MOSFETU. Počas bežnej prevádzky sa pracovný cyklus znižuje lineárne so stúpajúcim vstupným CONTROL prúdom. Ako doplnok k trojici funkcií definovateľných cez vývody sú integrované funkcie automatického zapnutia pri detekovaní vstupného vysokého napätia, auto-reštart, prúdové obmedzenie „cycle-by-cycle“, odpojenie pri prehriatí. Množstvo týchto funkcií znižuje cenu navrhovaného systému a zvyšuje flexibilitu návrhu. Použitá vysokonapäťová CMOS technológia dovoľuje umiestnenie vysokonapäťového MOSFETu a nízkonapäťového riadenia do jedného monolitického čipu. Trojica terminálov FREQUENCY, LINE-SENSE a EXTERNAL CURRENT LIMIT je možné pripojiť na zem. V tomto režime napriek tomu TOP poskytuje funkcie ktoré nevyžadujú žiadne ďalšie externé komponenty:

1. Plne integrovaná funkcia soft-start limituje špičkové prúdy a napätia počas zapínania a výrazne ovplyvňuje alebo až eliminuje prekročenie nastaveného výstupného napätia.
2. Maximálna hodnota pracovného cyklu je 78 % čo umožňuje použitie menšieho vstupného filtračného kondenzátora.
3. Zníženie frekvencie pri spínaní malých záťaží znižuje straty spojené so spínaním pri zachovaní regulácie pri návrhoch zdroja s viacerými výstupmi.
4. Vyššia spínacia frekvencia 132 kHz znižuje potrebnú veľkosť transformátora bez výrazného dopadu na EMI.
5. Frekvenčný jitter znižuje EMI.
6. Hysterézia ochrany proti prehriatiu zaisťuje automatické obnovenie z neželaného teplotného stavu. Veľká hysterézia zabraňuje prehriatiu obvodu.



Obr. 2.2: Závislosť pracovného cyklu a frekvencie na vstupnom CONTROL prúde

7. Vývody púzdra sú podľa svojej funkcie a možnosti pripojeniu od seba dostatočne fyzicky oddelené.
8. Presnejšie celkové tolerancie a malé teplotné variácie frekvencie, prúdového obmedzenia a PWM zisku.

### 2.3.2 Návrh zdrojovej časti

Finálny návrh schémy zdrojovej časti vrátane funkčných hodnôt jednotlivých komponentov bol pre konkrétne požiadavky zdroja vypracovaný s odporučenými parametrami stanovenými výrobcom. Ako referenčné zapojenie poslúžilo vzorový návrh zdroja s TOP249 (250 W, 48 V). Hodnota vstupného filtračného kondenzátora je odporúčaná  $2\mu\text{F}$  na jeden watt výkonu zdroja. Odporúčaná  $220\mu\text{F}$  kondenzátor sa však zdal príliš veľký aj hodnotou ale hlavne rozmerovo. Testovaním skúšobnej zdrojovej časti sa však zistili mierne problémy s filtráciou a zakmitávaním pri kapacite  $68\mu\text{F}$  preto bola do finálneho návrhu zvýšená vstupná filtrácia na  $120\mu\text{F}$ . Vybratý transformátor má maximálne zaťaženie  $120,6\text{ W}$  čo vyhovuje navrhovaným parametrom zdroja. Ako ochrana drain-u MOSFETu pred poškodením spätného indukovaného prúdu vytváraným naindukovaným primárnym vinutím transformátora je použitý tzv. RCD snubber. Medzi jeho funkcie okrem obmedzenia napätových špičiek je aj zníženie produkovaného EMI. Transil obmedzuje maximálnu hodnotu naindukovaného napätia na  $200\text{ V}$ , avšak množstvo generovanej energie je nad výkonnostné možnosti samotného transilu. Preto kombinácia paralelne napojených výkonných rezistorov a kondenzátora zabezpečuje pohltie prebytočnej energie. Hodnoty boli volené na základe zapojenia zdroja s TOP249 (250 W, 48 V), tak aby počas bežnej prevádzky bola prebytková energia pohltená hlavne rezistormi a kondenzátorom a len minimálne transilom. Line-sense funkcia je implementovaná pripojením Line-sense pinu cez  $2\text{M}\Omega$  rezistor na usmernenú vstupnú vetvu. Ak napätie na vstupe presiahne  $450\text{ VDC}$  prestane spínať kým sa napätie nevráti k normálu a predídze tak poškodeniu zariadenia. Usmernenie a filtráciu sekundárneho výstupu zabezpečuje schottkyho dióda D5 a kondenzátory C7 a C8. Induktor L2 spolu C9, C15 a C34 tvoria jednoduchý LC filter s dolným priepustom kde filtruje výstupné napätie od vysokofrekvenčných zložiek napätia. Medzná hodnota LC filtra je  $560\text{ Hz}$ . Spätná väzba využíva na budenie optočlena jednoduché zapojenie využívajúce zenerov prieraz. Požadované napätie na výstupe je definované súčtom zenerového napätia na dióde D6 a napätím priepustného smeru použitého optočlena. Trimmer R5 poskytuje presné nastavenie výstupného napätia ako aj obmedzenie prúdu optočlenom.

[11]



## 2.4 Meniče napätia

Pre zmenu napätia pre 12 V 5 V vetvy sú použité DC/DC meniče typu buck. Model TPS54302 od TexasInstruments je buck konvertor s možnosťami vstupného napätia od 4,5 V až po 28 V, maximálnym výstupným prúdom 3 A a fixnou frekvenciou spínania 400 kHz. Poskytuje funkciu soft-startu, ochrany proti prehriatiu a preťaženiu spínacích MOSFETov. Poskytuje aj možnosť odpojenia záťaže cez enable pin, no v našom prípade je odpájanie záťaže riešené externým komponentom na výstupnej vetve.

Hodnota výstupného napätia je určená vzťahom 2.1, kde rezistory  $R_{fb1}$  a  $R_{fb2}$  predstavujú napäťový delič pripojený na výstup meniča. Odporúčaná počiatočná hodnota pre  $R_{fb1}$  je 100 k $\Omega$ . Hodnotu rezistora  $R_{fb2}$  volíme, kým nedosiahneme želané výstupné napätie. Menič obsahuje vnútorný referenčný zdroj o napätí  $0,596 \text{ V} \pm 2,5 \%$ .

$$V_{out} = V_{ref} \cdot \left[ \frac{R_{fb1}}{R_{fb2}} + 1 \right] \quad (2.1)$$

Ďalším dôležitým komponentom meniča je induktor. Jeho potrebné parametre je možno určiť zo vzťahov 2.2 pre minimálnu hodnotu indukcie.  $V_{OUT}$  predstavuje výstupné napätie meniča,  $V_{IN(MAX)}$  maximálne vstupné napätie meniča,  $K_{IND}$  je koeficient ktorý reprezentuje množstvo prúdového zvlnenia, ktoré spôsobuje induktor. Použitím kvalitnejších výstupných kondenzátorov s nižším vnútorným odporom je možné rátať s väčším  $K_{IND}$ . Pre použitie bežných kondenzátorov s vyšším ESR volíme hodnotu  $K_{IND} = 0,2$ .  $I_{OUT}$  predstavuje maximálny výstupný prúd a  $f_{sw}$  predstavuje frekvenciu spínania meniča.

$$L_{MIN} = \frac{V_{OUT} \cdot (V_{IN(MAX)} - V_{OUT})}{V_{IN(MAX)} \cdot K_{IND} \cdot I_{OUT} \cdot f_{sw}} \quad (2.2)$$

Minimálne hodnoty indukcie týchto induktorov vyšli 22  $\mu\text{H}$  pre 12 V menič a 16,5  $\mu\text{H}$  pre 5V menič. Zvolené boli preto hodnoty 27  $\mu\text{H}$  a 18  $\mu\text{H}$ . Taktiež je nutné spočítať maximálny a špičkový prúd pretekajúci induktorom. Tie sú dané vzťahmi 2.3 a 2.4 rešpektíve. Veľkosť maximálneho prúdu pretekajúceho induktorom bude 3,006 A pre oba meniče a špičkový prúd dosiahne 3,34 A. Vybraté cievky majú maximálny pretekajúci prúd 5 A.

$$I_{L(MAX)} = \sqrt{I_{OUT(MAX)}^2 + \frac{1}{12} \cdot \left( \frac{V_{OUT} \cdot (V_{IN(MAX)} - V_{OUT})}{V_{IN(MAX)} \cdot L_{OUT} \cdot 0,8 \cdot f_{sw}} \right)^2} \quad (2.3)$$

$$I_{L(PK)} = I_{OUT(MAX)} \cdot \frac{V_{OUT} \cdot (V_{IN(MAX)} - V_{OUT})}{V_{IN(MAX)} \cdot L_{OUT} \cdot 1,6 \cdot f_{sw}} \quad (2.4)$$

Pre napájanie riadenia a periférií bolo použité druhé sekundárne vinutie transformátora. Jeho výstupné napätie je 12V a napájanie riadenia vyžaduje vstupné

napájanie v 3,3 V až 5 V. Pre zníženie výstupného napätia po usmernení je použitý lineárny regulátor napätia BA3259HFP. Jedná sa o lineárny stabilizátor s dvoma výstupmi. Jeden výstup má fixných 3,3 V, druhý je možno vhodne voleným externým odporovým deličom meniť podľa potreby. Pre veľkosť výstupného napätia platí vzťah 2.5. Hodnota referenčného napätia je v tomto stabilizátore 0,8 V a hodnota referenčného prúdu 0,05  $\mu\text{A}$ . Podľa odporúčaní výrobcu má byť rezistor  $R_1$  volený v rozsahu 1 k $\Omega$  až 10 k $\Omega$ . Zvolená kombinácia rezistorov  $R_1 = 2,15 \text{ k}\Omega$  a  $R_2 = 11,5 \text{ k}\Omega$  nastaví výstupné napätie na 5,07 V. [10]

$$V_{\text{out}} = V_{\text{ref}} \cdot \left[ \frac{R_2}{R_1} + 1 \right] - R_2 \cdot I_{\text{ref}} \quad (2.5)$$

## 3 Riadenie a komunikácia

Základom celého riadenia a komunikácie je mikrokontrolér ATmega328p. Riadenie zabezpečujú programovateľné výkonné spínače značky Microchip a Texas Instruments. Pre externú komunikáciu je zvolený ethernet modul W5500 a modul pre sériovú komunikáciu MAX-485.

### 3.1 Mikrokontrolér

Atmel® ATmega328p je 8bitový CMOS mikrokontrolér s nízkym príkonom. Obsahuje 32kB flash pamäte, 1kB pamäte EEPROM, 2kB pamäte SRAM, 23 vstupno/výstupných portov, trojicu flexibilných časovačov/čítačov, SPI a I<sup>2</sup>C sériový port.

Napriek tomu, že obsahuje redukovanú inštrukčnú sadu (RISC) je optimalizovaný pre programovací jazyk C. [7]

### 3.2 Ovládacie prvky výstupných vetiev

Pre ovládanie výstupných vetiev pre 5 V sú použité MIC2019, programovateľné switche s prúdovým obmedzením. Jedná sa o tzv. high-side switch, kde je spínač (tranzistor/FET) pripojený medzi záťaž a zdroj. Odpojenie záťaže dosiahneme privedením signálu s hodnotou LOW (<1,5V) na enable pin. Zmenou hodnoty externého rezistora je možné meniť maximálny výstupný prúd v rozmedzí 0,2 A až 2 A. Hodnotu externého rezistora môžeme spočítať za pomoci:

$$R_{\text{SET}} = \frac{\text{CurrentLimitFactor}(CLF)}{I_{\text{LIMIT}}(A)} \quad (3.1)$$

Hodnoty CLF pre rôzne hodnoty prúdu je možné zistiť z dokumentácií výrobcu, čo uľahčilo výpočet potrebného odporu ktorý sa bude pohybovať od 125 Ω pre 2 A, až po 1125 Ω pre 0,2 A prúdové obmedzenie. [8] Maximálna hodnota vstupného napätia pre MIC2019 je 5,5 V, preto nebolo možné použiť tento switch pre 12 V a 24 V vetvu. Taktiež bolo nutné použiť pre každú 5 V vetvu samostatný switch. Ako riešenie pre 12 V a 24 V vetvy boli zvolené dvojkanálové programovateľné switche TPS2H000-Q1. Aj v tomto prípade sa jedná o high-side switch s prúdovým obmedzením, avšak s maximálnym vstupným napätím až 40 V. Pre prúdové obmedzenie je hodnota externého rezistora daná vzťahom 3.2, kde  $V_{\text{CL(th)}}$  a  $K_{\text{(CL)}}$  sú konštanty o hodnote 0,8 V a 300. Výsledná hodnota externého rezistora bude teda, pre prúdové obmedzenie v rozmedzí 0,1 A a 1,5 A, 2400 Ω až 160 Ω. [9]

$$R_{\text{(CL)}} = \frac{V_{\text{CL(th)}} \cdot K_{\text{(CL)}}}{I_{\text{OUT}}} \quad (3.2)$$

Vstupy na tieto externé rezistory sú pripojené na digitálne reostaty MCP4632. Jedná sa o duálne reostaty zo 7bitovým (129 krokovým) nastavovaním výsledného odporu. Komunikáciu s mikrokontrolérom zabezpečuje I<sup>2</sup>C sériová komunikácia. Možnosti hodnôt reostatu sú 5,10,50 a 100 k $\Omega$ . Pre naše zapojenie použijeme najnižšiu 5 k $\Omega$  verziu, ktorá nám poskytne kroky o 38  $\Omega$ . V prípade, že precíznosť nastavenie bude nevyhovujúca budú reostaty nahradené lepšími z rovnakej série, ktoré však poskytujú väčšiu presnosť. Jedná sa o reostaty s volatílnou pamäťou čo znamená, že pod odpojením napájania reostat zabudne nastavené hodnotu a zvolí defaultné nastavenie ktoré nastaví na všetkých reostatoch 50% hodnotu maximálneho odporu.

## 3.3 Komunikácia

### 3.3.1 Modul W5500

Sieťový Ethernet modul W5500 je prídavný komunikačný obvod ktorý poskytuje jednoduché internetové pripojenie pre vstavané systémy. Podporuje TCP/IP protokoly: TCP, UDP, IPv4, ICMP, ARP, a PPPoE. Modul obsahuje 32 kB interný pamäťový buffer pre spracovanie ethernetových paketov. SPI umožňuje jednoduchú integráciu s externými MCU. SPI komunikácia modulu W5500 podporuje 80 MHz rýchlosti a nové efektívnejšie SPI protokoly pre vysokorýchlostnú komunikáciu. Pre zníženie spotreby energie modul podporuje WOL (Wake on LAN) a power down módy. SPI komunikácia s externým MCU vyžaduje 4 signály (SCSn, SCLK, MOSI, MISO) a pracuje ako podriadené zariadenie SPI. Modul je kompatibilný s 3,3 V aj 5 V logikou, napájanie je však vyžadované 3,3 V. Výstupný konektor RJ45 je pripojený k modulu cez oddeľovací transformátor z dôvodu ochrany modulu. [12]

### 3.3.2 RS-485

Pre komunikáciu použitím štandardu RS-485 bude použitý nízkopríkonový modul MAX-485. RS-485 je štandard sériovej komunikácie používaný hlavne v priemyslovom prostredí. Umožňuje napojiť až 32 zariadení a komunikáciu na vzdialenosť až 1200 m. Navrhnutá dvojvodičová verzia umožňuje komunikáciu iba v poloduplexnom režime tj. je možné dáta len prijímať alebo odosielať, nie súčasne. Modul MAX-485 podporuje komunikáciu v poloduplexnom režime a to do rýchlosti 2,5 Mbps. Enable pin umožňuje prepnúť modul v čase nečinnosti do stavu z nízkou spotrebou energie. Problémom štandardu RS-485 je fakt, že preň neexistujú štandardizované typy konektorov. Preto boli ako konektory použité obyčajné svorkovnice do dosky plošných spojov. [13]

## 4 Výsledky práce

Výsledkom semestrálnej práce je kompletný návrh schéme a dosky plošných spojov zapojenia zdroja, jeho riadiacej časti a meničov. Výsledok semestrálnej časti bolo zostavenie jeho zdrojovej časti ktorá slúžila predovšetkým na overenie funkčnosti návrhu. Pre meranie výstupných charakteristík bol použitý osciloskop Agilent DSO6012 pre meranie zvlnenia výstupného napätia, dvojica multimetrov Agilent 34401A pre meranie výstupného napätia a Agilent 34405A pre meranie výstupného prúdu. Pre zataženie zdroja bola využitá sada rezistorov ako nízka záťaž a výkonný rezistor s premenlivou hodnotou ako výkonná záťaž. Graf zatažovacej charakteristiky sa nachádza v prílohe. Vytvorené navrhnuté rozloženie trás a komponentov pre dosky plošných spojov pre PHOENIX CONTACT typ BC-107.6 vrátane výsledných schém zapojenia, vytvorené v programe EAGLE, sa nachádzajú v pripojenej prílohe technickej správy a na priloženom CD.

### 4.1 3D model zdroja

Ako jeden z výstupov práce je aj 3D model zdroja vytvorený v programe FUSION360. Použili sme ho na overenie že sa celý návrh a rozloženie komponentov vojdú do navrhovanej krabičky. Tak sa ukázalo že niektoré komponenty museli byť použité s nižšou výškou a taktiež šírka dosiek s meničmi a riadením museli byť pozmenené. Ukážka 3D modelu sa nachádza v prílohe tohto dokumentu a vyexportovaný súbor je súčasťou priloženého CD.

### 4.2 Zdrojový kód

Súčasťou prílohy na priloženom CD je aj súbor so zdrojovým kódom pre WEB-server na ovládanie výstupov. Jeho rozpis a okomentované časti je možné nájsť v technickej správe v časti "Riadiaca časť s mikrokontrolérom".



## Záver

Cielom bakalárskej práce bolo zoznámenie sa s napájacími zdrojmi, ich vlastnosťami a spôsobom ich fungovania. Práca bola zameraná hlavne na spínané zdroje, ich použitie a návrh. Hlavným cieľom práce bolo navrhnutie zdroja s možnosťou riadenia a komunikácie cez ethernet. Navrhnutý zdroj používa ako driver primárnej časti integrovaný off-line switcher TOP247Y ktorý obsahuje spínací MOSFET aj jeho riadenie vrátane vstupu zo spätnej väzby. Všetko je obsiahnuté v jednom puzdre TO-220. Problémom návrhu bola veľkosť zdroja. Pre jeho malé rozmery pomerne veľký výkon a množstvo funkcií bolo nutné vybrať komponenty ktoré spĺňajú požadované výkonnostné požiadavky ale zároveň zaberajú minimum miesta. Vybratý driver vyžadoval minimum externých súčiastok pre správne fungovanie, a preto bol jasnou voľbou pre naše riešenie. Zdrojová časť bola oživená na skúšobnej doske plošných spojov. Boli overené výstupné parametre a zameraná zatažovacia charakteristika a taktiež výstupné zvlnenie zdroja. Niektoré namerané výstupné parametre odpovedali predpokladaným hodnotám z návrhu. Zo zatažovacej charakteristiky môžeme usúdiť, že v plánovanom výkonnostnom použití je zdroj dostatočne tvrdý. Rozdiel napätia naprázdno a plne zataženého zdroja bol 0,357 V.

Problémom bolo skôr výstupné zvlnenie napätia, ktoré sa pohybovalo v stovkách mV s prudkým nárastom pri 85% vyťaženia zdroja. Spôsobilo to nevhodne navrhnutý výstupný filter na testovacom zdroji. Vo finálnom zapojení bol výstupný LC filter upravený a výstupné rušenie sa mnohonásobne znížilo. Ďalším problémom sa ukázal filtračný kondenzátor na výstupe usmerňovača sieťového napätia. Jeho odporúčaná hodnota by mala byť 220  $\mu$ F čo predstavuje problém z hľadiska jeho veľkosti. Hodnota kondenzátora 68  $\mu$ F sa v testovacom zdroji ukázala ako nedostačujúca a tak bola bo finálneho návrhu pozmenená na 120  $\mu$ F.

Pôvodne navrhnutá doska bola prerobená z jedno-doskového riešenia na celkovo 3 samostatné moduly. To umožnilo efektívnejšie využitie priestora v krabíčke a zároveň otvorilo možnosť k zdroju do budúcnosti navrhnúť rôzne typy formy riadenia alebo typy meničov, poprípade zmenu funkcie výstupov (prúdové obmedzenie, monitorovanie spotreby).





# Literatúra

- [1] LIEFTING, Alan. ATX SMPS. In: Wikipedia [online]. [cit. 2019-12-01]. Dostupné z URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ATX\\_power\\_supply\\_interior.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ATX_power_supply_interior.jpg).
- [2] STANĚK, Pavel. Návrh lineárního napájecího zdroje s předregulací [online]. Praha, 2015 [cit. 2019-11-30]. Dostupné z www: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/61874>. Bakalářská práce. ČVUT v Praze.
- [3] KREJČIŘÍK, Alexandr. Napájecí zdroje I. Praha: BEN – technická literatura, 1996. ISBN 80-860-5602-3
- [4] FAKTOR, Zdeněk. Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje. Praha: BEN – technická literatura, 2002. ISBN 80-860-5691-0.
- [5] KREJČIŘÍK, Alexandr. DC/DC měniče. Praha: BEN, 2001. ISBN 80-730-0045-8.
- [6] KREJČIŘÍK, Alexandr. Spínané napájecí zdroje s obvody TOPSwitch. Praha: BEN – technická literatura, 2002. ISBN 80-730-0031-8.
- [7] ATMEL ATmega328p [online]. 2015 [cit. 2019-12-11]. Dostupné z: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328p>.
- [8] MIC2019 [online]. 2011 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/MIC2019>.
- [9] TPS2H000-Q1: Texas Instruments [online]. 2015 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/TPS2H000-Q1>.
- [10] TPS5430 [online]. [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/TPS54302>.
- [11] TOPSwitch-GX [online]. 2016 [cit. 2019-12-16]. Dostupné z: <https://ac-dc.power.com/products/product-archive/topswitch-gx/>.
- [12] WIZnet Ethernet module W5500 [online]. 2016 [cit. 2019-12-16]. Dostupné z: <https://www.wiznet.io/product-item/w5500/>.
- [13] MAX-485 Transceiver [online]. [cit. 2019-12-16]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/products/interface/transceivers/MAX485.html>.



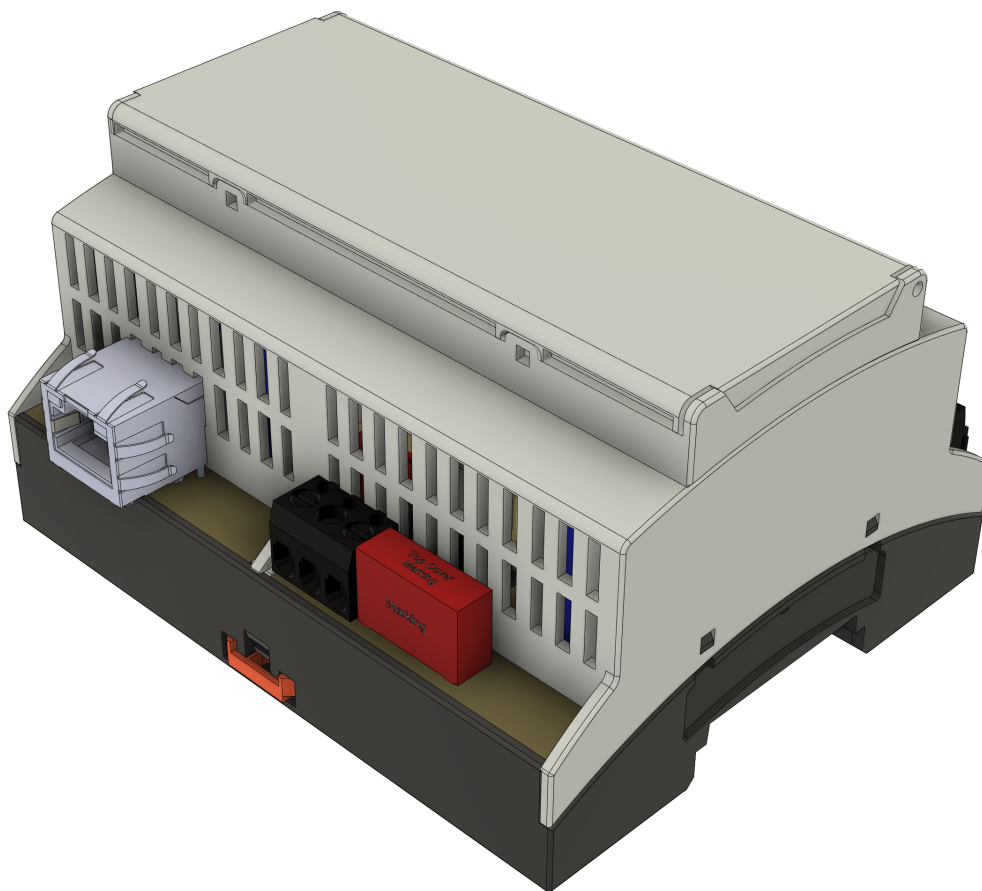
# Zoznam príloh

|   |  |    |
|---|--|----|
| A | Technická správa                       | 43 |
| B | Fotografie zostavenej testovacej časti | 65 |
| C | Ukážka 3D modelu                       | 67 |
| D | Graf zaťažovacej charakteristiky       | 69 |
| E | Obsah priloženého CD                   | 71 |



# **A Technická správa**

Priemyselny napájaci zdroj s ovládaním výstupov  
Referenčný manuál



Dávid Čunderlík, 195 295

Apríl 2020

# Obsah

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Úvod</b>   | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Špecifikácie</b>                                   | <b>4</b>  |
| 2.1      | Mechanické špecifikácie . . . . .                     | 4         |
| 2.2      | Zapojenie . . . . .                                   | 5         |
| 2.3      | Výstupné parametre . . . . .                          | 5         |
| <b>3</b> | <b>Zdrojová časť</b>                                  | <b>6</b>  |
| 3.1      | Popis obvodu . . . . .                                | 6         |
| 3.1.1    | Vstup . . . . .                                       | 6         |
| 3.1.2    | Štart . . . . .                                       | 6         |
| 3.1.3    | Integrovaný MOSFET a PWM ovládač . . . . .            | 6         |
| 3.1.4    | RCD snubber . . . . .                                 | 6         |
| 3.1.5    | Výstup . . . . .                                      | 6         |
| 3.1.6    | Spätná väzba . . . . .                                | 7         |
| 3.1.7    | Prepät'ová a podpäťová ochrana . . . . .              | 7         |
| 3.2      | Schéma zapojenia . . . . .                            | 8         |
| 3.3      | Rozloženie komponentov na PCB . . . . .               | 9         |
| 3.3.1    | Horná vrstva . . . . .                                | 9         |
| 3.3.2    | Spodná vrstva . . . . .                               | 9         |
| 3.4      | Zoznam komponentov . . . . .                          | 10        |
| <b>4</b> | <b>Riadiaca časť s mikrokontrolérom</b>               | <b>11</b> |
| 4.1      | Popis obvodu . . . . .                                | 11        |
| 4.1.1    | Ukážka zdrojového kódu pre Web-server . . . . .       | 11        |
| 4.2      | Schéma zapojenia . . . . .                            | 15        |
| 4.3      | Rozloženie komponentov na PCB . . . . .               | 16        |
| 4.3.1    | Horná vrstva . . . . .                                | 16        |
| 4.3.2    | Spodná vrstva . . . . .                               | 16        |
| 4.4      | Zoznam komponentov . . . . .                          | 16        |
| <b>5</b> | <b>Časť s meničmi</b>                                 | <b>17</b> |
| 5.1      | Popis obvodu . . . . .                                | 17        |
| 5.1.1    | Komunikácia s reostatmi a spínanie výstupov . . . . . | 17        |
| 5.1.2    | Prúdové obmedzenie . . . . .                          | 17        |
| 5.2      | Schéma zapojenia . . . . .                            | 19        |
| 5.3      | Rozloženie komponentov na PCB . . . . .               | 20        |
| 5.3.1    | Horná vrstva . . . . .                                | 20        |
| 5.3.2    | Spodná vrstva . . . . .                               | 20        |
| 5.4      | Zoznam komponentov . . . . .                          | 20        |

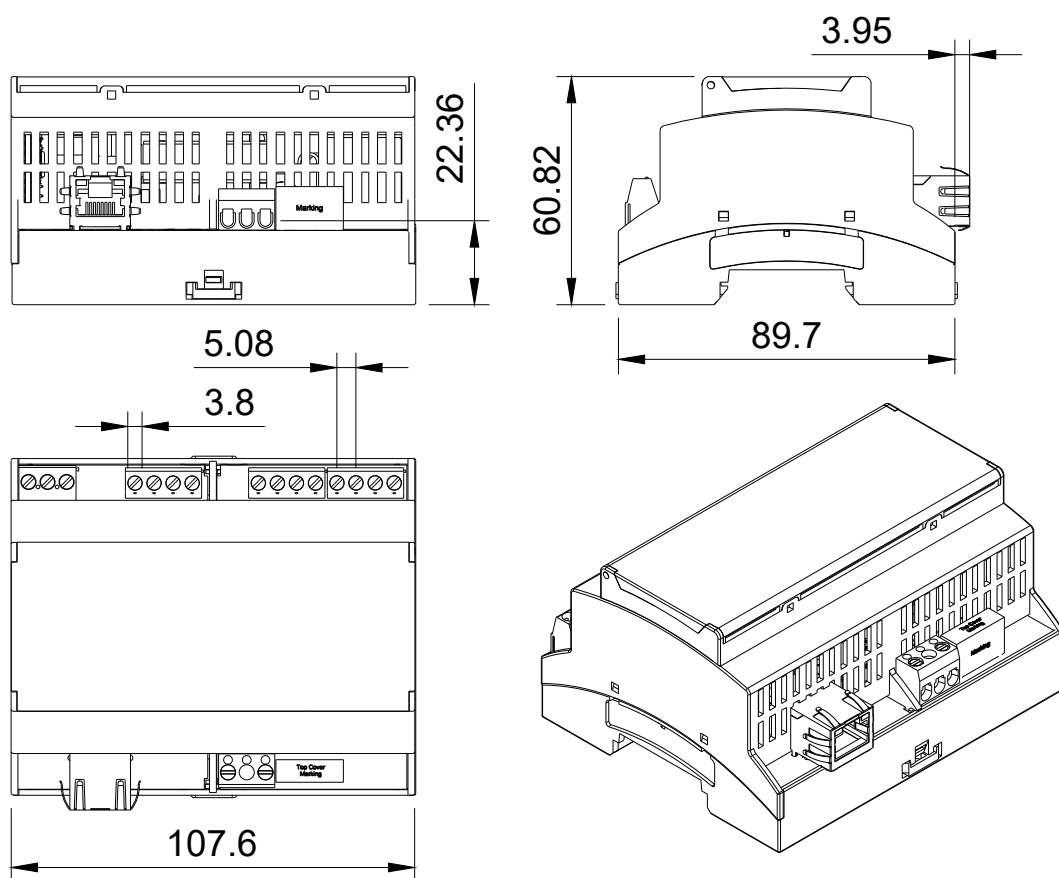
# 1 Úvod

Tento dokument je technickou správou pre priemyselný napájací zdroj s ovládaním výstupov, navrhnutom s obvodom TOP247Y. Cieľová aplikácia zdroja je primárne určená pre univerzálne napájanie zariadení v priemyselnom odvetví, avšak modulárnosť zdroja umožňuje použitie rôznych výstupných napätí a rôznych foriem riadenia. Preto existuje predpoklad, že je zdroj možné použiť aj inteligentných domácnostiach a IoT ako zdroj pre periférie. Zdroj sa skladá z 3 samostatných častí, ktorých návrh a princíp fungovania je popísaný ďalej v tomto dokumente. Zdrojová časť obsahuje obvod TOP, vstupnú a výstupnú filtráciu a svorky, vnútorné konektory pre dosku s riadením a pre dosku s meničmi, konektor RJ45 a komunikačný modul MAX485. Riadiaca časť obsahuje mikrokontrolér, ethernetový modul W5500 a vnútorný konektor pre dosku s meničmi. Na samostatnej doske s meničmi sa okrem meničov nachádza aj ovládanie výstupov.



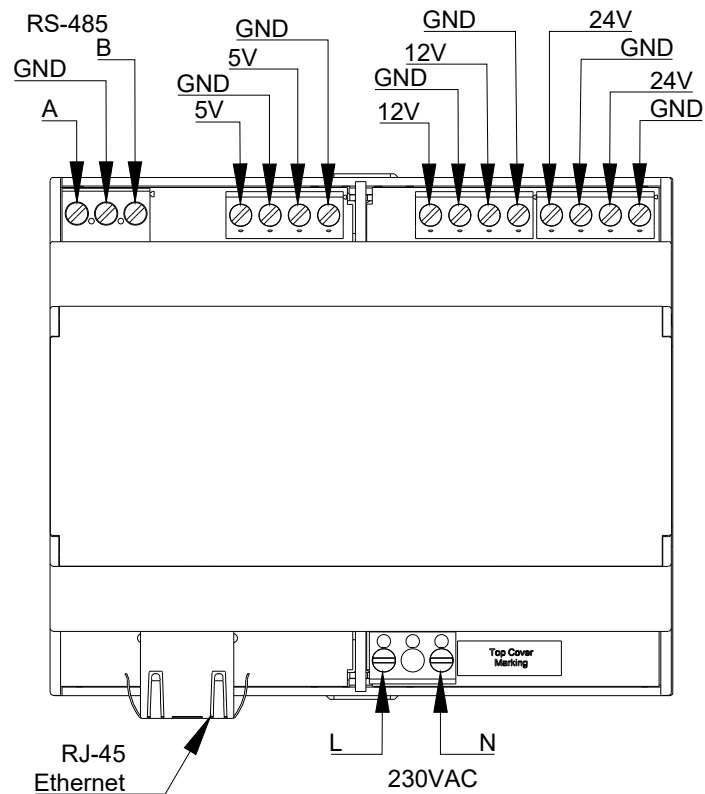
## 2 Špecifikácie

### 2.1 Mechanické špecifikácie



(mm)

## 2.2 Zapojenie



## 2.3 Výstupné parametre

|                                  |                         |          |   |
|----------------------------------|-------------------------|----------|---|
| <b>VSTUP</b>                     |                         | Poznámky |   |
| Vstupné napätie                  | 85 - 265 VAC            |          |   |
| Frekvencia                       | 47 - 63 Hz              |          |   |
| <b>VÝSTUP</b>                    |                         |          |   |
| Maximálny celkový výkon          | 120,6 W                 |          |   |
| Výstupné napätie zdrojovej časti | 24 V                    |          |   |
| Výstupný prúd zdrojovej časti    | 5 A                     |          |   |
| Zvlnenie a šum                   | <200 mV                 |          |   |
| <b>PARAMETRE VÝSTUPOV</b>        |                         |          |   |
| 1.                               | Výstupné napätie        | 2x 5 V   | Celkový odoberaný prúd zo zdrojovej časti nesmie presiahnuť 5 A |
|                                  | Maximálny výstupný prúd | 3 A      |   |
| 2.                               | Výstupné napätie        | 2x 12 V  |   |
|                                  | Maximálny výstupný prúd | 3 A      |   |
| 3.                               | Výstupné napätie        | 2x 24 V  |   |
|                                  | Maximálny výstupný prúd | 5 A      |   |
| <b>VŠEOBECNÉ</b>                 |                         |          |   |
| Efektívnosť                      | >80 %                   |          |   |
| Prevádzková teplota              | -10 do 75 °C            |          |   |
| Maximálna spínacia frekvencia    | 136 kHz                 |          |   |
| Rozmery                          | 60,8 x 89,7 x 107,6     | (mm)     |   |

## 3 Zdrojová časť

### 3.1 Popis obvodu

#### 3.1.1 Vstup

Vstupné napätie 230 VAC prechádza cez poistku F1, ktorý slúži ako nadprúdová ochrana. Termistor NTC znižuje maximálny špičkový prúd aby sa zabránilo prepáleniu poistky pri zapnutí zdroja z dôvodu nabíjania vstupného filtračného kondenzátora. Ten spolu s usmerňovačom U2 dodávajú zdroju usmernené napätie (120 - 374 VDC)

#### 3.1.2 Štart

Usmernené vstupné napätie je privedené na DRAIN pin, MOSFET je počas toho zapínacieho cyklu vo "vypnutom" stave a interný kondenzátor pinu CONTROL sa začne nabíjať cez vnútorný napäťový a prúdový zdroj napojeným medzi pinom DRAIN a CONTROL. Keď napätie pinu CONTROL dosiahne približne hodnotu 5,8 V je aktivovaný vnútorný riadiaci obvod a začína mäkký štart. Ten po dobu približne 10 ms zvyšuje pracovný cyklus MOSFETu lineárne z 0% až po 78% a následne počas ďalších 10 ms z 80% na maximum znova lineárne.

#### 3.1.3 Integrovaný MOSFET a PWM ovládač

Modulátor PWM implementuje napäťový mód pri riadení MOSFETu s pracovným cyklom inverzne úmerným ku vstupnému CONTROL prúdu, ktorý presahuje interný prúdový zdroj čipu. Tento signál je filtrovaný RC filtrom s medznou frekvenciou 7 kHz aby sa znížil účinok spínaného šumu spôsobeného gatom MOSFETu.

#### 3.1.4 RCD snubber

Ochrana drain-u MOSFETu pred poškodením spätného indukovaného prúdu vytváraným naindukovaným primárnym vinutím transformátora a zníženie produkovaného EMI je použitý tzv. RCD snubber tvorený D1, R1, R2, CY1 a D2. Transil obmedzuje maximálnu hodnotu naindukovaného napätia na 200 V. Kombinácia paralelne napojených výkonných rezistorov a kondenzátora zabezpečuje pohltenie prebytočnej energie.

#### 3.1.5 Výstup

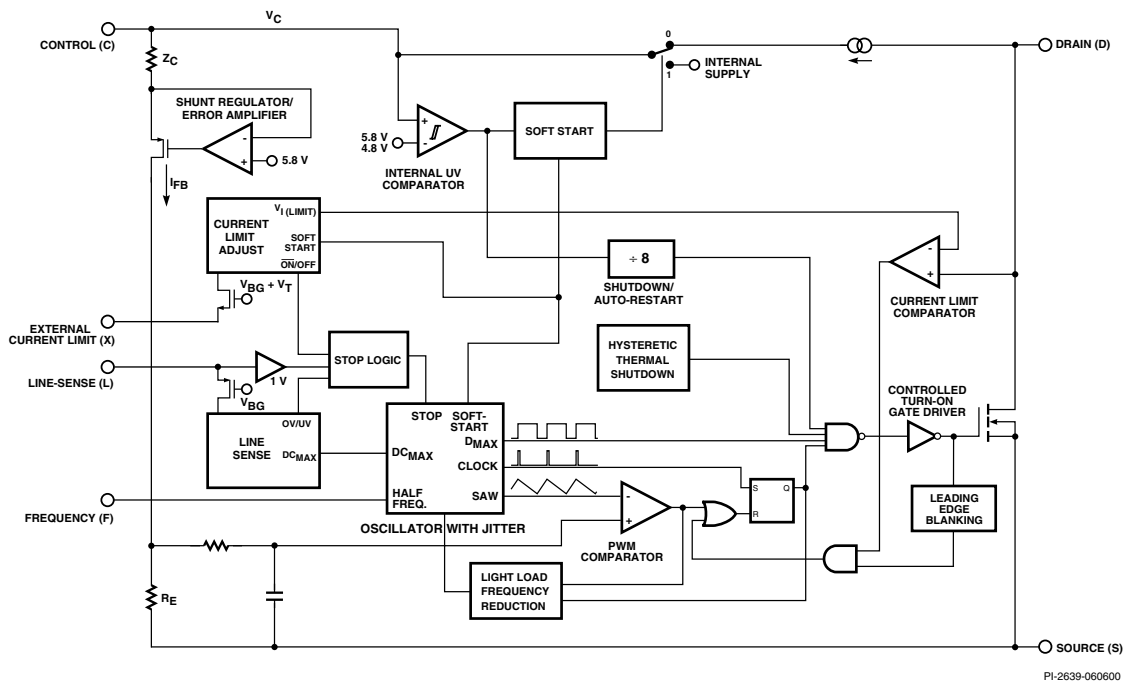
Výstup transformátora tvorí 24 V výkonné a 12 V pomocné vinutie. 24 V vetva je usmernená dvojitou schottkyho diódou D5. Kondenzátor C7 poskytuje prvotnú filtráciu a filtráciu pre spätnú väzbu. Následný LC filter (L2, C9, C15, C34) redukuje výstupný šum a zvlnenie. Kondenzátory C9, C15 a C34 sú použité s čo najnižšou hodnotou ESR pre minimalizovanie zvlnenia výstupného napätia.

### 3.1.6 Spätná väzba

Napájanie optočlena pre spätnú väzbu je zaistené jednoduchou zenerovou diódou využívajúcu Zenerov prieraz. Obmedzenie prúdu tečúceho do optočlena a zároveň jemné doladenie výstupného napätia umožňuje trimer R5.

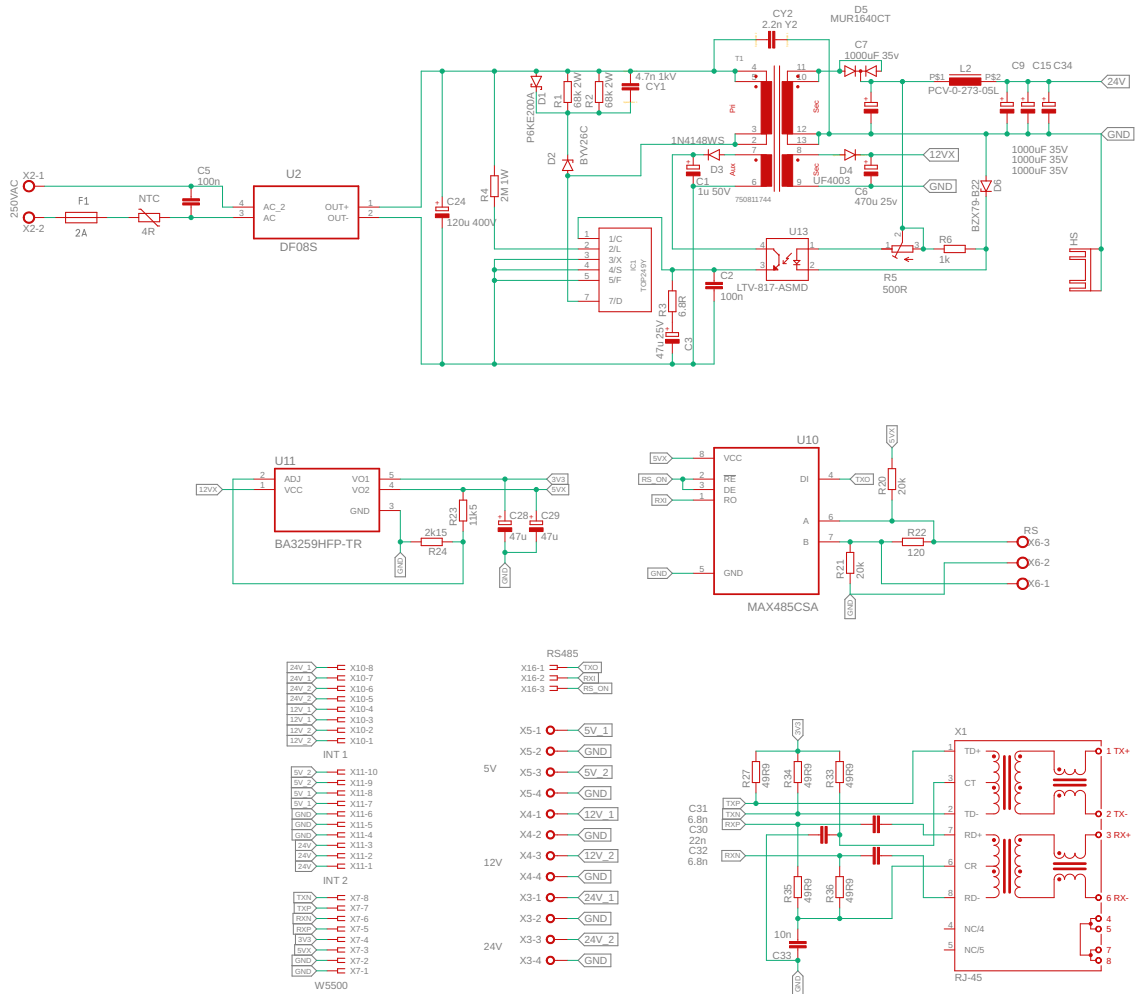
### 3.1.7 Prepäťová a podpäťová ochrana

LINE-SENSE pin poskytuje monitorovanie usmerneného vstupného napätia a v prípade, že toto napätie presiahne 450 VDC alebo spadne pod 100 VDC, dôjde k vypnutiu zdroja až kým sa napätie znova nestabilizuje.



Obr. 1: Blokový diagram TOP2xxY/R/F

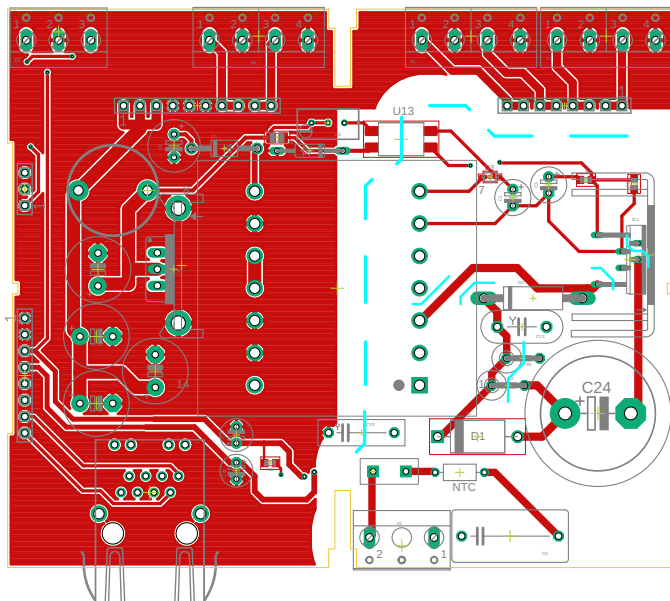
### 3.2 Schéma zapojenia



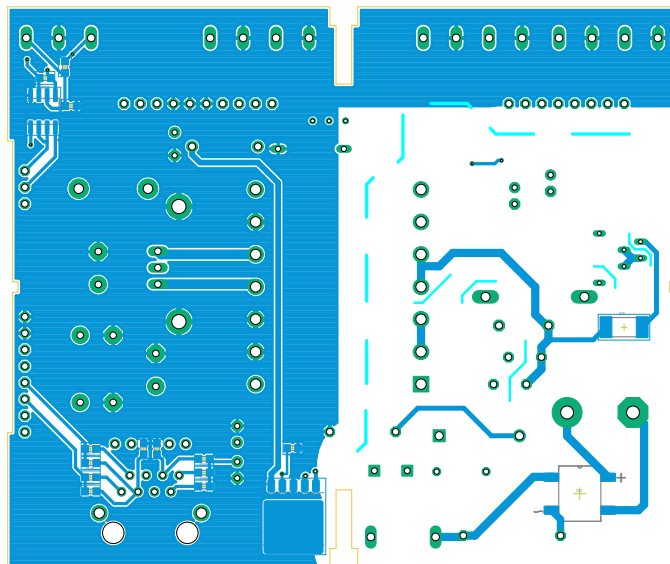
Obr. 2: Schéma zdrojovej časti vrátane vnútorných prechodov do dosiek s riadením a meničmi

### 3.3 Rozloženie komponentov na PCB

#### 3.3.1 Horná vrstva



#### 3.3.2 Spodná vrstva



### 3.4 Zoznam komponentov

| Č. | Značenie                | Hodnota          | Mouser číslo dielu   | Počet |
|----|-------------------------|------------------|----------------------|-------|
| 1  | C1                      | 1 $\mu$ F/50v    | 667-ECA-1HM2R2I      | 1     |
| 2  | C2                      | 100nF            |                      | 1     |
| 3  | C3, C28, C29            | 47 $\mu$ F/25V   | 647-UVR1E470MDD1TD   | 3     |
| 4  | C5                      | 100nF            | 80-R49AI31005101K    | 1     |
| 5  | C6                      | 470 $\mu$ F/25V  | 710-860010474013     | 1     |
| 6  | C7, C9, C15, C34        | 1000 $\mu$ F/35V | EKYB350ELL102MJ30S   | 4     |
| 7  | C24                     | 120 $\mu$ F/400V | 871-B43630A9127M000  | 1     |
| 8  | C30                     | 22nF             |                      | 1     |
| 9  | C31, C32                | 6.8nF            |                      | 2     |
| 10 | C33                     | 10nF             |                      | 1     |
| 11 | CY1                     | 4.7nF/1kV        | 810-CK45-E3AD472ZYGX | 1     |
| 12 | CY2                     | 2.2nF/1kV        | 80-PHE850EA4220MA01R | 1     |
| 13 | D1                      | P6KE200A         | 621-P6KE200A-T       | 1     |
| 14 | D2                      | BYV26C           | 625-SBYV26C-E3       | 1     |
| 15 | D3                      | 1N4148WS         | 78-LS4148-GS18       | 1     |
| 16 | D4                      | UF4003           | 512-UF4003           | 1     |
| 17 | D5                      | MUR1640CT        | 863-MUR1640CTG       | 1     |
| 18 | D6                      | BZX79-B22        | 78-TZX22A            | 1     |
| 19 | F1                      | 2A               | 504-SS-5H-2A-BKH     | 1     |
| 20 | NTC                     | 4R               | 954-4D2-11LD         | 1     |
| 21 | IC1                     | TOP249Y          | 869-TOP249YN         | 1     |
| 22 | L2                      | 27 $\mu$ H       | 994-PCV-0-273-05L    | 1     |
| 23 | R1, R2                  | 68k 2W           | 594-5083NW68K00J     | 2     |
| 24 | R3                      | 6.8R             |                      | 1     |
| 25 | R4                      | 2M 1W            | 660-RK73B3ATTE205J   | 1     |
| 26 | R5                      | 500R             | 81-PV36W501C01B00    | 1     |
| 27 | R6                      | 1k               |                      | 1     |
| 28 | R20, R21                | 20k              |                      | 1     |
| 29 | R22                     | 120              |                      | 1     |
| 30 | R23                     | 11k5             |                      | 1     |
| 31 | R24                     | 2k15             |                      | 1     |
| 32 | R27, R33, R34, R35, R36 | 49R9             |                      | 5     |
| 33 | T1                      | 750811744        | 710-750811744        | 1     |
| 34 | U2                      | DF08S            | 512-DF08S            | 1     |
| 35 | U10                     | MAX485CSA        | 700-MAX485CSA        | 1     |
| 36 | U11                     | BA3259HFP-TR     | 755-BA3259HFP-TR     | 1     |
| 37 | U13                     | LTV-817-ASMD     | 859-LTV-817S         | 1     |
| 38 | X1                      | RJ-45            | 673-J1006F21NL       | 1     |
| 39 | X2                      |                  | 710-691103810002     | 1     |
| 40 | X3, X4, X5              |                  | 490-TB001-500-04BE   | 3     |
| 41 | X6                      |                  | 490-TB002-500-03BE   | 1     |

\*ak nie je uvedené číslo dielu jedná sa o bežný typ s púzdom 0603

## 4 Riadiaca časť s mikrokontrolérom

### 4.1 Popis obvodu

Základom celej riadiacej časti je mikrokontrolér ATmega328. Napriek tomu, že obsahuje redukovanú inštrukčnú sadu (RISC) je optimalizovaný pre programovací jazyk C. Spolu s ethernetovým komunikačným modulom W5500 komunikuje na zbernici SPI. Výstup na ovládanie výstupov je 6 digitálnych pinov, ktoré sú privedené na enable piny ovládača konkrétnej vetvy. Riadenie prúdového obmedzenia je riešené dvojicou digitálnych reostatov ktoré s ktorými mikrokontrolér komunikuje cez  $I^2C$  sériový port.

Ako jednoduchá obsluha zdroja je použitý Web-server, ktorý je možné ovládať z bežného webového prehliadača z PC alebo mobilu.

#### 4.1.1 Ukážka zdrojového kódu pre Web-server

```
#include <SPI.h>
#include <Ethernet2.h>
#include <Flash.h>
#include <Wire.h>
#include <avr/pgmspace.h>

byte mac[] = {
  0x54, 0x55, 0x58, 0x10, 0x00, 0x24
};
IPAddress ip(192, 168, 0, 110);

EthernetServer server(80);

String readString = String(100); // string pre zachytávanie dát z adres

int a1 = 0; // výstup:
int a2 = 0; // 5V1=A
int b1 = 0; // 5V2 = B
int b2 = 0; // 12V = C
int c1 = 0; // 24V = D
int c2 = 0;
int d1 = 0;
int d2 = 0;

String AString = String(3);
String BString = String(3);
String CString = String(3);
String DString = String(3);

EthernetClient client;

void setup() {

  Serial.begin(9600);
  Ethernet.begin(mac, ip);
  server.begin(); //start http servera

  pinMode(9, OUTPUT); //definícia výstupov
  pinMode(8, OUTPUT);
  pinMode(7, OUTPUT);
  pinMode(6, OUTPUT);
  pinMode(5, OUTPUT);
  pinMode(4, OUTPUT);
  pinMode(3, OUTPUT);

  digitalWrite(9, LOW); //uviedenie všetkých vetiev do vypnutého stavu pri zapnutí
  digitalWrite(8, LOW);
  digitalWrite(7, LOW);
  digitalWrite(6, LOW);
  digitalWrite(5, LOW);
  digitalWrite(4, LOW);
  digitalWrite(3, HIGH);

  readString = "0";
  AString = "0";
  BString = "0";
  CString = "0";
  DString = "0";
}

void loop() {

  //Vytvorenie spojenia medzi klientom
  EthernetClient client = server.available();
```



```

if (client) {

while (client.connected()) {
  if (client.available()) {
    char c = client.read();

    //čítame HTTP char
    if (readString.length() < 100) {

      //uloženie prijatej správy
      readString = readString + c;
    }

    if (c == '\n') { //čakáme až na koniec HTML požiadavky

      if (readString.indexOf("current") > -1) { //zistujeme aký typ príkazu bol prijatý v receive stringu

        //nastavenie prúdového obmedzenia
        //5V1
        a1 = readString.indexOf('='); //hľadáme začiatok prvej hodnoty (=)
        a2 = readString.indexOf('&'); //hľadáme koniec prvej hodnoty (&)
        AString = readString.substring(a1 + 1, a2);

        //5V2
        b1 = readString.indexOf=', a1 + 1 ); //začiatok druhej hodnoty (=)
        b2 = readString.indexOf('&', a2 + 1 ); //koniec druhej hodnoty (&)
        BString = readString.substring(b1 + 1, b2);

        //12V
        c1 = readString.indexOf=', b1 + 1 ); //začiatok tretej hodnoty (=)
        c2 = readString.indexOf('&', b2 + 1 ); //koniec tretej hodnoty (&)
        CString = readString.substring(c1 + 1, c2);

        //24V
        d1 = readString.indexOf=', c1 + 1 ); //začiatok poslednej hodnoty (=)
        d2 = readString.indexOf('_', c2 + 1 ); //koniec poslednej hodnoty (blank)
        DString = readString.substring(d1 + 1, d2);
      }

      //zapnutie vypnutie výstupov
      if (readString.indexOf("5V1=1") >= 0) //zistujeme stav on/off pre výstupy
        digitalWrite(9, HIGH);

      if (readString.indexOf("5V1=0") >= 0)
        digitalWrite(9, LOW);

      if (readString.indexOf("5V2=1") >= 0)
        digitalWrite(8, HIGH);

      if (readString.indexOf("5V2=0") >= 0)
        digitalWrite(8, LOW);

      if (readString.indexOf("12V1=1") >= 0)
        digitalWrite(7, HIGH);

      if (readString.indexOf("12V1=0") >= 0)
        digitalWrite(7, LOW);

      if (readString.indexOf("12V1=1") >= 0)
        digitalWrite(6, HIGH);

      if (readString.indexOf("12V2=0") >= 0)
        digitalWrite(6, LOW);

      if (readString.indexOf("24V1=1") >= 0)
        digitalWrite(5, HIGH);

      if (readString.indexOf("24V1=0") >= 0)
        digitalWrite(5, LOW);

      if (readString.indexOf("24V2=1") >= 0)
        digitalWrite(4, HIGH);

      if (readString.indexOf("24V2=0") >= 0)
        digitalWrite(4, LOW);

      //-----HTML-----
      client.println(F("HTTP/1.1 200 OK\n"));
      client.println(F("Content-Type: text/html\n\n"));
      client.println(F(""));

      client.println(F("<html>"));
      client.println(F("<head>"));
      client.println(F("<meta name='viewport' content='width=device-width; initial-scale=1.0; maximum-scale=1.0; user-scalable=0;' />"));
      client.println(F("<meta name='apple-mobile-web-app-capable' content='yes' />"));
      client.println(F("<title>SMPS control</title>"));
      client.println(F("</head>\n"));

      client.println(F("<body margin=0 padding=0 style='font-family: Verdana; background-color:#ccc;'>\n"));

      //Header
      client.println(F("<table style='border-collapse: collapse;'>"));

```

```

        client.println(F("<tr style='font-weight:bold; border-bottom:3px solid #000;'><td>0vlá  

        danie výstupov</td><td colspan=2 align=center></td></tr>"));

        //HTML tabulka
        client.println(F("<form action='current' method='get'>"));

        client.println(F("<tr>"));
        client.println(F("<td>"));
    if (digitalRead(9)) {
        client.print(F("<a href='http://192.168.0.110?5V1=0'><button style='background:red;width:60px;height  

        :40px'>5V1</button></a>")); //tvorba tlačidiel pre ovládanie funkcie
    } else {
        client.print(F("<a href='http://192.168.0.110?5V1=1'><button style='background:green;width:60px;  

        height:40px'>5V1</button></a>"));
    }
    client.print(F("</td>"));
    client.print(F("<td>"));
    if (digitalRead(8)) {
        client.print(F("<a href='http://192.168.0.110?5V2=0'><button style='background:red;width:60px;height  

        :40px'>5V2</button></a>"));
    } else {
        client.print(F("<a href='http://192.168.0.110?5V2=1'><button style='background:green;width:60px;  

        height:40px'>5V2</button></a>"));
    }
    client.print(F("</td>"));
    client.println(F("<tr>"));
    client.println(F("<td>"));
    if (digitalRead(7)) {
        client.print(F("<a href='http://192.168.0.110?12V1=0'><button style='background:red;width:60px;height  

        :40px'>12V1</button></a>"));
    } else {
        client.print(F("<a href='http://192.168.0.110?12V1=1'><button style='background:green;width:60px;  

        height:40px'>12V1</button></a>"));
    }
    client.print(F("</td>"));
    client.print(F("<td>"));
    if (digitalRead(6)) {
        client.print(F("<a href='http://192.168.0.110?12V2=0'><button style='background:red;width:60px;height  

        :40px'>12V2</button></a>"));
    } else {
        client.print(F("<a href='http://192.168.0.110?12V2=1'><button style='background:green;width:60px;  

        height:40px'>12V2</button></a>"));
    }
    client.print(F("</td>"));
    client.println(F("<tr>"));
    client.println(F("<td>"));
    if (digitalRead(5)) {
        client.print(F("<a href='http://192.168.0.110?24V1=0'><button style='background:red;width:60px;height  

        :40px'>24V1</button></a>"));
    } else {
        client.print(F("<a href='http://192.168.0.110?24V1=1'><button style='background:green;width:60px;  

        height:40px'>24V1</button></a>"));
    }
    client.print(F("</td>"));
    client.print(F("<td>"));
    if (digitalRead(4)) {
        client.print(F("<a href='http://192.168.0.110?24V2=0'><button style='background:red;width:60px;height  

        :40px'>24V2</button></a>"));
    } else {
        client.print(F("<a href='http://192.168.0.110?24V2=1'><button style='background:green;width:60px;  

        height:40px'>24V2</button></a>"));
    }
    client.print(F("</td>"));
    client.println(F("<tr><td>"));
    client.print(F("5V1:<input type='range' name='5V1' id='A' min='0' max='127' value='0' step='1'></td  

    ></tr>"));
    client.print(F("<tr><td>"));
    client.print(F("5V2:<input type='range' name='5V2' id='B' min='0' max='127' value='0' step='1'></td  

    ></tr>"));
    client.print(F("<tr><td>"));
    client.print(F("12V:<input type='range' name='12V' id='C' min='0' max='127' value='0' step='1'></td  

    ></tr>"));
    client.print(F("<tr><td>"));
    client.print(F("24V:<input type='range' name='24V' id='D' min='0' max='127' value='0' step='1'></td  

    ></tr>"));
    client.println(F("<tr>"));
    client.println(F("<td>"));
    client.print(F("<input type='Nastavit' value='OK'></td></tr>"));
    client.println(F("</form>"));
    client.println(F("</table>"));
    client.print(F("</body></html>"));

    //prevod hodnôt do int a zápis do reostatov
    //5V1
    char valueArray[AString.length() + 1];
    AString.toCharArray(valueArray, sizeof(valueArray));
    int A = atoi(valueArray);
    Wire.beginTransmission(44); //zápis na adresu #44 (0x2c)
    Wire.write(byte(0x20)); //zápis inštrukčného bytu pre Wiper0/1
    Wire.write(A); //zápis hodnoty do reostatu
    Wire.endTransmission(); //koniec prenosu

    //5V2
    char valueArray1[BString.length() + 1];
    BString.toCharArray(valueArray1, sizeof(valueArray1));
    int B = atoi(valueArray1);
    Wire.beginTransmission(44);

```

```

Wire.write(byte(0x24));
Wire.write(B);
Wire.endTransmission();

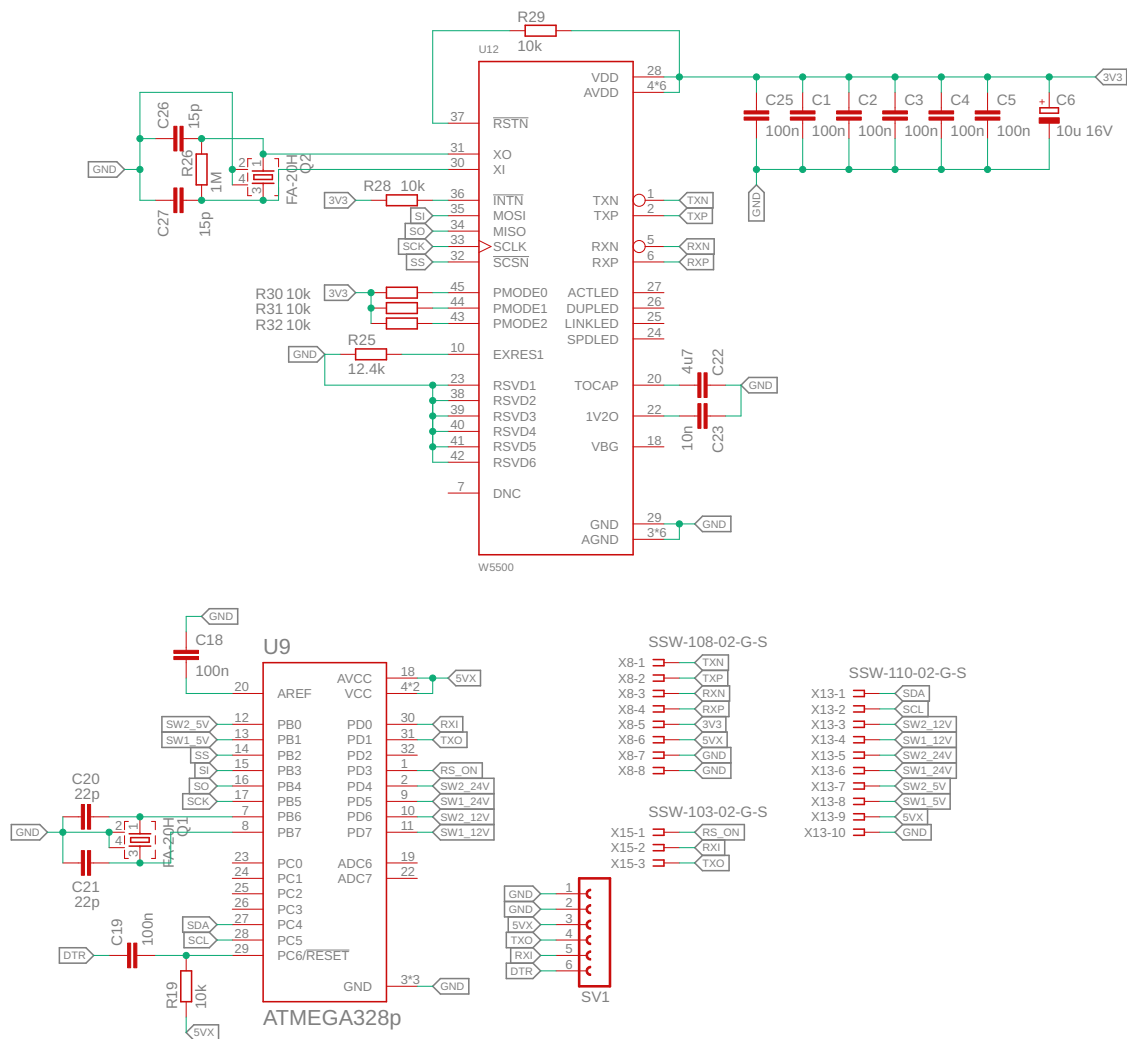
//12V
char valueArray2[CString.length() + 1];
CString.toCharArray(valueArray2, sizeof(valueArray2));
int C = atoi(valueArray2);
Wire.beginTransmission(46);
Wire.write(byte(0x20));
Wire.write(C);
Wire.endTransmission();

//24V
char valueArray3[DString.length() + 1];
DString.toCharArray(valueArray3, sizeof(valueArray3));
int D = atoi(valueArray3);
Wire.beginTransmission(46);
Wire.write(byte(0x24));
Wire.write(D);
Wire.endTransmission();

readString = "";
//ukončenie relácie
client.stop();
}
}
}
}
}
}

```

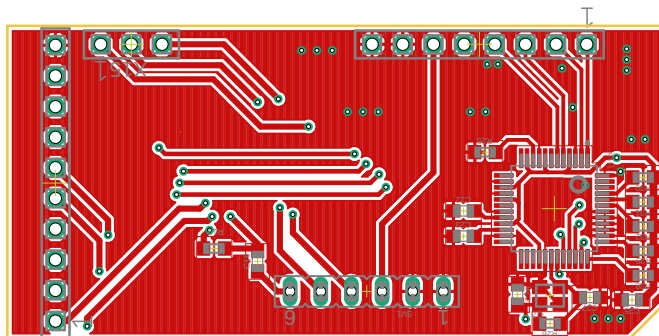
## 4.2 Schéma zapojenia



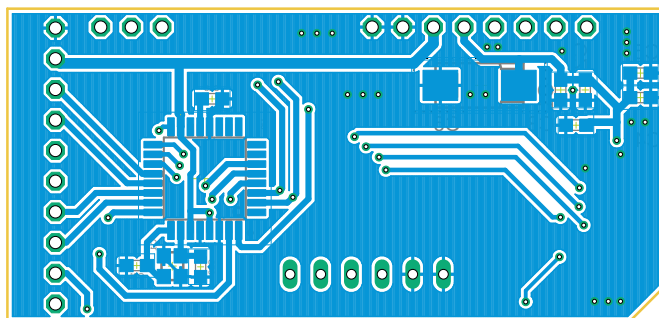
Obr. 3: Schéma riadiacej časti vrátane vnútorných prechodov do dosiek so zdrojom a meničmi

## 4.3 Rozloženie komponentov na PCB

### 4.3.1 Horná vrstva



### 4.3.2 Spodná vrstva



## 4.4 Zoznam komponentov

| Č. | Značenie                          | Hodnota        | Mouser číslo dielu  | Počet |
|----|-----------------------------------|----------------|---------------------|-------|
| 1  | C1, C2, C3, C4, C5, C18, C19, C25 | 100n           |                     | 8     |
| 2  | C20, C21                          | 22p            |                     | 2     |
| 3  | C26, C27                          | 15p            |                     | 2     |
| 4  | C6                                | 10 $\mu$ F/16V | 581-F971C475MAAHT3  | 1     |
| 5  | C22                               | 4.7 $\mu$ F    |                     | 1     |
| 6  | C23                               | 10n            |                     | 1     |
| 7  | Q1                                | 16MHz          | 732-FA-20H16MF20X-B | 1     |
| 8  | Q2                                | 25MHz          | 732-FA20H-25D30Y-C3 | 1     |
| 9  | R19                               | 10k            |                     | 1     |
| 10 | R25                               | 12.4k          |                     | 1     |
| 11 | R26                               | 1M             |                     | 1     |
| 12 | R28, R29, R30, R31, R32           | 10k            |                     | 5     |
| 13 | U9                                | ATMega 328p    | 556-ATMEGA328P-AU   | 1     |
| 14 | U12                               | W5500          | 950-W5500           | 1     |

\*ak nie je uvedené číslo dielu jedná sa o bežný typ s púzdom 0603

## 5 Časť s meničmi

### 5.1 Popis obvodu

Funkciou tohto modulu je zmena napätia zo zdrojovej časti a následne jeho prepojenie na príslušné výstupné prvky. Doska obsahuje 2x DC/DC meniče typu step-down znižujúce napätie z 24 V na 5 V a 12 V resp. Základom týchto meničov je obvod TPS54302 s fixnou spínacou frekvenciou 400kHz. Jeho zapojenie vyžaduje minimum externých komponentov čo znižuje cenu. Maximálny výstupný prúd oboch meničov je 3 A a v prípade preťaženia meniča dôjde k automatickému odpojeniu vďaka integrovanej ochrane proti prehriatiu. Obsahuje taktiež integrovanú soft-štart funkciu s nábehom 5 ms. Samotný menič obsahuje ENABLE pin pre jeho zapínanie a vypínanie, avšak v prípade tohto zdroja je ovládanie výstupu riešené samostatnými integrovanými obvodmi. Ovládanie 5V vetiev je riešené obvodom MIC2019A. Ten okrem možnosti spínania záťaže ENABLE pinom poskytuje aj prúdové obmedzenie nastaviteľné externým rezistorom. Ten predstavuje v tomto prípade 127-krokový digitálny reostat MCP4632 pripojený paralelne k rezistoru R1 a R2, nakoľko použitý reostat s rozsahom 5 k $\Omega$  je príliš veľký aby mohol samostatne obmedzovať prúd v efektívnom rozsahu. Rovnaký princíp je využitý aj pri ovládaní 12 a 24 V vetiev avšak za použitia TPS2H000-Q1. Ten umožňuje ovládanie oboch výstupov avšak prúdové obmedzenie je možné nastaviť len na oboch výstupoch súčasne taktiež externým rezistorom, ktorý predstavuje druhý digitálny reostat.

#### 5.1.1 Komunikácia s reostatmi a spínanie výstupov

Adresa reostatov na  $I^2C$  zbernici pozostáva zo 7-bitovej adresy ktorá začína štartovacím bitom a sekvenciou 01011 a následne je definovaná hardvérovými pinmi A1 a A0. Tie je možné pripojiť na  $V_{CC}$  alebo  $GND$  čo predstavuje bitovú 1 alebo 0. Týmto spôsobom je možné na jednej zbernici mať pripojené až 4 zariadenia. V prípade toho zdroja sú tak adresy reostatov v hexadecimálnom tvare 0x2e a 0x2c. Nasleduje 7-bitový príkaz ktorým definujeme do ktorého zvoleného reostatu bude ďalší príkaz zapísaný, ten predstavuje v prípade Wiper0 sekvenciu '1000 00d'b a v prípade Wiper1 '1001 00d'b. Po odoslaní týchto príkazov nasleduje hodnota v rozsahu 0-127 ktorá určuje výsledný odpor v rozsahu 0-5k $\Omega$ . Keďže aj obvod MIC2019A aj TPS2H000-Q1 obsahujú ENABLE piny je možné pripojením týchto pinov na  $V_{CC}$  alebo  $GND$  zapínať/vypínať výstupné porty. Všetky potrebné ENABLE piny sú privedené až k mikrokontroléru ktorý zaobstaráva ich riadenie na základe požiadavky z Web-serveru.

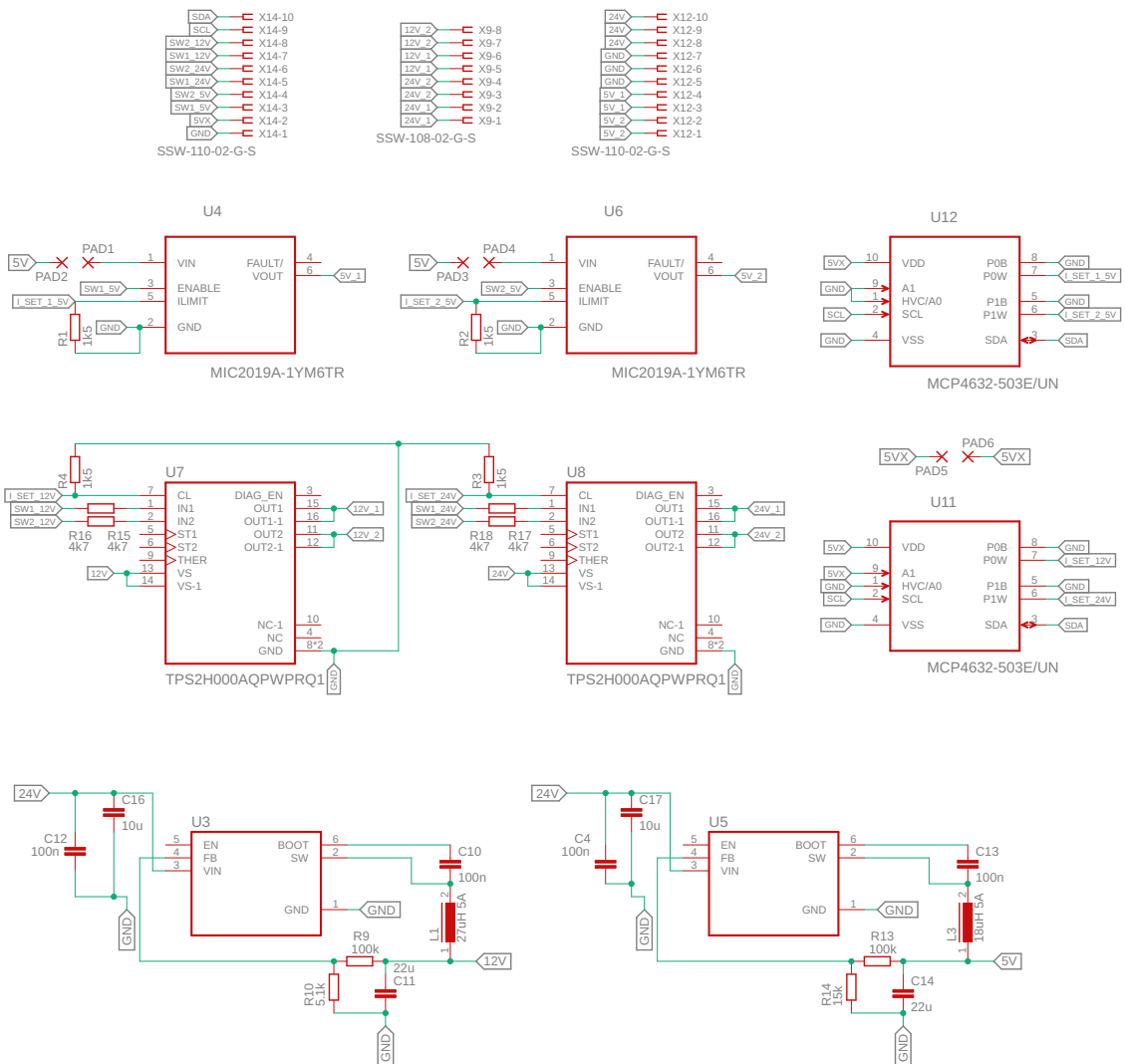
#### 5.1.2 Prúdové obmedzenie

Prúdové obmedzenie pre 5 V vetvy zaobstaráva obvod MIC2019A-1YM6 ktorý poskytuje prúdové obmedzenie v rozsahu 0.1 až 0.9 A. V prípade, že je na výstupe potrebný vyšší prúd je možné bez zmeny zapojenia alebo zdrojového kódu zameniť obvod za typ MIC2019YM6 ktorý poskytuje prúdové obmedzenie v rozsahu 0.2 až 2 A. Externým rezistorom v rozsahu 230 $\Omega$  až 2k $\Omega$  (pre MIC2019A alebo 150 $\Omega$  až 1.2k $\Omega$  pre MIC2019) je možné výstupný prúd limitovať. Prúd tečúci do záťaže je

monitorovaný druhým paralelne pripojeným MOSFETom zapojenom ako prúdové zrkadlo. Prúdové obmedzenie sa zapína automaticky ako náhle výstupný prúd do záťaže prekročí zvolenú hranicu. V tomto aktivovanom stave je výstupný prúd obmedzený na limitujúcu hodnotu a zotrvá v tomto stave dokým nebude výstupný prúd znížený alebo nedôjde k prehriatiu obvodu a úplnému odpojeniu záťaže kým sa teplota obvodu nezníži. Prúdové obmedzenie obvodov MIC20XX je navrhnuté ako zdroj konštantného prúdu. Ak sa však záťaž napriek prúdovému obmedzeniu pokúsi odoberať stále väčší prúd dôjde k poklesu výstupného napätia  $V_{OUT}$ . Ak nastane že rozdiel medzi vstupným napätím  $V_{IN}$  a  $V_{OUT}$  bude väčší než 1 V dôjde k poklesu výstupného prúdu pod nastavenú hodnotu aby sa zabránilo nadbytočnému zaťažovaniu zdroja a zároveň zníženie zahrievania obvodu.

Prúdové obmedzenie pre 12 V a 24 V vetiev je dosiahnuté za pomoci obvodu TPS2H000 ktorý podobne ako v prípade MIC20XX používa na monitorovanie výstupného prúdu prúdové zrkadlo v kombinácii s komparátorom a určuje tak ovládačom MOSFETu kedy výstupný prúd dosiahol limitujúcu hodnotu. Avšak v prípade 12 V a 24 V vetiev je toto prúdové zrkadlo zdieľané s oboma výstupnými kanálmi, teda je možné nastaviť prúdové obmedzenie iba pre súčet prúdov oboch výstupných kanálov. Rovnako ako pre obvod MIC v momente dosiahnutia prúdového limitu sa výstup začne chovať ako zdroj prúdu avšak v prípade obvodu TPS2H000 nie je monitorovaný rozdiel vstupného a výstupného napätia. Obvod však obsahuje ochranu kanálu pre spínaní v prípade, že na výstupe kanálu nastal "tvrdý" skrat na zem dôjde k okamžitému odpojeniu kanálu ešte skôr než výstupný prúd dosiahne prúdové obmedzenie. Doba reakcie tohto tzv. fast-trip je bežne menej než  $1\mu s$  čo chráni zdroj proti nadmernému zaťažovaniu jednou poškodenou vetvou.

## 5.2 Schéma zapojenia

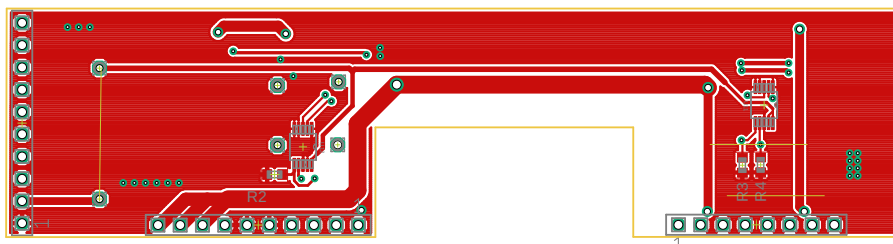


Obr. 4: Schéma časti s meničmi vrátane vnútorných prechodov do dosiek so zdrojom a riadením

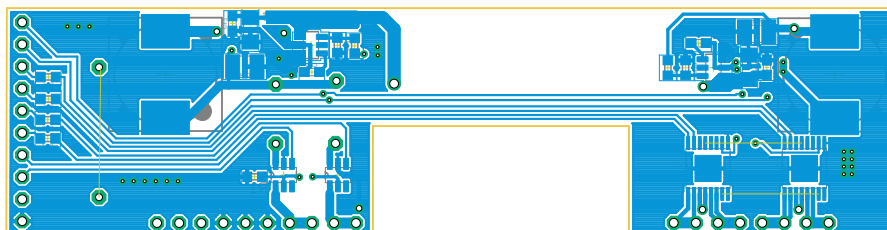


## 5.3 Rozloženie komponentov na PCB

### 5.3.1 Horná vrstva



### 5.3.2 Spodná vrstva



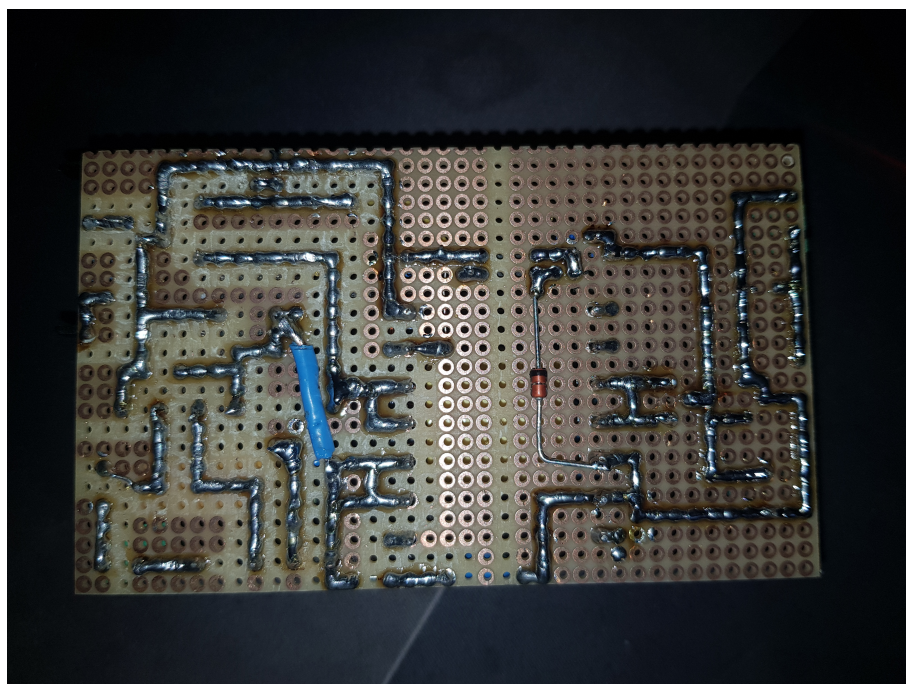
## 5.4 Zoznam komponentov

| Č. | Značenie           | Hodnota          | Mouser číslo dielu   | Počet |
|----|--------------------|------------------|----------------------|-------|
| 1  | C4, C13            | 100n             |                      | 2     |
| 2  | C10, C12           | 100n (1206)      |                      | 2     |
| 3  | C16, C17           | 10u              |                      | 2     |
| 4  | C11, C14           | 22u              | 963-TMK325B7226MMHP  | 2     |
| 5  | L1                 | 27uH 5A          | 704-DR127-220-R      | 1     |
| 6  | L3                 | 18uH 5A          | 704-DR125-180-R      | 1     |
| 7  | R1, R2, R3, R4     | 1k5              |                      | 4     |
| 8  | R9, R13            | 100k             |                      | 2     |
| 9  | R10                | 5k1              |                      | 1     |
| 10 | R15, R16, R17, R18 | 4k7              |                      | 4     |
| 11 | R14                | 15k              |                      | 1     |
| 12 | U3, U5             | TPS54302         | 595-TPS54302DDCT     | 2     |
| 13 | U4, U6             | MIC2019A-1YM6TR  | 998-MIC2019A-1YM6TR  | 2     |
| 14 | U7, U8             | TPS2H000AQPWPRQ1 | 595-TPS2H000AQPWPRQ1 | 2     |

\*ak nie je uvedené číslo dielu jedná sa o bežný typ s púzdom 0603

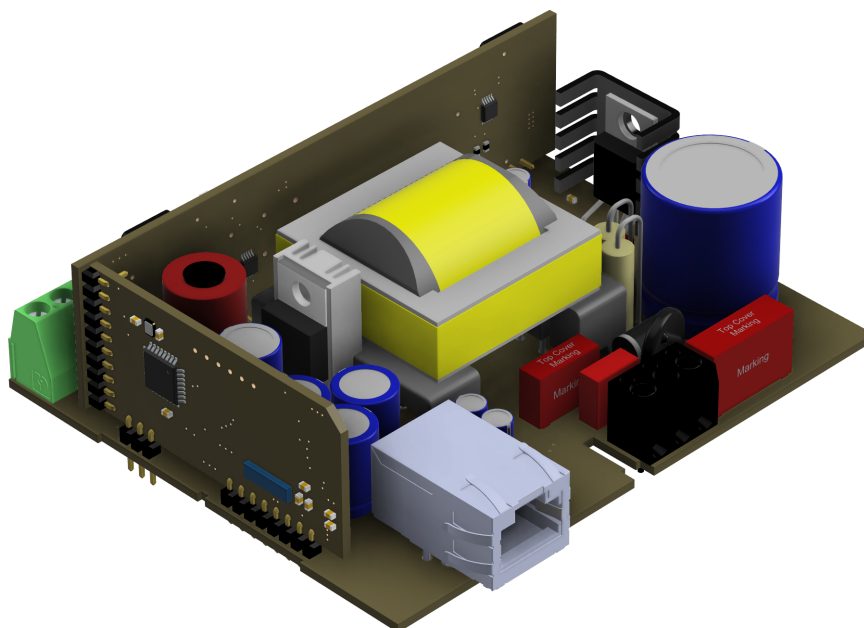
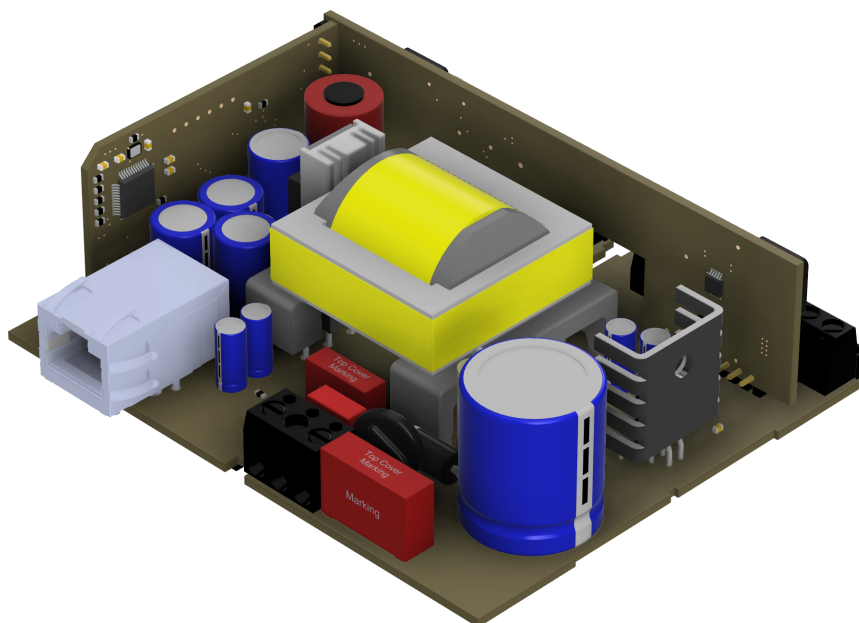


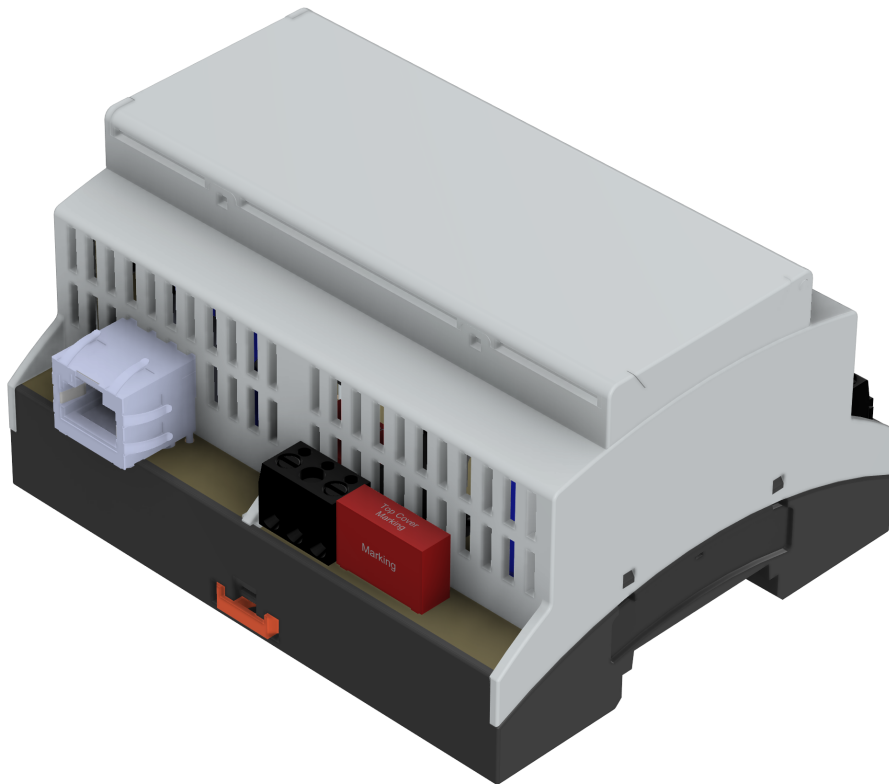
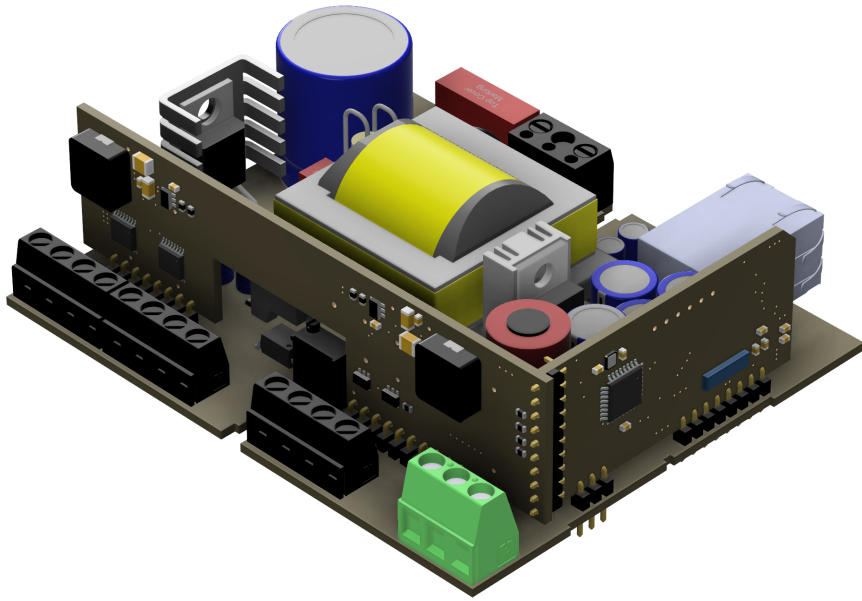
## B Fotografie zostavenej testovacej časti



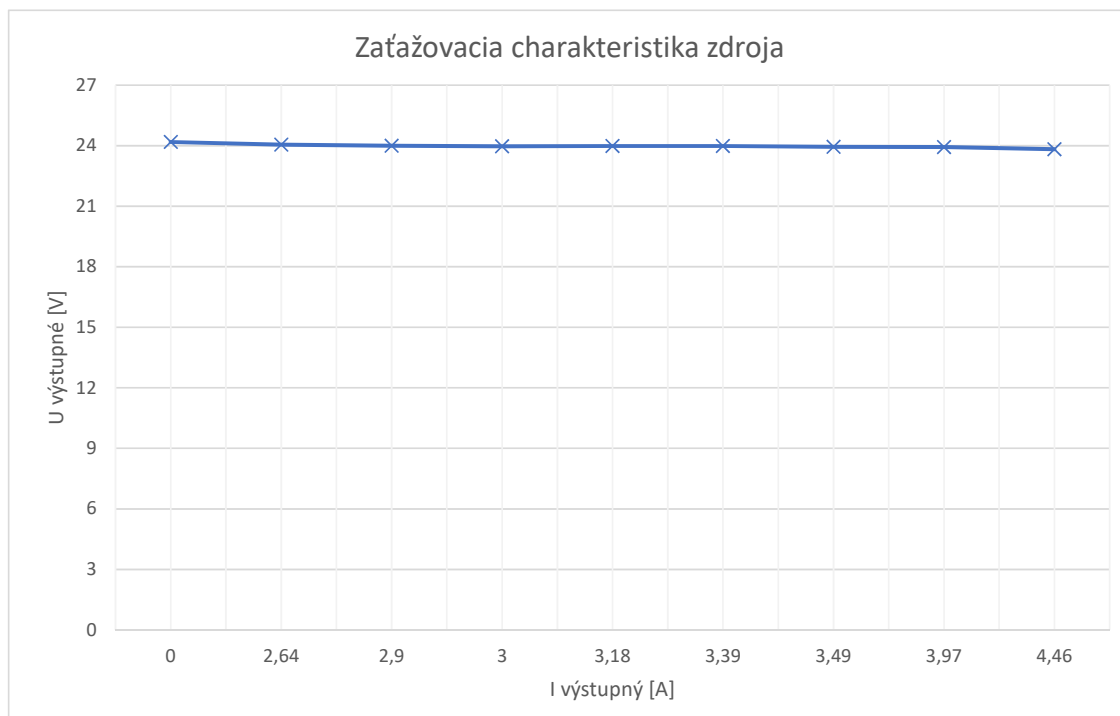


## C Ukážka 3D modelu





## D Graf zaťažovacej charakteristiky







## E Obsah priloženého CD

```
/ ..... koreňový adresár priloženého CD
├── logo ..... logo školy a fakulty
│   ├── BUT_abbreviation_color_PANTONE_EN.pdf
│   ├── BUT_color_PANTONE_EN.pdf
│   ├── FEEC_abbreviation_color_PANTONE_EN.pdf
│   ├── FEKT_zkratka_barevne_PANTONE_CZ.pdf
│   ├── UTKO_color_PANTONE_CZ.pdf
│   ├── UTKO_color_PANTONE_EN.pdf
│   ├── VUT_barevne_PANTONE_CZ.pdf
│   ├── VUT_symbol_barevne_PANTONE_CZ.pdf
│   └── VUT_zkratka_barevne_PANTONE_CZ.pdf
├── prílohy ..... prílohy
│   ├── Final_build.f3z ..... 3D model zdroja FUSION360 v2.0.8407
│   ├── SMPScontrol.ino ..... zdrojový kód ARDUINO IDE v1.8.12
│   └── pcb.zip ..... schémy a dosky plošných spojov EAGLE v9.6.1
├── obrazky ..... ostatné obrázky
│   ├── 1.png
│   ├── 2.png
│   ├── 3.png
│   ├── 4.png
│   ├── aku.pdf
│   ├── ATX_smps.png
│   ├── blok_lin.pdf
│   ├── blok_smps.pdf
│   ├── boost.pdf
│   ├── buck.pdf
│   ├── forward.pdf
│   ├── foto2.jpg
│   ├── foto3.jpg
│   ├── linear.jpg
│   ├── priep.pdf
│   ├── push.pdf
│   ├── pwm.pdf
│   ├── TOP.pdf
│   ├── TP54302.pdf
│   └── zatchar.pdf
├── pdf ..... pdf stránky generované informačným systémom
│   ├── student-desky.pdf
│   ├── student-titulka.pdf
│   └── student-zadani.pdf
└── text ..... zdrojové textové súbory
    ├── datasheet.pdf ..... technická správa
    ├── literatura.tex
    └── prílohy.tex
```

