



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

JISKROVĚ BEZPEČNÝ ZDROJ

INTRINSIC POWER SUPPLY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Tomáš Wurzel

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Tomáš Wurzel

ID: 147002

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Jiskrově bezpečný zdroj

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je návrh a realizace jiskrově bezpečného zdroje. Zadání lze shrnout do následujících bodů:

1. Zpracujte rešerši na téma jiskrově bezpečné zdroje, proveďte základní rozbor problematiky jiskrově bezpečných zdrojů s ohledem na příslušné normy ČSN EN.
2. Proveďte průzkum trhu v oblasti jiskrově bezpečných zdrojů.
3. Navrhněte a realizujte jiskrově bezpečný zdroj s požadovanými parametry napájení 230V/50 Hz, trvalý výstup U_j - 12V DC, I_j -200 mA, pracovní teplota 0 až 60°C, odolnost proti zkratu, indikace napájecího napětí, jiskrově bezpečného výstupního napětí a zkratu, případně překročení výkonu, požadované krytí min. IP 20, uchycení na lištu DIN 35.
4. Požadované parametry ověřte měřením.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

ČSN EN 50014 Všeobecné požadavky na nevybušná zařízení
ČSN EN 50020 Jiskrově bezpečná zařízení.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 26.5.2014

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

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

Tato práce se zabývá vývojem jiskrově bezpečného zdroje určeného pro napájení zařízení v prostorách s nebezpečím výbuchu. V souvislosti s tím jsou v práci vysvětleny pojmy související s jiskrovou bezpečností. Je zde popsána definice jiskrově bezpečných zařízení, požadavky na jejich parametry a popis s tím souvisejících norem. Práce se dále zabývá návrhem vnitřních obvodů zdroje, jejichž principy jsou vysvětleny na blokovém schématu. Pro realizaci jednotlivých prvků blokového schématu jsou zde navrženy vhodné součástky a vypočítány jejich požadované parametry. Zdroj je následně sestaven a jsou zde ověřeny jeho parametry.

KLÍČOVÁ SLOVA

Jiskrová bezpečnost, jiskrově bezpečná zařízení, lineární zdroj na lištu DIN 35

ABSTRACT

This thesis discusses development of intrinsically safe power supply designed for powering devices installed in areas with potentially explosive atmospheres. In this context, the work explains the concepts of intrinsic safety. Thesis describes the basic definition of intrinsically safe equipment, device parameter requirements and description of related standards matching ATEX directive. Thesis focuses on the design of internal circuits of intrinsically safe power supply whose principles are explained on the block diagram. Concrete parts of the block diagram are discussed and parameters of suitable components are calculated. The power supply is then built and its parameters are measured.

KEYWORDS

Intrinsic safety, intrinsically safe devices, linear power supply

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

WURZEL, T. *Jiskrově bezpečný zdroj*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 48 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Jiskrově bezpečný zdroj“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval své rodině za podporu a vytvoření příznivých podmínek pro studium. Dále bych rád poděkoval vedoucímu práce panu docentu Benešovi za pomoc při vymýšlení konceptu práce a za návrhy na zlepšení. Rád bych také poděkoval firmě MM GROUP, s.r.o. za technickou podporu při realizaci zdroje.

OBSAH

Obsah	5
1 Úvod.....	7
2 Vymezení pojmů a teorie	8
2.1 Prostory s nebezpečím výbuchu.....	8
2.1.1 Zařízení skupiny I	8
2.1.2 Zařízení skupiny II.....	9
2.1.3 Typy ochran	9
2.1.4 Návazná zařízení.....	10
2.2 Napájecí zdroje.....	11
2.2.1 Lineární zdroje.....	11
2.2.2 Spínané zdroje.....	11
2.3 Zařazení vyvíjeného výrobku.....	11
3 Návrh zdroje	12
3.1 Související normy a předpisy	12
3.2 Blokové schéma	12
3.2.1 Transformátor s usměrňovačem - blok č. 1	13
3.2.2 Stabilizace na 24 V - blok č. 2	13
3.2.3 Signalizace napájení - blok č. 3	13
3.2.4 Omezení napětí a proudu - blok č. 4 a 5	13
3.2.5 Elektronické omezení proudu - blok č. 6.....	14
3.2.6 Signalizace omezení proudu - blok č. 7	14
3.2.7 Stabilizace na 12 V a signalizace výstupu - blok č. 8 a 9	14
3.2.8 Výstupní napěťové ochrany - blok č. 10.....	14
3.3 Výpočty hodnot a výběr součástek	14
3.3.1 Transformátor	15
3.3.2 Stabilizace na 24 V a signalizace napájení	18
3.3.3 Sestava proudové ochrany	20
3.3.4 Signalizace přetížení zdroje	24
3.3.5 Elektronický omezovač proudu	25
3.3.6 Stabilizace na 12 V a signalizace napětí na výstupu	27
3.3.7 Paralelní napěťové ochrany na 12 V.....	29
3.4 Vytvoření elektrického schématu.....	31
4 Technická realizace.....	32
4.1 Výběr krabičky.....	32
4.2 Návrh přístrojového štítu.....	32
4.2.1 Výpočet maximálních výstupních parametrů zdroje	32
4.2.2 Rozbor označení zdroje dle směrnice ATEX a norem	33
4.2.3 Náhled na hotový štítek	35

4.3	Návrh desky plošných spojů	35
4.3.1	Dodržení izolačních vzdáleností.....	36
4.3.2	Dodržení dalších požadavků bezpečnosti úrovně "ia"	36
4.4	Sestavení zdroje	38
5	Měření.....	39
5.1	Měření výstupní charakteristiky.....	39
5.2	Měření výstupního šumu.....	40
5.3	Měření teplot součástek a ověření stability výstupu	41
6	Závěr	42
7	Zdroje.....	43
	Seznam zkratk a symbolů	45
	Seznam obrázků, tabulek a grafů.....	47
	Seznam příloh	48

1 ÚVOD

Významnou část průmyslu tvoří procesy prováděné v prostorách s nebezpečím výbuchu. Stav nebezpečí může být způsoben trvalým nebo přechodným stavem okolní atmosféry. S takovýmto prostředím se můžeme setkat například v chemickém průmyslu, uhelných dolech, kde se vyskytuje metan a uhelný prach, u čerpacích stanic nebo například také v mlýnech obilí.

Pro zajištění bezpečnosti procesů v těchto prostředích existují striktní předpisy a normy, které jasně vymezují požadavky na použitá elektrická zařízení. Obecně se požadavky vztahují na omezení výstupního přepětí, omezení výstupních proudů, výkonů a jiných potenciálně nebezpečných stavů zařízení, které by mohly vést k iniciaci výbuchu. To v praxi například znamená, že při návrhu zařízení je nutno zajistit, aby se součásti zařízení nepřehřívaly na teplotu, při níž by mohlo dojít k zapálení výbušné směsi, nebo aby při poruše zařízení nedošlo k zavedení nezabezpečených signálů a napětí do nebezpečných prostředí.

Předmětem této práce je vývoj zdroje, který má za úkol napájet zařízení v prostorách s nebezpečím výbuchu, přičemž samotný zdroj se bude nacházet mimo toto prostředí. Na trhu jsou běžně dostupné jiskrově bezpečné zdroje s výstupním proudem, jehož hodnoty se pohybují řádově v desítkách mA, nebo zdroje schopné dodat až jednotky ampér. Vyvíjený zdroj by měl být schopen dodat 200 mA při 12 V, což jsou parametry, které jej řadí mezi tyto dvě skupiny.

Zdroj je vyvíjen ve spolupráci s firmou vyrábějící jiskrově bezpečná zařízení. Firma zaznamenává poptávku po takovém produktu, ale zatím jej v nabídce nemá. Cílem této práce je tedy návrh a realizace zařízení, které by mohlo nalézt své uplatnění na trhu.

Navrhovaný zdroj bude lineární. Tato volba je opodstatněná jednodušším zajištěním bezpečnosti a menším rušením na výstupu (vhodné pro napájení měřících soustav). Spínaný zdroj by byl sice účinnější a menší, nicméně tyto parametry nehrají v této oblasti zásadní roli. Zajištění bezpečnosti takového zdroje je navíc značně složitější.

Na začátku této práce se snažím přiblížit nezbytné požadavky na funkčnost zařízení a vymezit používané pojmy. Tato bakalářská práce bude zakončena sestavením navrženého jiskrově bezpečného zdroje a proměřením jeho parametrů.

Při návrhu budu vycházet především z technických norem ČSN¹ pro jiskrově bezpečná zařízení, výrokové směrnice 94/9/ES (ATEX) pro výbušná prostředí, literatury vztahující se k této problematice a z konzultací s firmou.

¹ ČSN EN50303, ČSN EN 60079-0, ČSN EN 60079-11

2 VYMEZENÍ POJMŮ A TEORIE

Jak jsem již uvedl v úvodu, budu vyvíjet jiskrově bezpečný lineární napájecí zdroj. V této kapitole tedy stručně vysvětlím principy jiskrové bezpečnosti a uvedu, co se očekává od napájecího zdroje a jiskrově bezpečného zařízení obecně.

2.1 Prostory s nebezpečím výbuchu

Prostor s nebezpečím výbuchu můžeme definovat jako oblast o určitém objemu, ve které se může dlouhodobě nebo krátkodobě vyskytovat výbušná směs nebezpečné látky a kyslíku (případně pouze látky schopné výbušné reakce bez kyslíku). V takovýchto prostorách není možné použití běžných elektronických zařízení, neboť u nich mohou nastat nebezpečné stavy, které mohou způsobit vznícení výbušné směsi. Mezi tyto stavy můžeme zařadit například extrémní teploty součástí nebo jiskření. Tyto prostory jsou rozříděny právními předpisy (konkrétně směrnicí ATEX (94/9/ES)) a zařízení pro ně určená se zařazují do vymezených skupin. Jiskrově bezpečná zařízení jsou taková, jejichž jednotlivé výstupy případně ani vstupy spojené s nebezpečným prostředím nepracují s energiemi dostatečnými k zapálení výbušné směsi. [6][7][15]

2.1.1 Zařízení skupiny I

První skupinu tvoří elektrická zařízení určená pro montáž do podzemí dolů a povrchových částí dolů, kde hrozí výbuch důlních plynů nebo rozvířeného hořlavého prachu. Tato skupina se dále dělí na kategorie M1 a M2. [5][15][19]

2.1.1.1 Kategorie M1

Zařízení této kategorie jsou taková zařízení, která setrvávají ve funkci i v přítomnosti výbušné atmosféry. V případě výjimečných poruch na zařízení je stále zajištěna jejich bezpečnost a dodržení výrobcem stanovených parametrů. Poskytují **velmi vysokou** úroveň ochrany. Tato zařízení se vyznačují následujícími prostředky ochrany:

- Pokud selže jedna ochrana proti výbuchu, musí být její funkce zastoupena jinou ochranou (situace, kdy máme dvě ochrany na různých principech),
- nebo je požadovaná úroveň ochrany proti výbuchu zajištěna i v případě dvou na sobě nezávislých poruch na zařízení. (například ztrojené ochrany). [5][15]

2.1.1.2 Kategorie M2

Zařízení kategorie M2 jsou rovněž bezpečná zařízení pracující ve shodě s provozními parametry uváděnými výrobcem, která zajišťují vysokou bezpečnost. Zařízení této kategorie musí zajistit dostatečnou úroveň ochrany během normálního provozu i za nepříznivých provozních podmínek (hrubé zacházení nebo proměnlivé podmínky prostředí). Na rozdíl od skupiny M1 se tato zařízení vypínají v přítomnosti výbušné

atmosféry. Zařízení musí být bezpečná až do krajně nebezpečných koncentrací, avšak v praxi se vypínají při koncentracích stanovených vládami členských států. Poskytují **vysokou** ochranu. V České Republice je hranice, při které se vypínají zařízení kategorie M2 stanovena na 1,5% (bezpečnostní koeficient) metanu v ovzduší. [5]

2.1.2 Zařízení skupiny II

Jedná se o zařízení určená pro provoz v prostorách s nebezpečím výbuchu vlivem výbušné atmosféry. Tedy v jiných prostorách než v dolech s výskytem metanu. Tato skupina se dále dělí podle iniciačních energií na podskupiny IIA, IIB, IIC.

- **IIA** – zastoupeno plynem propan (propanová skupina)
- **IIB** – zastoupeno plynem etylén (etylénová skupina)
- **IIC** – zastoupeno plynem vodík (vodíková skupina)

Z hlediska bezpečnosti dělíme zařízení na tři kategorie.[6][5]

2.1.2.1 Kategorie 1

Zařízení první kategorie jsou zařízení navržená tak, aby poskytovala **velmi vysokou** úroveň ochrany v prostorách, kde je vznik výbušné atmosféry velmi pravděpodobný a taková atmosféra je přítomna dlouhodobě, stále nebo často. Takovéto prostředí je klasifikováno jako **zóna 0** (zóna 20 pro prachy). Zařízení se vyznačují následujícími prvky ochrany proti výbuchu:

- Pokud selže jedna ochrana proti výbuchu, musí být její funkce zastoupena jinou ochranou (situace, kdy máme dvě ochrany na různých principech),
- nebo je požadovaná úroveň ochrany proti výbuchu zajištěna i v případě dvou na sobě nezávislých poruch na zařízení. (například ztrojené ochrany). [15][19]

2.1.2.2 Kategorie 2

Popisuje zařízení s **vysokou úrovní** ochrany před výbuchem, která jsou určená do prostor, kde je vznik výbušné atmosféry pravděpodobný. Takové prostředí je klasifikováno jako **zóna 1** (zóna 21 pro prachy). Bezpečnost proti výbuchu je zajištěna také při provozních poruchách a za nepříznivých podmínek. [15][19]

2.1.2.3 Kategorie 3

Je vyhrazena pro zařízení s **normální úrovní** ochrany před výbuchem, to znamená, že je zajištěna bezpečnost pouze pro normální provozní podmínky. Taková zařízení pracují v podmínkách, kde je výskyt výbušné atmosféry nepravděpodobný. Takové prostory jsou klasifikovány jako **zóna 2** (zóna 22 pro prachy). [15][19]

2.1.3 Typy ochran

Jak již bylo zmíněno, zařízení pracující v prostorách s nebezpečím výbuchu musí být chráněno před nebezpečnými stavy, které by mohly vést k zapálení okolní výbušné

směsi. Toho lze dosáhnout použitím různých druhů ochran. Pokusím se stručně shrnout, o které typy ochran se jedná.

Značka	Název	Stručný popis ochrany
d	Pevný závěr	V případě výbuchu uvnitř závěru nedojde k jeho přenesení ven do výbušného prostředí. Časté u majáků, rozvaděčových skříní, transformátorů atd.
e	Zajištěné provedení	Zabraňuje vnitřním a vnějším částem elektrického zařízení, aby se dostaly do nebezpečných stavů, které za normálního provozu nejsou přítomny. Například u Motorů, světel, rozvodných skříní
p	Závěr s vnitřním přetlakem	Uvnitř chráněných prostor je vytvářen přetlak trvalým průtokem nebo bez něj. Tím se zamezí vniku nebezpečné atmosféry do těchto prostor. Používá se u celých místností nebo u velkých zařízení.
i	Jiskrová bezpečnost	Tato zařízení jsou konstruována tak, aby u nich nedocházelo k jiskření a takovým tepelným účinkům, které by mohly zapálit výbušnou atmosféru. Využíváno u měřicí a regulační techniky.
o	Olejevý závěr	Zařízení je ponořeno v oleji, tím je odděleno od výbušné atmosféry. Využíváno například u transformátorů nebo topných těles.
q	Pískový závěr	Závěr je zaplněn pískem o takové velikosti zrna, díky které se za provozních podmínek zamezí vznícení atmosféry od oblouku uvnitř závěru. Využíváno u transformátorů a elektrických zařízení.
m	Zalítí zalévací hmotou	Princip je zde podobný jako u olejového závěru, rozdíl je v tom, že se jedná o pevnou hmotu. Využití u snímačů nebo u malých elektronických zařízení.
n	Normální ochrana	Za normálního provozu nebo za definovaných podmínek neumožňuje vznícení výbušné atmosféry od zařízení. Používá se například u rozvodných skříní, motorů, světel a jiných zařízení.
s	Speciální závěr	Ochrana za provozních podmínek vyhoví konstrukčním a testovacím zkouškám daných certifikačním úřadem tak, aby byl bezpečný v nebezpečných prostorách. Například u detektorů plynů a svítidel.

Tabulka 1- typy ochran [15]

2.1.4 Návazná zařízení

Jako návazná zařízení jsou označována taková zařízení, která mají jak obvody s omezenou energií (jiskrově bezpečné obvody), tak i obvody nechráněné. Obvody nechráněné nesmí narušit bezpečnost jiskrově bezpečných obvodů. [6]

2.2 Napájecí zdroje

Napájecí zdroj je elektrické zařízení, jehož funkcí je úprava vstupního napětí a proudu tak, aby bylo schopné napájet další k němu připojené spotřebiče. Existují dvě základní skupiny takovýchto zdrojů. Jsou to zdroje lineární a zdroje spínané.

2.2.1 Lineární zdroje

Lineární zdroje se vyznačují tím, že obsahují výkonový prvek (zpravidla stabilizátor s integrovaným tranzistorem v lineárním režimu), který si můžeme představit jako proměnlivý rezistor. Tento prvek je zařazen do napájecího obvodu a přizpůsobuje svůj úbytek tak, aby na jeho výstupu bylo vždy žádané napětí.

2.2.2 Spínané zdroje

Spínané zdroje se od lineárních liší především tím, že jejich výkonový prvek (spínací tranzistor) není zatěžován spojitě, ale je postupně spínán a rozpínán. V plně sepnutém stavu má výkonový prvek malý dynamický odpor a tím se zvyšuje účinnost. Výstup ze spínaného zdroje je dále filtrován a vyhlazen, ale přesto zpravidla nedosahuje kvalit lineárního zdroje. Výhodou těchto zdrojů je tedy jejich velikost a účinnost. Rušení ze spínaných zdrojů může ovlivňovat například přesné měřicí přístroje, což je v průmyslu nežádoucí.

2.3 Zařazení vyvíjeného výrobku

Na předchozích řádcích jsem objasnil základní rozdělení jiskrově bezpečných zařízení a typy napájecích zdrojů. Předmětem této práce je vývoj jiskrově bezpečného lineárního zdroje určeného pro napájení zařízení v povrchových i podzemních částech dolů, přičemž samotný zdroj bude umístěn mimo výbušnou atmosféru. Jedná se tedy o návazné jiskrově bezpečné zařízení skupiny I kategorie M1. Zdroj by měl splňovat také požadavky skupiny IIB kategorie 1. Jiskrová bezpečnost bude zajištěna ochranou typu "i".

3 NÁVRH ZDROJE

V této kapitole nejdříve rozeberu výběr norem a předpisů a pomocí blokového diagramu vysvětlím vnitřní strukturu zdroje. Dále provedu rozbor jednotlivých součástí (bloků) zdroje a nakonec diskutuji navržené schéma elektrického zapojení.

3.1 Související normy a předpisy

Navrhovaného zařízení se týkají především harmonizované normy dle směrnice ATEX (94/9/ES). Tato směrnice sjednocuje předpisy členských států EU týkající se zařízení a ochranných systémů určených pro použití v prostředích s nebezpečím výbuchu. Normy zajišťující splnění požadavků² této směrnice jsou na území ČR následující:

- ČSN EN 60079-0:2010 (Výbušné atmosféry – Část 0: Zařízení – Všeobecné požadavky) – dále jen 60079-0
- ČSN EN 60079-11:2012 (Výbušné atmosféry – Část 11: Ochrana zařízení jiskrovou bezpečností „i“) – dále jen 60079-11
- ČSN EN 50303:2001 (Zařízení skupiny I, kategorie M1, určená pro použití za přítomnosti metanu a/nebo hořlavého prachu) dále jen 50303

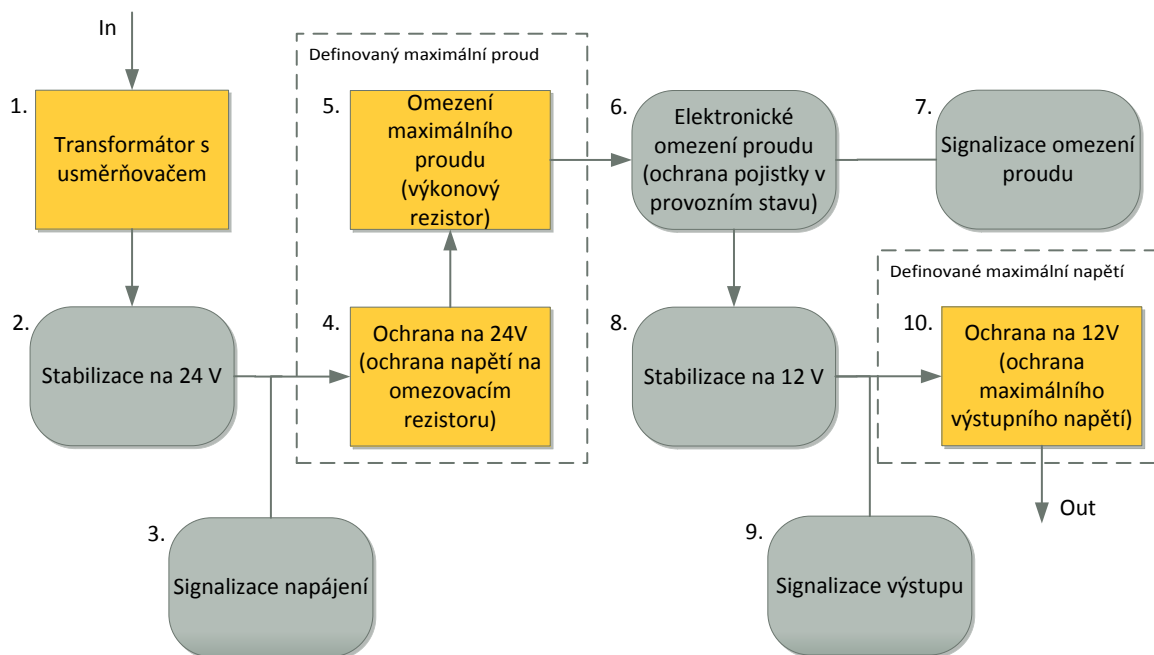
3.2 Blokové schéma

Před započítáním práce je potřeba promyslet funkci vnitřních obvodů zdroje. Při návrhu je nutné zohledňovat požadavky norem a směrnic. Rozhodl jsem se pro použití dvoustupňové koncepce zdroje. První stupeň poslouží k zajištění definovaného výstupního proudu, ale ponechá dostatečnou rezervu pro další obvody zdroje, které zajišťují jeho správnou funkčnost při provozním stavu. Druhý stupeň tedy zajistí stabilní a především definovaný výstup napětí.

Snahou je udržet hodnoty maximálního výstupního napětí a proudu co nejbližší normálnímu provoznímu stavu zdroje. Tyto hodnoty totiž mají vliv na povolené kapacity a indukčnosti připojené zátěže. V praxi to má poté vliv především na maximální přípustnou délku vedení, jehož kapacita a indukčnost roste spolu s délkou. Ve výbušném prostředí se používá kabeláž s definovanými parametry kapacity a indukčnosti.

Na následujícím diagramu vysvětlím funkční bloky zdroje. V diagramu jsou rozlišeny bloky potřebné pro zajištění jiskrové bezpečnosti (žluté hranaté tvary) a bloky zajišťující provozní funkce zdroje (šedé zaoblené tvary).

² Viz kapitola 2.1



Obrázek 1 - blokové schéma vyvíjeného zdroje

3.2.1 Transformátor s usměrňovačem - blok č. 1

Navrhovaný zdroj bude napájen ze sítě nízkého napětí tj. 230 V/50 Hz s tolerancí napětí -6% a +10%. Pro snížení napájecího napětí je zde použitý transformátor s dvoucestným usměrňovačem. Transformátor je konstruován jako bezporuchový transformátor pro napájení jiskrově bezpečných obvodů dle normy 60079-11.

3.2.2 Stabilizace na 24 V - blok č. 2

S ohledem na tolerance síťového napětí, které se projevují také na výstupu transformátoru, použijí lineární stabilizátor napětí na 24 V. Tím je zajištěno stabilní provozní napětí pro napájení vnitřních obvodů zdroje. Při hlubším rozboru by se dalo namítat, že použití stabilizátoru na tomto místě je nadbytečné, ale potřebu jeho zařazení objasním v dalších kapitolách³.

3.2.3 Signalizace napájení - blok č. 3

Činnost předchozích dvou bloků (transformátoru a stabilizátoru) je základním předpokladem pro funkci zdroje. Funkčnost těchto bloků, tedy i přítomnost síťového napětí je indikována signálkou.

3.2.4 Omezení napětí a proudu - blok č. 4 a 5

Pro zajištění jiskrové bezpečnosti je - mimo jiné - nutné zajistit *definované* maximální hodnoty proudu. K tomu slouží omezovací rezistor v kombinaci s paralelním

³ Kapitola 3.2.4

omezovačem napětí. Omezovač napětí definuje maximální možné napětí na rezistoru a tím i maximální možný výstupní proud.

3.2.5 Elektronické omezení proudu - blok č. 6

Při nadměrném zatížení zdroje nebo zkratu na výstupu by docházelo k přepálení vnitřních tavných pojistek. Tento stav není za provozních podmínek žádoucí, z tohoto důvodu je ve zdroji zařazena elektronická proudová ochrana. Ochrana bude tvořena lineárním stabilizátorem napětí a snímacím rezistorem. Na takový omezovač však nelze nahlížet jako na prvek zajišťující bezpečnost.

3.2.6 Signalizace omezení proudu - blok č. 7

Při překročení proudového výstupu zdroje reaguje elektronické omezení proudu zvyšováním svého dynamického odporu, což má za důsledek snižování výstupního napětí. Tento pokles bude detekován komparátorem, který v případě překročení proudového parametru rozsvítí varovnou signálku.

3.2.7 Stabilizace na 12 V a signalizace výstupu - blok č. 8 a 9

Na rezistoru pro omezení proudu vzniká při proměnlivém zatížení úměrný úbytek napětí. Z tohoto důvodu je v obvodu zařazen stabilizátor na požadované výstupní napětí zdroje 12 V. Stabilizátor také brání aktivaci napěťových ochran na výstupu zdroje, to by vedlo k přetavení pojistky. Napětí na výstupu zdroje je indikováno signálkou.

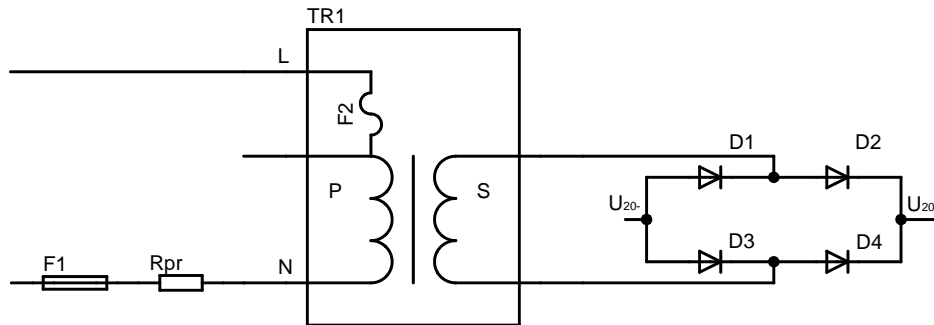
3.2.8 Výstupní napěťové ochrany - blok č. 10

S ohledem na požadované parametry zdroje je potřeba zajistit, aby nedošlo k překročení výstupního napětí nad udanou mez. V běžném provozním stavu je toto zajištěno stabilizátorem. Z hlediska jiskrové bezpečnosti však nelze na stabilizátor napětí pohlížet jako na bezporuchovou součástku, proto je nutné definovat výstupní napětí pomocí paralelní napěťové ochranné sestavy.

3.3 Výpočty hodnot a výběr součástek

V předchozí kapitole jsem objasnil koncepci zdroje, které bych se při dalším vývoji rád držel. V následujících kapitolách se tedy pokusím nalézt vhodné součástky pro výrobu zdroje a vypočítám jejich potřebné parametry

3.3.1 Transformátor



Obrázek 2 - předběžné elektrické schéma transformátoru s usměrňovačem

Při hledání vhodného transformátoru pro aplikaci ve vyvíjeném zdroji musím brát v úvahu více faktorů. Hlavní požadavky na parametry transformátoru jsou dány odebíraným proudem, výstupním napětím, jeho oteplením při maximálním zatížení s ohledem na teplotu okolí a dalšími speciálními požadavky na jiskrově bezpečná zařízení.

Jak jsem již naznačil, vzhledem k tomu, že se jedná o zařízení určené pro napájení obvodů v prostorách s nebezpečím výbuchu, musím při návrhu transformátoru a ostatních částí zdroje vycházet z platných předpisů a norem, které mají striktní požadavky na bezpečnost.

Z normy 60079-11 vyplývá, že vstupy síťových bezporuchových transformátorů pro napájení jiskrově bezpečných obvodů musí být chráněny pojistkami. Volba pojistek záleží na typu konstrukce transformátoru.

V mém případě se jedná o transformátor s konstrukcí typu 2 s pevnou izolací mezi primárním a sekundárním vinutím. Tato konstrukce je vhodná pro svou lepší účinnost (lepší magnetická vazba mezi vinutími než u transformátoru s vinutími vedle sebe nebo na oddělených sloupcích jádra) a absenci kovové stínící fólie mezi vinutími, která vyžaduje zemnicí vodič.

Tloušťka izolace mezi primárním a sekundárním vinutím transformátoru musí splňovat takzvanou izolační vzdálenost přes pevnou izolaci podle tabulky č. 5, norma 60079-11. Z této tabulky při použití síťového napájecího napětí vyplývá minimální tloušťka izolace mezi vinutími 1 mm s izolační pevností 2500 V. Teplotní odolnost izolace musí být vyšší než maximální vnitřní teplota transformátoru.

Po konzultaci s firmou jsem se rozhodl pro omezení maximální teploty uvnitř transformátoru tepelnou pojistkou na 100 °C. Při použití vnitřní tepelné pojistky pak norma 60079-11 připouští v napájecí větvi primárního vinutí použití pouze jedné tavné pojistky. Pokud bych tepelnou pojistku vynechal, musel bych použít samostatnou pojistku pro každé přívodní vedení.

S firmou jsem také konzultoval výstupní napětí a z důvodu potřeby vytvoření napěťové rezervy pro první stupeň zdroje (úbytek na omezovacím rezistoru) při zatížení jsme zvolili výstupní napětí cca ~ 24 V.

Transformátor s popsanými vlastnostmi byl zadán k zakázkové výrobě.



Obrázek 3 - vyrobený transformátor ve zdroji

3.3.1.1 Výpočet tavné pojistky a předřadného rezistoru

Každá tavná pojistka má uvedený parametr maximálního přerušovacího proudu, to je maximální možný proud, který je pojistka schopna přerušit tak, aby nedošlo ke vzniku elektrického oblouku mezi terminály pojistky. Vzhledem k tomu, že tato pojistka bude sloužit k zajištění jiskrové bezpečnosti, musí být definována maximální hodnota proudu, který přes ni bude protékat. Tuto proudovou hodnotu definují přidáním předřadného rezistoru. Proud je omezen také vlastním odporem primárního vinutí, to však při výpočtech zanedbám.

Nejprve potřebuji znát proud primárním vinutím transformátoru při plném zatížení zdroje v bezporuchovém stavu. K hodnotě se dostanu zpětným výpočtem pomocí známého výstupního proudu, odhadovaných ztrát v obvodech zdroje ve výši 10% z výstupního proudu (ochrany, stabilizátory) a odhadované účinnosti transformátoru (u podobných transformátorů běžně více než 60%).

$$I_{N1} = \frac{I_{N2} * 1,1}{\eta_t} * \frac{U_{N2}}{U_{N1}} = \frac{0,2 * 1,1}{0,6} * \frac{24}{230} = 38,26 [mA] \quad (1)$$

Nejbližší běžně dostupná hodnota tavné pojistky dle katalogů výrobců je 50 mA. Při vybírání pojistky beru v úvahu její dostupnost, velikost, napěťový rozsah a maximální přerušovací proud. Jako nejvhodnější se mi jeví použití pojistky MST 250/50 mA.

Nyní vypočítám hodnotu předřadného rezistoru. Vycházím z toho, že maximální přerušovací proud mnou vybrané pojistky je 35 A. Dále vycházím z toho, že horní hranice síťového napětí je 230 V + 10%.

$$R_{pr} = \frac{U_{N1} * 1,1}{I_{bc1}} = \frac{230 * 1,1}{35} = 7,229 [\Omega] \quad (2)$$

Nejbližší běžně prodávaná hodnota rezistorů je $8,2 \Omega$ s tolerancí 5% ($7,79 - 8,61 \Omega$). Pro zařízení kategorie 1 a 2 skupiny I a II musí být dle normy 60079-11 rezistory zajišťující jiskrovou bezpečnost omezením proudu navrženy jako takzvané bezporuchové. **Abychom mohli na tento omezovací rezistor pohlížet jako na bezporuchový, nesmí být v normálním provozu ani při poruchovém stavu zatížen na více než 2/3 hodnot jeho maximálního napětí, proudu nebo výkonu.** Poslední, co tedy potřebuji k nalezení vhodné součástky je výpočet minimální výkonové zatížitelnosti. [7]

Maximální proud předřadným rezistorem je definován výše uvedenou tavnou pojistkou. Při použití tavné pojistky se však podle normy 60079-11 považuje za trvale protékající proud 1,7 násobek jmenovité hodnoty pojistky. V tomto případě tedy uvažuji proud 85 mA. Při výpočtu uvažuji méně příznivé hodnoty.

$$P_{R_{pr}} = R_{pr} * I^2 = 8,61 * 0,085^2 = 62,21 [mW] \quad (3)$$

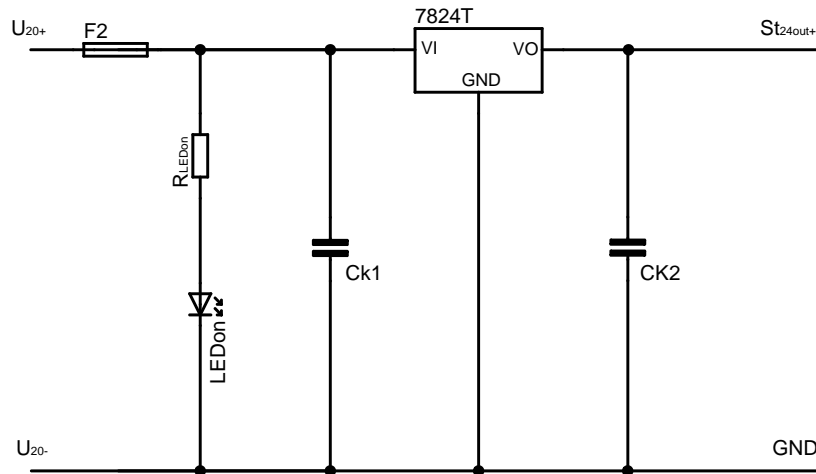
Tuto hodnotu jsem vynásobil koeficientem 1,5 (tak, aby nebyl rezistor zatížen na více než 2/3 jmenovitého výkonu) a zjistil jsem, že potřebuji rezistor se zatížitelností větší než 94 mW.

3.3.1.2 Usměrňovač a filtrační kondenzátor

K usměrnění použiji Graetzův můstek se čtyřmi křemíkovými diodami. Maximální možné napětí na diodě v závěrném směru je dáno maximálním napětím amplitudy vstupního napětí sníženého o úbytek na diodě usměrňovače v propustném směru. Ve výsledku tedy $24 \text{ V} + 10\%$ (výstup transformátoru s tolerancí) tj. $37,4 \text{ V}$ po usměrnění snížených o $0,6 \text{ V}$ (úbytek na jedné diodě). Dioda tedy musí vydržet minimálně $36,8 \text{ V}$ v závěrném směru. Maximální proud diodou v propustném směru je dán tavnou pojistkou za sekundárním vinutím. Hodnotu pojistky jsem zvolil s ohledem na výstupní proud a ztráty ve vnitřních obvodech zdroje na 250 mA . Počítám s úbytkem napětí na diodě v propustném směru $0,7 \text{ V} \pm 20\%$. Z výše uvedeného mi vychází, že budu potřebovat diodu s minimální zatížitelností $P_D = U_F * I_F = (0,7 * 1,2) * 0,25 = 0,21 \text{ W}$. Tomu odpovídá například běžně používaná a dostupná dioda 1N4007.

Za usměrňovač je potřeba zařadit také vyhlazovací kondenzátor, jehož hodnotu jsem stanovil s velkou rezervou na $1000 \mu\text{F}$ tak, aby byly zachovány dobré filtrační vlastnosti po dlouhou dobu. Nevýhodou je velký proudový odběr při startu zdroje, ten je však omezen předřadným odporem transformátoru. Přesný výpočet hodnoty kondenzátoru proto nemá hlubší význam. Za kondenzátor jsem zařadil také volitelnou tlumivku 1 mH , která by měla zbrzdit proud při připojení zátěže.

3.3.2 Stabilizace na 24 V a signalizace napájení



Obrázek 4 - předběžné elektrické schéma stabilizace na 24V

Jak jsem již uvedl v úvodu kapitoly, pro zajištění stabilního napájecího napětí vnitřních obvodů zdroje je za usměrňovač zařazen stabilizátor napětí na 24 V. Následujícími výpočty jsem si ověřil, že výstupní napětí můstku neklesne pod úroveň 24 V a tím tedy, že volba 24 V napěťového stabilizátoru je správná. Ve vzorcích uvažuji nekonečnou kapacitu filtračního kondenzátoru připojeného k usměrňovači.

Nejprve tedy vypočítám dolní hranici (v rámci tolerance síťového napětí -6% a úbytku na diodě -20% z uvažovaných 0,7 V) výstupního napětí usměrňovače:

$$U_{20} = \sqrt{2}U_{2ef} - 2U_D = \sqrt{2} * 24 * 0,94 - 2 * 0,7 * 0,8 = 30,78 \text{ [V]} \quad (4)$$

Tuto hodnotu dále dosadím do vzorce pro výpočet napětí $U_{2\infty}$ na výstupu usměrňovače při plné zátěži. [11] Dosazenou hodnotu vnitřního odporu transformátoru jsem stanovil odhadem po konzultaci s výrobcem na 4 Ω (později ověřeno měřením), odpor zátěže při plném zatížení (200 mA) získám z Ohmova zákona, tedy $R_Z = U_{out} / I_Z = 60 \Omega$.

$$U_{2\infty} = U_{20} \left(1 - \sqrt{\frac{R_i}{2R_Z}} \right) = 30,78 \left(1 - \sqrt{\frac{4}{2 * 60}} \right) = 25,16 \text{ [V]} \quad (5)$$

Pro vhodnou volbu součástky a chladiče je dále zapotřebí určit její maximální výkonové ztráty při běžném provozu ($U_{out} = 12 \text{ V}$, $I_Z = 200 \text{ mA}$).

Při výpočtu uvažuji maximální hodnoty napětí, které se může objevit na vstupu stabilizátoru při maximálním zatížení zdroje (při horní hranici tolerance napájecího napětí +10% a úbytku na diodě + 20% z uvažovaných 0,7 V).

$$U_{20} = \sqrt{2}U_{2ef} - 2U_D = \sqrt{2} * 24 * 1,1 - 2 * 0,7 * 1,2 = 35,66 \text{ [V]} \quad (6)$$

Výkon na stabilizátoru vychází z následující rovnice.

$$P_{st24\ max} = (U_{20} - U_{st24\ out})I_Z = (35,66 - 24) 0,2 = 2,332 [W] \quad (7)$$

Na základě výše uvedených výpočtů musí stabilizátor splňovat následující parametry – musí odolávat vstupnímu napětí až 37,2 V (viz kapitola 2.2.1.2 – maximální výstupní napětí usměrňovače), proudová zatížitelnost musí být větší než 200 mA a musí vydržet výkonovou ztrátu větší než 2,332 W. Tomu odpovídá běžně dostupná součástka L7824 od firmy *STMicroelectronics*.

Při návrhu je dále nutné počítat s maximální provozní teplotou okolí (zadáno 60 °C) a vlastním ohřevem součástky, který vede ke snížení její zatížitelnosti. Z toho vyplývá, že je nutné navrhnout vhodný chladič. Při návrhu chladiče vycházím z hodnot uvedených v datovém listu výrobce použitého stabilizátoru. Pro návrh chladiče je zásadní maximální přípustná teplota čipu součástky a tepelné odpory přechodu tepla z čipu do pouzdra a dále z pouzdra na chladič. Maximální přípustná teplota čipu se udává 150 °C, to je však teplota, při které již hrozí zničení součástky. Při návrhu se proto pokusím, aby došlo k maximálnímu ohřevu na 130 °C. [17]

Z výše uvedeného vychází rezerva 70 °C na ohřev součástky a chladiče. Z tabulky 1 (převzato z datového listu výrobce) je vidět, že tepelný odpor přechodu z čipu do pouzdra součástky je $R_{thj-case} = 5\text{ °C/W}$, k tomu uvažuji odpor přechodu mezi pouzdrům a chladičem 0,2 °C/W (běžná hodnota při použití tenké vrstvy tepelně vodivé pasty). Je tedy zřejmé, že při vypočítaném maximálním výkonu na stabilizátoru se součástka při maximálním výkonu ohřeje o teplotu

$$\Delta T_{j-c} = R_{thj-c} * P_{st24\ max} = 5 * 2,332 = 11,66 [°C] \quad (8)$$

Na přechodu mezi pouzdrům a chladičem vzniká při maximálním výkonu tepelný spád

$$\Delta T_{c-hs} = R_{thc-hs} * P_{st24\ max} = 0,2 * 2,332 = 0,4664 [°C] \quad (9)$$

Z toho vyplývá, že na ohřev chladiče zbývá teplotní rezerva

$$\Delta T_{hs-a\ max} = \Delta T_{j\ max} - \Delta T_{a\ max} - \Delta T_{j-c} - \Delta T_{c-hs} = 57,87 [°C] \quad (10)$$

Dále pomocí známého maximálního výkonu vypočítám maximální přípustný tepelný odpor chladiče $R_{thc-a\ max}$

$$R_{thc-a\ max} = \frac{\Delta T_{hs-a\ max}}{P_{st24\ max}} = \frac{57,87}{2,332} = 24,82 [°C/W] \quad (11)$$

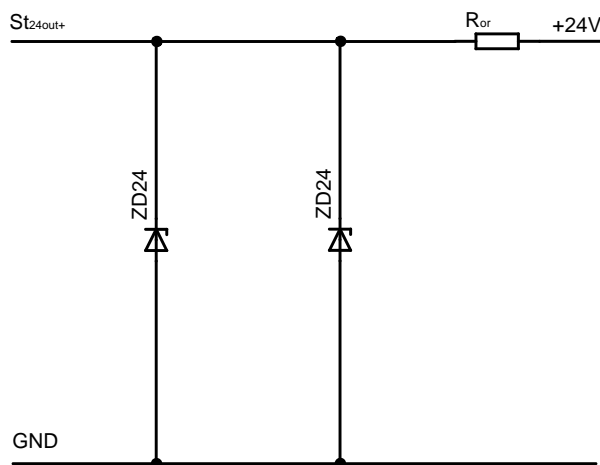
Tuto podmínku splňuje například chladič DO1A s tepelným odporem 21 °C/W od firmy *Stonecold*.

Na výstup napěťového stabilizátoru bude připojena zelená LED signálka indikující napájecí napětí pro vnitřní obvody zdroje. Proud signálkou bude omezen na 2 mA rezistorem R_{LEDon} . Použijí LED BL-B2141-L od firmy *Bright LED Electronics corp.*, která má při 2 mA úbytek napětí 1,8 V. [2]

$$R_{LEDon} = \frac{U_{st24out} - U_{LEDon@2mA}}{I_{LEDon}} = \frac{24 - 1,8}{0,002} = 11,1 \text{ [k}\Omega\text{]} \quad (12)$$

Nejbližší běžně prodávaná hodnota je 12 k Ω .

3.3.3 Sestava proudové ochrany



Obrázek 5 - předběžné elektrické schéma sestavy proudové ochrany

Bloky paralelní napěťové ochrany na 24 V a proudového omezovacího rezistoru v blokovém schématu k sobě neodmyslitelně patří, proto se v této kapitole budu věnovat oběma.

Pro zajištění jiskrové bezpečnosti je potřeba, aby výstupní zkratový proud při stanoveném napětí nepřekročil přípustné hodnoty pro zařízení dané skupiny podle tabulky A.1 (dovolené zkratové proudy pro odpovídající napětí a skupinu zařízení) normy 60079-11. V mém případě, kdy vyvíjím zdroj s výstupním napětím 12 V, není hodnota maximálního proudu v tabulce uvedena. Velikost výstupního proudu však musí být definovaná s ohledem na celkový špičkový výkon zdroje. Další oblastí, která je maximálním výstupním proudem ovlivněna, je maximální možná vnitřní indukčnost zařízení připojených na výstupní svorky zdroje (má vliv například na délku propojovacího kabelu). Z těchto důvodů se snažím omezit proud na hodnotu blízkou se požadovaným parametrům zdroje. [7]

Pro omezení proudu použiji omezovací rezistor v kombinaci s napěťovou ochranou, která bude jasně definovat maximální proud rezistorem. Proud nemohu omezit na hodnotu výstupního proudu, neboť za ochranným rezistorem se nacházejí ještě další obvody zajišťující správné provozní parametry zdroje a úbytek napětí na omezovacím rezistoru by znemožnil jejich funkci. Omezovací rezistor však nelze přesunout za tyto prvky, neboť by způsoboval proměnlivé výstupní napětí zdroje, které však při proudu 200 mA nesmí za normálních podmínek klesnout pod 12V.

Potřebuji tedy vytvořit napěťovou rezervu pro tyto obvody a výstupní napětí ve výši cca 18 V (12 V výstupní napětí + 6 V pro správnou funkci stabilizátoru a elektronického omezovače proudu).

Rezistor musí být navržen tak, aby na něj bylo nahlíženo jako na bezporuchový prvek. Stejně tomu bylo také u předřadného rezistoru k transformátoru, proto již nebudu popisovat principy a přistoupím přímo k výpočtu hodnoty.

Pro definované maximální napětí na rezistoru při poruše (jiskření zkratováním výstupu zdroje a poruchách vnitřních obvodů zdroje) jsem zvolil Zenerovy diody. Z normy 60079-11 vyplývá, že při použití *paralelního omezovače napětí* tvořeného Zenerovými diodami, který je napájen z *bezporuchového transformátoru*, musí být tyto omezovače ztrojeny. V mém případě, kdy použiji diody testované předepsaným postupem, stačí ochrany zdvojené. Jedná se o lepší případ, neboť za jiných podmínek by ochrana muselo být ještě více. [2]

Omezovač jsem nastavil na napětí 24 V, tedy takové, u jakého mohu snadno zajistit, že při provozním stavu nebudou ochranné prvky aktivovány (překročení Zenerova napětí diod) a nedojde k přerušení činnosti zdroje vlivem přepálení tavných pojistek (s malým parazitním proudem ochrannami se při návrhu pojistek počítá). Právě z tohoto důvodu je v blokovém schématu před soustavu proudové ochrany zařazen napěťový stabilizátor na 24 V.

Diody i rezistor mají obvykle výrobní toleranci hodnot $\pm 5\%$, při výpočtech tedy budu uvažovat méně příznivé hodnoty. Diody zajišťující jiskrovou bezpečnost musí být dostatečně dimenzovány a splňovat požadavky norem. Dle normy 60079-11 nesmí být součástky (v zařízeních kategorie 1 a 2 obou skupin), na kterých závisí jiskrová bezpečnost zatíženy na více než $2/3$ výkonu. Při výpočtu minimální zatížitelnosti diod se uvažuje 1,7 násobek jmenovité hodnoty proudu tavné pojistky. Stejně tomu bylo i v kapitole 2.2.1.1.

Pomocí následujících vztahů stanovím maximální potřebnou zatížitelnost diody $P_{zd24_{min}}$. První vztah slouží ke zjištění maximálního výkonu na diodě při poruše.

$$P_{zd24} = U_{zd24} * I_n = (24 * 1,05) * (0,25 * 1,7) = 10,71 [W] \quad (13)$$

V následujícím vztahu zohledním požadavek normy na maximální zatížení ochranného prvku (2/3 jmenovité hodnoty). Hodnotu maximálního výkonu na diodě tedy vynásobím koeficientem 1,5.

$$P_{zd24_{min}} = P_{zd24} * 1,5 = 16,07 [W] \quad (14)$$

Dalo by se očekávat, že vyhledám nejbližší Zenerovu diodu s dostatečnou zatížitelností, ale studiem jsem zjistil, že u diod hraje velkou roli degradace zatížitelnosti diody vlivem jejího oteplení, to vede k potřebě dobrého chlazení.

Výpočtem jsem zjistil, že v případě použití výkonové diody BZY93C24 (zatížitelné na 20 W) bych musel při uvažované maximální teplotě okolí 60 °C použít chladič s teplotním odporem cca 1,5 °C/W. Tomu by odpovídal chladič o rozměrech přibližně 216 x 40 x 70 mm. Vyvíjený zdroj je určen pro montáž na lištu DIN 35, pokud bych použil zmíněný chladič, nebylo by možné dosáhnout rozumné celkové velikosti zdroje. Z toho důvodu jsem přistoupil k volbě Zenerovy diody s větší zatížitelností a to konkrétně 50 W (další v katalogu) typ 1N3321B od firmy *Microsemi*.

Z datového listu diody jsem vyčetl maximální tepelný odpor z polovodičového přechodu do pouzdra součástky $R_{thj-c} = 2 \text{ °C/W}$. Přechod z pouzdra na chladič uvažuji opět 0,2 °C/W. Maximální přípustná teplota polovodičového přechodu je 175 °C, to je však hodnota, při které již může dojít k poškození součástky. Proto si zvolím maximální teplotu přechodu 145 °C, maximální teplotu okolí uvažuji 60 °C.

Při maximálním výkonu se dioda ohřeje o ΔT_{j-c}

$$\Delta T_{j-c} = R_{thj-c} * P_{zd24_{min}} = 2 * 16,07 = 32,14 [^{\circ}\text{C}] \quad (15)$$

Na tepelném přechodu mezi pouzdem součástky a chladičem vzniká rozdíl ΔT_{c-hs}

$$\Delta T_{c-hs} = R_{thc-hs} * P_{zd24_{min}} = 0,2 * 16,07 = 3,214 [^{\circ}\text{C}] \quad (16)$$

Pro ohřev chladiče mi tedy zůstává rezerva $\Delta T_{hs-a \text{ max}}$

$$\Delta T_{hs-a \text{ max}} = \Delta T_{j \text{ max}} - \Delta T_{a \text{ max}} - \Delta T_{j-c} - \Delta T_{c-hs} = 49,65 [^{\circ}\text{C}] \quad (17)$$

Maximální přípustný tepelný odpor chladiče získám ze vztahu

$$R_{thc-a \text{ max}} = \frac{\Delta T_{hs-a \text{ max}}}{P_{zd24_{min}}} = \frac{49,65}{16,07} = 3,090 [^{\circ}\text{C/W}] \quad (18)$$

Jako vhodný se jeví například chladič SK48-50-SA-3 s teplotním odporem 2,9 °C/W od firmy *Fischer elektronik*. [8]

Pro dokončení návrhu sestavy proudového omezení zbývá určit hodnotu odporu a maximální zatížitelnost omezovacího rezistoru. Jak jsem již dříve uvedl, počítám s napěťovou rezervou 18 V (pro zajištění funkčnosti následných obvodů). Počítám s méně příznivými hodnotami součástek.

$$R_{or} = \frac{U_{zd24} - 18}{I_{or}} = \frac{(24 * 1,05) - 18}{0,2} = 36 [\Omega] \quad (19)$$

Pomocí následujícího vztahu určím minimální přípustnou zatížitelnost rezistoru v poruchovém stavu, tedy při 1,7 násobku jmenovité hodnoty tavné pojistky. Použiji také koeficient 1,5, který zajistí, že součástka nebude zatížena na více než 2/3 její zatížitelnosti.

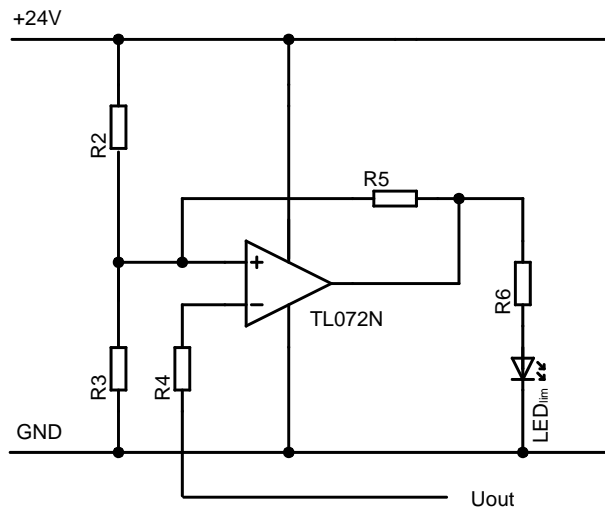
$$P_{or_{min}} = (R_{or} * (I_n * 1,7)^2) * 1,5 = (36 * 1,05) * (0,25 * 1,7)^2 * 1,5 = 10,24 [W] \quad (20)$$

Získaná hodnota překračuje hodnotu zatížitelnosti 10W. Prakticky bych proto volil paralelní kombinaci dvou rezistorů o hodnotě odporu 75 Ω a zatížitelnosti 7 W. Po opětovném dosazení jsem zjistil, že je to možné. Použiji rezistory firmy Welwyn components řady W22. [20]



Obrázek 6 - sestava proudové ochrany v hotovém zdroji

3.3.4 Signalizace přetížení zdroje



Obrázek 7 - předběžné schéma zapojení signalizace přetížení

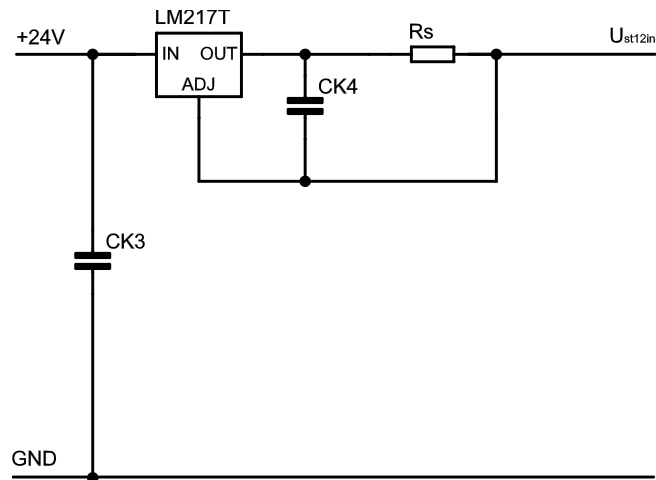
Elektronický omezovač proudu začne při dosažení udaného výstupního proudu zvyšovat svůj dynamický odpor tak, aby nedošlo k překročení této hodnoty. To má za důsledek pokles výstupního napětí, kterého využijí pro detekci přetížení zdroje. Signalizace bude řízena operačním zesilovačem zapojeným jako invertující komparátor s hysterezí.

Operační zesilovač bude napájen z prvního stupně zdroje, který mu zajistí stabilní napájecí napětí i při zkratu na výstupu zdroje. Signálka by se měla rozsvítit při poklesu výstupního napětí na 11 V a pohasnout po opětovném vystoupení na 11,5 V.

Z výše uvedeného jsem pomocí známých vztahů pro výpočet komparačních hodnot došel k hodnotám $R2 = 24 \text{ k}\Omega$, $R3 = 27 \text{ k}\Omega$, $R5 = 620 \text{ k}\Omega$. [12] Podrobný výpočet těchto hodnot je poměrně rozsáhlý a nemá hlubší smysl jej v tomto případě popisovat. Tyto součástky nepodléhají striktním požadavkům a správnou funkčnost jednoduše ověřím při realizaci zdroje.

Rezistor R4 je na vstup zařazen kvůli dodržení bezpečnosti. V případě poruchy operačního zesilovače by totiž přes tento přívod mohl do výstupu zdroje téct nebezpečný proud. Vzhledem k tomu, že cesta slouží pouze pro sledování výstupního napětí, mohu zvolit hodnotu rezistoru dostatečně vysokou na to, aby případný proud přitékající přes tento rezistor měl zanedbatelný vliv na bezpečnostní parametry zdroje. Zvolím tedy jednoduše dostupnou hodnotu 100 k Ω , přes který by v případě poruchy mohl téct proud o maximální hodnotě 0,25 mA. Přes snímací rezistor se za určitých okolností může na výstup dostat také nebezpečné napětí, proto je nutné výstupní napětí snímat ještě před napěťovými ochranami na výstupu zdroje - tomu se budu věnovat v kapitolách o návrhu desky plošných spojů.

3.3.5 Elektronický omezovač proudu



Obrázek 8 - předběžné elektrické schéma elektronického omezovače proudu

Při běžných provozních podmínkách může dojít k situacím, kdy by došlo k aktivaci ochran jiskrové bezpečnosti. To by se mohlo stát například v případech, kdy dojde ke zkratům při připojování zátěže ke zdroji nebo při jeho přetěžování. Z tohoto důvodu je ve zdroji zařazen elektronický omezovač proudu. Ten je nastaven na požadovaný maximální výstupní proud zátěží tj. 200 mA.

Elektronický omezovač jsem se rozhodl realizovat pomocí snímacího rezistoru a lineárního stabilizátoru napětí nejnižší vyráběné hodnoty 1,2 V. Snímací rezistor bude zapojen mezi výstupem a řídicím vstupem stabilizátoru. Stabilizátor napětí tedy bude regulovat proud udržováním konstantního napěťového úbytku na rezistoru. Hodnotu rezistoru volím tak, aby byl při proudu 200 mA na rezistoru úbytek napětí právě 1,2 V.

$$R_{sr} = \frac{U_{sr}}{I_z} = \frac{1,2}{0,2} = 6 \text{ } [\Omega] \quad (21)$$

Rezistor musí být dostatečně dimenzovaný, proto určím jeho minimální požadovanou zatížitelnost.

$$P_{sr} = R_{sr} \cdot I_z^2 = 6 \cdot 0,2^2 = 0,24 \text{ } [W] \quad (22)$$

Jelikož bude rezistor plně zatížen i při běžném provozním stavu, z důvodu udržení nižších teplot součástky zvolím rezistor zatížitelný na 1 W, který má obecně větší pouzdro s lepším rozptylem teploty (nižším tepelným odporem).

Při výběru vhodného napěťového stabilizátoru musím brát ohled především na parametry jeho maximálního vstupního napětí, maximálního dovoleného proudu, celkové zatížitelnosti a také jeho mechanické provedení. Ve všech těchto ohledech se jeví jako vhodný napěťový stabilizátor typ LM217T v pouzdře TO-220 firmy

STMicroelectronics. Výrobce v datovém listu uvádí, že pro správnou funkci stabilizátoru je zapotřebí, aby byl rozdíl mezi jeho výstupním a vstupním napětím alespoň 3 V. Tato podmínka je splněna díky uvažování napěťové rezervy při návrhu proudové ochrany. Pro zajištění správné funkčnosti stabilizátoru důležité, aby při provozních podmínkách nebyla překročena maximální přípustná teplota čipu součástky. Tato teplota je datovém listu stanovena na 150 °C. Při návrhu chladiče však stejně jako v případě návrhu předchozího napěťového stabilizátoru počítám s teplotní rezervou tak, aby čip při okolní teplotě 60 °C nepřekročil 130 °C. Nejhorší stav z hlediska výkonových ztrát na tomto stabilizátoru napětí nastane při zkratování výstupu, kdy je rozdíl mezi vstupním a výstupním napětím součástky největší. Stabilizátor bude v tomto případě zatížen výkonem P_{sto} . [18]

$$P_{sto} = (U_{st24out} - U_{or@0,2A} - U_{sr@0,2A}) * I_Z = (24 - 6,8 - 1,2) * 0,2 = 3,2 [W] \quad (23)$$

Při maximálním výkonu se pouzdro součástky ohřeje o ΔT_{j-c} . Tepelný odpor z čipu do pouzdra je 5 °C/W, odpor přechodu z pouzdra na chladič uvažuji 0,2 °C.

$$\Delta T_{j-c} = R_{thj-c} * P_{sto} = 5 * 3,2 = 16 [^{\circ}C] \quad (24)$$

Na tepelném přechodu mezi pouzdem součástky a chladičem vzniká rozdíl ΔT_{c-hs}

$$\Delta T_{c-hs} = R_{thc-hs} * P_{sto} = 0,2 * 3,2 = 0,64 [^{\circ}C] \quad (25)$$

Pro ohřev chladiče mi tedy zůstává rezerva $\Delta T_{hs-a max}$

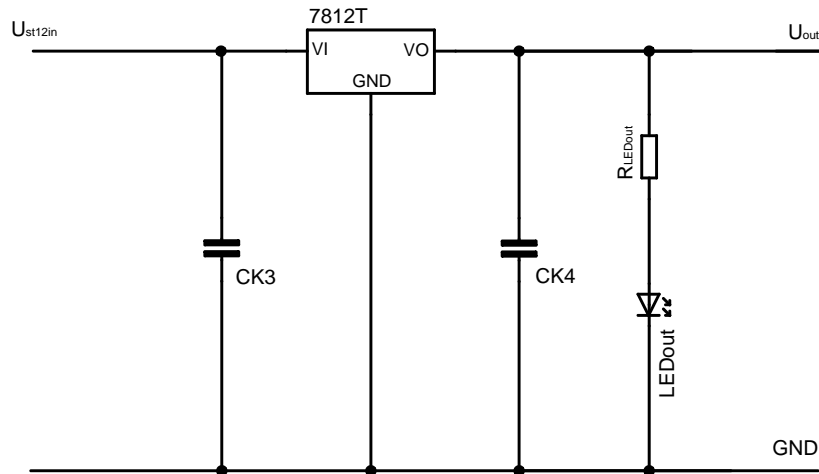
$$\Delta T_{hs-a max} = \Delta T_{j max} - \Delta T_{a max} - \Delta T_{j-c} - \Delta T_{c-hs} = 53,36 [^{\circ}C] \quad (26)$$

Maximální přípustný tepelný odpor chladiče získám ze vztahu

$$R_{thc-a max} = \frac{\Delta T_{hs-a max}}{P_{sto}} = \frac{53,36}{3,2} = 16,68 [^{\circ}C/W] \quad (27)$$

Tomu odpovídá například chladič PR19/20/SE s teplotním odporem 15 °C/W od firmy *AluTronic*. [1]

3.3.6 Stabilizace na 12 V a signalizace napětí na výstupu



Obrázek 9 - předběžné elektrické schéma stabilizace na 12V

Z hlediska jiskrové bezpečnosti musí být zajištěno, že výstupní napětí zdroje nepřesáhne definovanou hodnotu. To je zajištěno následným blokem paralelních napěťových ochran. Ochrany však nesmí být v běžném provozním stavu aktivní, proto využívám ještě napěťového stabilizátoru. Při této hodnotě napětí ještě nejsou ochrany aktivovány.

Pro zajištění stabilního výstupního napětí zdroje je tedy za proudový omezovač zařazen stabilizátor napětí na 12 V. Maximální napětí na vstupu napěťového stabilizátoru nepřekročí v běžném provozním stavu 24 V (dáno předřazeným 24 V stabilizátorem) a proud nepřesáhne 200 mA (dáno předřazeným proudovým omezovačem). Pro vhodnou volbu součástky a chladiče je potřeba určit její maximální výkonové ztráty při běžném provozu ($U_{out} = 12 \text{ V}$, $I_Z = 200 \text{ mA}$). Vstupní napětí tohoto stabilizátoru je dáno rozdílem výstupního napětí předřazeného stabilizátoru na 24 V a úbytkem na omezovacím rezistoru a elektronickém proudovém omezovači (odpor jeho stabilizátoru zanedbávám, neboť je při těchto podmínkách minimální). Při plné zátěži to je tedy

$$U_{St12in} = U_{St24out} - U_{or@0,2A} - U_{epo} = 24 - 6,8 - 1,2 = 16 \text{ [V]} \quad (28)$$

Výkon na stabilizátoru vychází z následující rovnice.

$$P_{St12max} = (U_{St12in} - U_{St12out})I_Z = (16 - 12) 0,2 = 0,8 \text{ [W]} \quad (29)$$

Proudová zatížitelnost součástky musí být větší než 200 mA a musí vydržet výkonovou ztrátu větší než 0,8 W. Tomu odpovídá běžně dostupná součástka L7812 od firmy STMicroelectronics.

Při návrhu je dále nutné počítat s maximální provozní teplotou okolí (zadáno 60 °C) a vlastním ohřevem součástky. Dále je zapotřebí navrhnout vhodný chladič. Při návrhu

chladiče vycházím z hodnot uvedených v datovém listu výrobce použitého stabilizátoru. Pro návrh chladiče je zásadní maximální přípustná teplota čipu součástky a tepelné odpory přechodu tepla z čipu do pouzdra a z pouzdra na chladič. Maximální přípustná teplota čipu se udává 150 °C, to je však teplota, při které již hrozí zničení součástky. Při návrhu se proto pokusím, aby došlo k maximálnímu ohřevu na 130 °C. [17]

Z výše uvedeného vychází rezerva 70 °C na ohřev součástky a chladiče. Z datového listu výrobce jsem vyčetl, že tepelný odpor přechodu z čipu do pouzdra součástky je $R_{thj-case} = 5 \text{ °C/W}$, k tomu uvažuji odpor přechodu mezi pouzdem a chladičem 0,2 °C/W (běžná hodnota při použití tenké vrstvy tepelně vodivé pasty). Je tedy zřejmé, že při vypočítaném maximálním výkonu na stabilizátoru se součástka ohřeje o teplotu

$$\Delta T_{j-c} = R_{thj-c} * P_{st12 max} = 5 * 0,8 = 4 \text{ [°C]} \quad (30)$$

Na přechodu mezi pouzdem a chladičem vzniká při maximálním výkonu tepelný spád

$$\Delta T_{c-hs} = R_{thc-hs} * P_{st12 max} = 0,2 * 0,8 = 0,16 \text{ [°C]} \quad (31)$$

Z toho vyplývá, že na ohřev chladiče zbývá teplotní rezerva

$$\Delta T_{hs-a max} = \Delta T_{j max} - \Delta T_{a max} - \Delta T_{j-c} - \Delta T_{c-hs} = 65,84 \text{ [°C]} \quad (32)$$

Dále pomocí známého maximálního výkonu vypočítám maximální přípustný tepelný odpor chladiče $R_{thc-a max}$

$$R_{thc-a max} = \frac{\Delta T_{hs-a max}}{P_{st24 max}} = \frac{65,84}{0,8} = 82,3 \text{ [°C/W]} \quad (33)$$

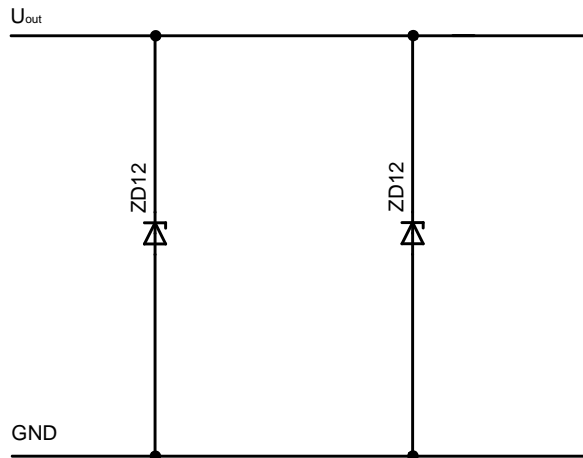
Výsledná požadovaná hodnota minimálního tepelného odporu chladiče je vyšší než hodnota tepelného odporu z čipu do okolí, znamená to tedy, že použití chladiče není nutné. Součástka bez chladiče se při teplotě okolí 60 °C ohřeje maximálně na 100 °C.

Na výstup stabilizátoru bude připojena žlutá LED signálka indikující napětí na výstupu zdroje. Proud bude omezen na 2 mA rezistorem R_{LEDout} . Použiji LED BL-B3141-L od firmy *Bright LED Electronics corp.*, která má při 2 mA úbytek napětí 1,9 V. [3]

$$R_{LEDout} = \frac{U_{st12out} - U_{LEDon@2mA}}{I_{LEDon}} = \frac{12 - 1,9}{0,002} = 5,05 \text{ [k}\Omega\text{]} \quad (34)$$

Nejbližší běžně prodávaná hodnota je 5 kΩ.

3.3.7 Paralelní napět'ové ochrany na 12 V



Obrázek 10 - předběžné elektrické schéma 12V napět'ové ochrany

V předchozí kapitole jsem zmínil, že výstupní napětí zdroje nesmí překročit jeho předem stanovenou hodnotu, a to ani při poruchovém stavu. Je tomu tak proto, aby nedošlo k poškození připojených zařízení umístěných ve výbušném prostředí, což by mohlo vést k nebezpečí výbuchu. Pro definování maximálního výstupního napětí zdroje jsem tedy zařadil paralelní ochranu napětí tvořenou Zenerovými diodami o jmenovité hodnotě Zenerova napětí 12 V. Norma 60079-11 stanovuje, že součástky zajišťující jiskrovou bezpečnost v zařízeních kategorie *ia* a *ib* (kategorie 1 a 2 obou skupin) musí být zatěžovány maximálně na 2/3 jejich stanovené zatížitelnosti (tomu odpovídá koeficient 1,5). V případě poruchy se dále uvažuje maximální hodnota proudu ochranou odpovídající 1,7 násobku jmenovité hodnoty použité pojistky. [7]

Maximální uvažovaný výkon na diodě je tedy

$$P_{zd12} = U_{zd12} * I_n = (12 * 1,05) * (0,25 * 1,7) = 5,355 [W] \quad (35)$$

Z výše napsaného odvodím minimální potřebnou zatížitelnost Zenerovy diody

$$P_{zd12_{min}} = P_{zd} * 1,5 = 8,033 [W] \quad (36)$$

Podobně, jako tomu bylo u proudové ochrany, musím i v tomto případě uvažovat s degradací zatížitelnosti diody vlivem jejího oteplení. Jako vhodné se předběžně jeví použití diody BZY93C12 od firmy *Philips* nebo jejího ekvivalentu.

Z datového listu diody jsem vyčetl maximální tepelný odpor z polovodičového přechodu do pouzdra součástky $R_{thj-c} = 5 \text{ } ^\circ\text{C/W}$. Přechod z pouzdra na chladič uvažuji opět $0,2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$. Maximální přípustná teplota polovodičového přechodu je $175 \text{ } ^\circ\text{C}$, to je však hodnota, při které již může dojít k poškození součástky. Proto si zvolím maximální teplotu přechodu $145 \text{ } ^\circ\text{C}$, maximální teplotu okolí uvažuji $60 \text{ } ^\circ\text{C}$. [14]

Při maximálním uvažovaném výkonu se dioda ohřeje o ΔT_{j-c}

$$\Delta T_{j-c} = R_{thj-c} * P_{zd12_{min}} = 5 * 8,033 = 40,17 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (37)$$

Na tepelném přechodu mezi pouzdrem součástky a chladičem vzniká rozdíl ΔT_{c-hs}

$$\Delta T_{c-hs} = R_{thc-hs} * P_{zd12_{min}} = 0,2 * 8,033 = 1,607 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (38)$$

Pro ohřev chladiče mi tedy zůstává rezerva $\Delta T_{hs-a \max}$

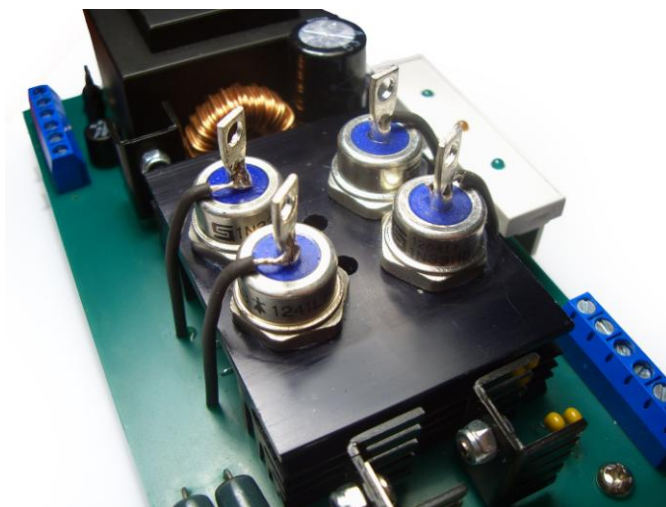
$$\Delta T_{hs-a \max} = \Delta T_{j \max} - \Delta T_{a \max} - \Delta T_{j-c} - \Delta T_{c-hs} = 43,22 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (39)$$

Maximální přípustný tepelný odpor chladiče získám ze vztahu

$$R_{thc-a \max} = \frac{\Delta T_{hs-a \max}}{P_{zd12_{min}}} = \frac{43,22}{8,033} = 5,380 \text{ [}^\circ\text{C/W]} \quad (40)$$

Je tedy možné použití například chladiče typu SK64-37SA1M3 s tepelným odporem 4,1 $^\circ\text{C/W}$ od firmy *Fischer elektronik*. [9]

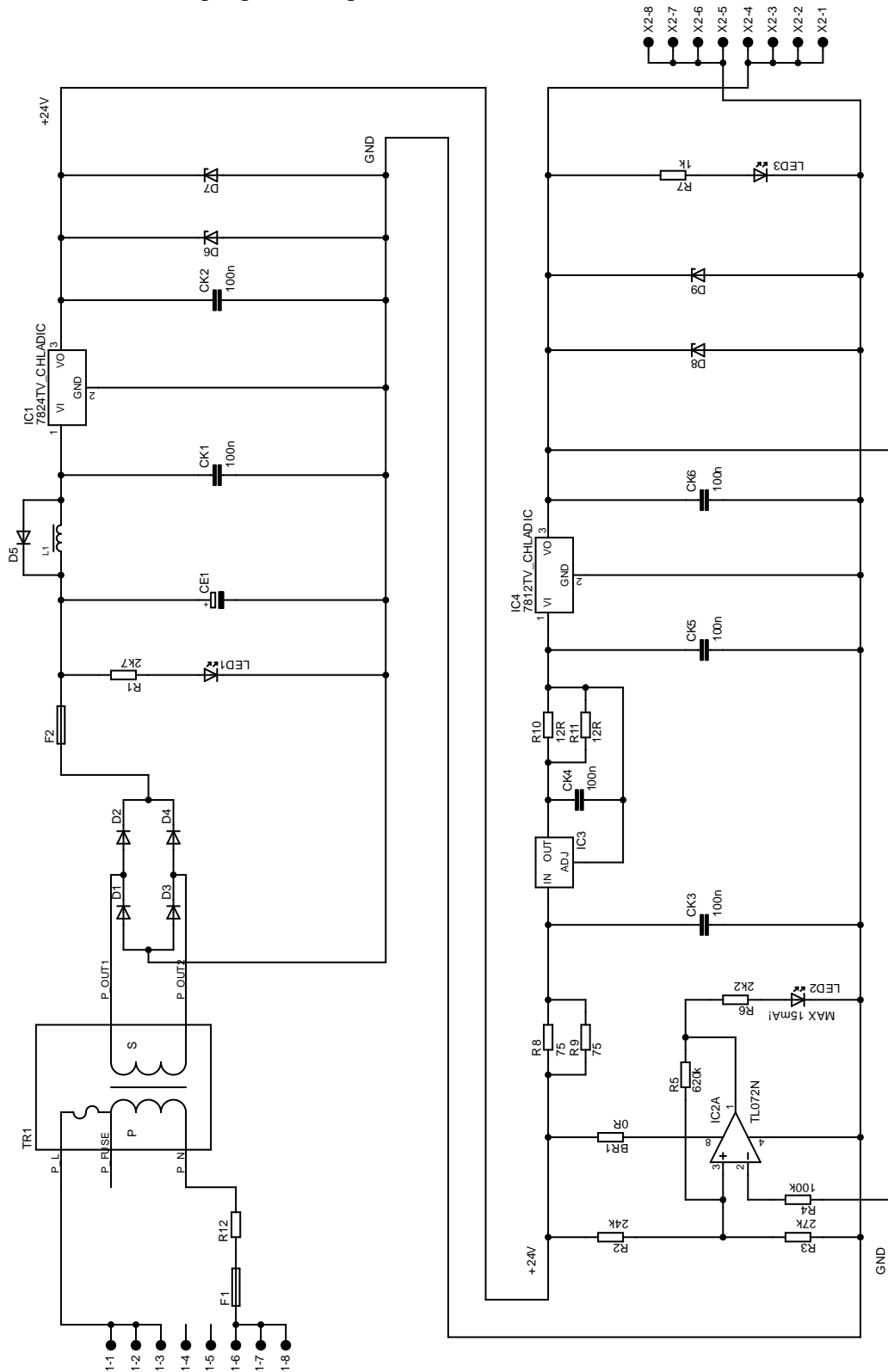
Při uvážení poruchových stavů jsem však došel k závěru, že může nastat pouze situace, kdy bude aktivována buďto jedna ze zařazených napětových ochran (24 V použitá v proudové ochraně a 12 V napětová), nebo obě z nich. V situaci, kdy budou aktivní obě diodové ochrany, však dojde k rozložení celkového výkonu mezi každou z nich. Z toho vyplývá, že je možné umístit diody 12 V napětové ochrany na tentýž chladič, který bude použit pro chlazení diod proudové ochrany. Teplotní odpor zmíněného chladiče je 2,9 $^\circ\text{C/W}$, což je dostačující hodnota pro chlazení prvků obou ochran. Hlavními výhodami takového řešení jsou úspora prostoru uvnitř zařízení a úspora financí.



Obrázek 11 - záběr na ochranné diody na společném chladiči v hotovém zdroji

3.4 Vytvoření elektrického schématu

Součásti popsané v předchozích podkapitolách jsem propojil a vytvořil elektrické schéma v návrhovém programu Eagle CAD.



Obrázek 12 - elektrické schéma navrhovaného zdroje

4 TECHNICKÁ REALIZACE

4.1 Výběr krabičky

Zdroj je určen pro použití v průmyslu. Podobná zařízení se instalují zpravidla do rozvaděčových skříní vybavených standardizovanou lištou DIN 35. Z tohoto důvodu je potřeba vybrat krabičku umožňující montáž do takových rozvaděčů. Na trhu je velké množství krabiček s možností montáže na lištu DIN 35, v mém případě je však výběr značně omezen rozměrnými součástkami a potřebou dobrého větrání pro zajištění správné funkce použitých chladičů.

Po odhadnutí potřebných rozměrů krabičky a průzkumu nabídky prodejců jsem se rozhodl pro použití krabičky od firmy Camdenboss CNMB/9/V s rozměry 159 x 90 x 58 mm. Krabička má krytí stupně IP20, což je pro můj účel dostačující. [7]



Obrázek 13 - krabička CNMB/9/V

4.2 Návrh přístrojového štítku

Aby mohl být zdroj prodáván a splňoval veškeré náležitosti, je zapotřebí jej označit štítkem s definovanými údaji. Štítek musí obsahovat vstupní i výstupní parametry zdroje, informaci o zařazení zdroje z hlediska bezpečnosti, dále bude obsahovat výrobní číslo a informaci o maximálních přípustných parametrech připojované zátěže, aby nedošlo k porušení jiskrové bezpečnosti. Výrobek se shoduje s ustanoveními všech směrnic k němu vázaných, proto bude označen také značkou CE. [19]

4.2.1 Výpočet maximálních výstupních parametrů zdroje

Kromě označení z hlediska zařazení zdroje musí štítek (pokud je to možné) obsahovat také výčet maximálních výstupních parametrů a informace o maximální přípustné indukčnosti a kapacitě zátěže, aby nedošlo k porušení bezpečnosti. [6]

Maximální výstupní napětí je definováno výstupními napět'ovými ochranami, výstupní proud je definován sestavou proudové ochrany a maximální výkon na výstupu bude při výkonově přizpůsobené zátěži, tedy ve chvíli, kdy bude elektrický odpor zátěže shodný s vnitřním odporem zdroje (uvažuji pouze omezovací rezistor R_{or} , který je navržený jako bezporuchový). Při výpočtech uvažuji také s tolerancemi daných součástek (5%).

$$U_o = U_{zd12} * 1,05 = 12,6 [V] \quad (41)$$

$$I_o = \frac{U_{zd24} * 1,05}{R_{or} * 1,05} = 0,672 [A] \quad (42)$$

$$P_o = U_o * \frac{I_o}{2} = 4,46 [W] \quad (43)$$

K těmto hodnotám je zapotřebí vyhledat v normě 60079-11 (obrázek A.2 - A.6 v normě) maximální přípustné parametry zátěže. Parametry pro jednotlivé skupiny plynů jsem vyhledal a seřadil je do tabulky.

Plynová skupina	Maximální C_o [uF]	Maximální L_o [uH]
IIC	0,5	25
IIB	3	300
I	10	700

Tabulka 2 - maximální přípustné parametry zátěže (vychází z [7])

4.2.2 Rozbor označení zdroje dle směrnice ATEX a norem

Evropská směrnice ATEX a norma 60079-0 stanovují způsob, jakým musí být nevybušná zařízení značena.


Zdroj by měl vyhovovat požadavkům pro schválení jako zařízení skupiny I (použití v dolech) i skupiny II (použití v jiných výbušných prostorách). Pro skupinu I by měl splňovat požadavky kategorie M1 (zůstává v provozu i v přítomnosti výbušné atmosféry a tedy může být zdrojem iniciace) a pro skupinu II by měl splňovat požadavky kategorie 1 (výbušná atmosféra je přítomna stále, dlouhodobě nebo často).⁴ [15]

Pro označení těchto skutečností se používají vzorce stanovené směrnicí ATEX. Tyto vzorce se skládají ze dvou částí. Povinná část obsahuje informaci o tom, že se jedná o zařízení do prostředí s nebezpečím výbuchu, informaci o skupině a kategorii, pro kterou je zařízení schváleno a informaci o druhu výbušné atmosféry (plyn nebo prachy).

Doplňkové značení dále definuje použitý druh ochrany, pro které skupiny médií podle výbušnosti je výrobek schválen a další.

⁴ viz kapitola 2.1

Odvození vzorců vysvětlím pomocí tabulek. [15][6][19]


Povinné značení dle ATEX			
1.	2.	3.	4.
	II	(1)	G

Doplňkové značení podle norem					
4.	1.	2.	3.	4.	5.
[Ex	ia	Ga]	IIB

Povinné	1.	Obecný znak pro zařízení do prostředí s nebezpečím výbuchu
	2.	Skupina II (povrch)
	3.	Kategorie zařízení 1, závorky značí zařízení umístěné mimo zónu
	4.	Výbušná atmosféra G (plyny)

Doplňkové	1.	Označení zařízení do prostředí s nebezpečím výbuchu
	2.	Symbol použitého druhu ochrany a jeho úrovně ochrany
	3.	Informace o úrovni ochrany zařízení (dle norem IEC)
	4.	Závorky značí návazné zařízení umístěné mimo zónu
	5.	Skupina zařízení IIB - etylénová skupina

Tabulka 3 - odvození vzorce pro výbušnou plynnou atmosféru[15][6][19]

Povinné značení dle ATEX		
1.	2.	3.
	I	(M1)

Doplňkové značení podle norem					
4.	1.	2.	3.	4.	5.
[Ex	ia	Ma]	I

Povinné	1.	Obecný znak pro zařízení do prostředí s nebezpečím výbuchu
	2.	Skupina I (doly)
	3.	Kategorie zařízení M1, závorky značí zařízení umístěné mimo zónu

Doplňkové	1.	Označení zařízení do prostředí s nebezpečím výbuchu
	2.	Symbol použitého druhu ochrany a jeho úrovně ochrany
	3.	Informace o úrovni ochrany zařízení (dle norem IEC)
	4.	Závorky značí návazné zařízení umístěné mimo zónu
	5.	Skupina zařízení I - doly s výskytem metanu

Tabulka 4 - odvození vzorce pro výbušnou atmosféru tvořenou prachy[15][6][19]

4.2.3 Náhled na hotový štítek

Po shromáždění všech potřebných údajů jsem se pustil do grafického návrhu štítku. Štítek bude vytištěn na pevný samolepící papír nebo plastovou fólii a umístěn na čelní stranu krabičky.

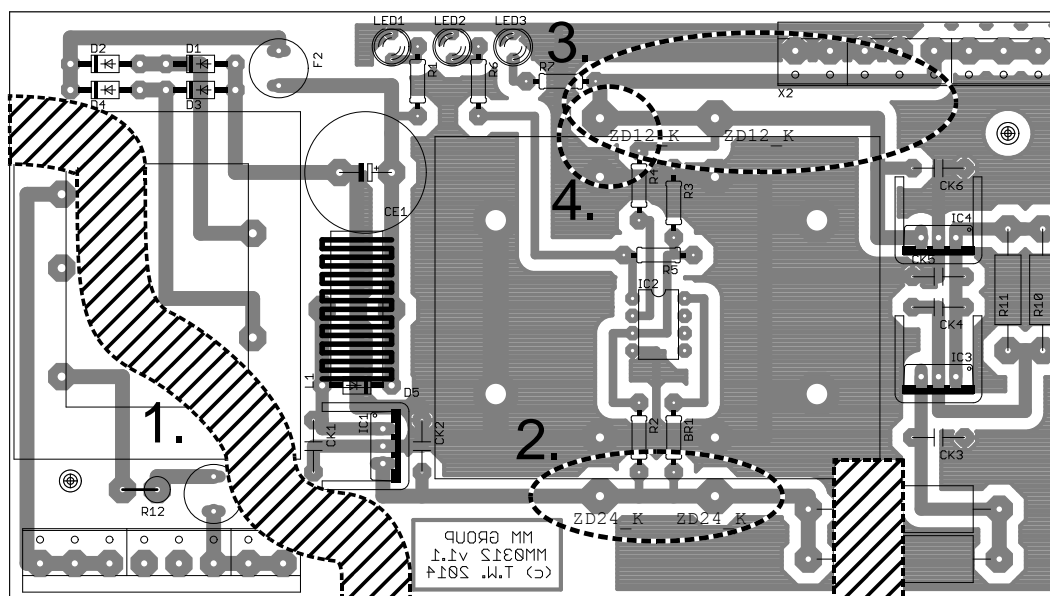


Obrázek 14 - náhled na navržený štítek v měřítku 9:10

4.3 Návrh desky plošných spojů

Deska plošných spojů tvoří důležitou část celého návrhu zdroje. Při návrhu desky je nutno dodržovat striktní požadavky norem na zařízení. Jedná se především o dodržení izolačních vzdáleností a dodržení bezpečnosti i za přítomnosti dvou započítatelných poruch a těch nezapočítatelných poruch, které způsobí nejméně příznivé podmínky. Započítatelná porucha je taková, která vznikne na bezporuchovém prvku. Na ostatní poruchy se nahlíží jako na nezapočítatelné. [15]

Na obrázku již hotové desky plošných spojů vysvětlím, čím deska zajišťuje bezpečnost zařízení. Části desky, které mají zásadní vliv na bezpečnost zdroje jsem zvýraznil čárkovaně černou barvou.



Obrázek 15 - znázornění některých bezpečnostních prvků desky (měřítko 9:10)

4.3.1 Dodržení izolačních vzdáleností

Zdroj navrhují tak, aby odpovídal typu ochrany "ia", musím tedy dodržet požadavky na odpovídající izolační vzdálenosti dle tabulky číslo 5 v normě 60079-11. [7]

Pro návrh desky plošných spojů je pro mě důležitý údaj ve sloupci s požadovanými vzdálenostmi pod nátěrem a ve sloupci s povrchovými vzdálenostmi. Za nátěr se dá považovat také nepájivá maska desky. Ta však neizoluje pájené vývody součástek, mezi kterými se uvažují povrchové vzdálenosti.

Některé důležité izolační vzdálenosti jsou v obrázku vyznačeny šrafovanými tvary označenými číslem 1.

Na vstupní svorky zdroje je přivedeno síťové napětí ~ 230 V. Z tabulky číslo 5 normy 60079-11 vyplývá, že pro takové napětí musí být dodržena povrchová vzdálenost 10 mm od jiskrově bezpečných částí obvodu a vzdálenost pod nátěrem 3,3 mm (mezi plošnými spoji pod maskou).

Dalším místem, kde je dodržení povrchových vzdáleností kritické, je vzdálenost mezi vývody omezovacího rezistoru R_{or} (vpravo dole). Zde může napětí nabývat hodnot menších než 60 V. Povrchová vzdálenost tedy musí být alespoň 3 mm a vzdálenost pod nátěrem 1 mm.

Šrafované oblasti mají šířku 10 mm, což dokazuje dodržení všech prozatím zmíněných vzdáleností.

Další vzdálenosti jsem musel dodržet v oblasti výstupu zdroje, například mezi souběžnými cestami k výstupním svorkám (oblast 3.) nebo u vývodu rezistoru R4 a plošky zenerovy diody (oblast 4.). To se může zdát nesmyslné, neboť jsou tyto části vodivě spojeny, ale důvod proč je i zde potřeba dodržet tyto vzdálenosti vyplývá z následující kapitoly.

4.3.2 Dodržení dalších požadavků bezpečnosti úrovně "ia"

Jak jsem již uvedl v předcházejících kapitolách, při návrhu zdroje musím postupovat tak, aby splňoval úroveň bezpečnosti "ia". Musí tedy platit, že zařízení zajišťuje bezpečné výstupní hodnoty i při dvou započitatelných a kombinaci nejméně příznivých nezapočitatelných poruch. Do započitatelných poruch se řadí například přerušení některých plošných spojů nebo porucha některých bezporuchových prvků. Nezapočitatelné poruchy mohou být například selhání některého integrovaného obvodu nebo náhodný zkrat způsobený vadnou součástkou, která není navržena jako bezporuchový prvek.

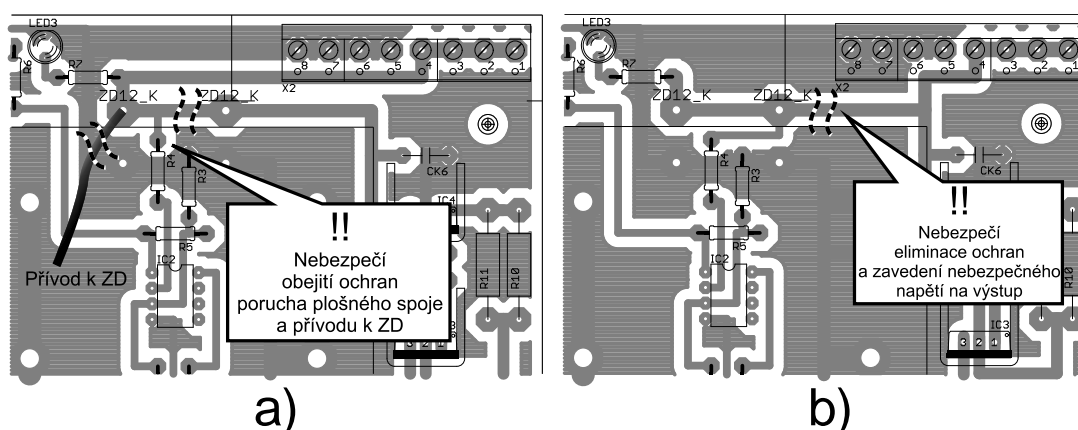
Kromě dostatečného dimenzování součástek bezporuchových prvků je také důležité, aby byly do obvodu připojeny bezporuchovým spojením. Zenerovy diody budou k desce připojeny kabely o průřezu $0,75 \text{ mm}^2$, které budou pájeny k diodám a následně k ploškám na desce (oblast 2.). Porucha takové součásti je tedy započitatelná. [7]

V oblasti 3. na obrázku je vyznačen plošný spoj vedoucí na výstup zdroje. Z podstaty úrovně ochrany "ia" je zřejmé, že za provozu může nastat situace, kdy dojde k přerušení

plošného spoje na libovolném místě. **Nelze tedy spoléhat pouze na vodivé spojení a plošný spoj vést přímo od výstupního pinu stabilizátoru na výstupní svorku. Ochranné diody by v tomto případě byly připojeny paralelně (z fyzického hlediska) a mohlo by dojít k jejich vyřazení vlivem poruchy plošného spoje. Na výstup by se tak mohlo dostat nebezpečné napětí.**

Z podobného důvodu je také spoj vedoucí k rezistoru R4 fyzicky napojen na první ochrannou diodu. Na tento připoj je totiž nutné nahlížet jako na přívod napětí 24 V (poruchy operačního zesilovače i rezistoru R4 jsou nezapočítatelné).

Příklad plošných spojů, které nevyhovují ochraně typu "ia" jsem znázornil na následujícím obrázku.



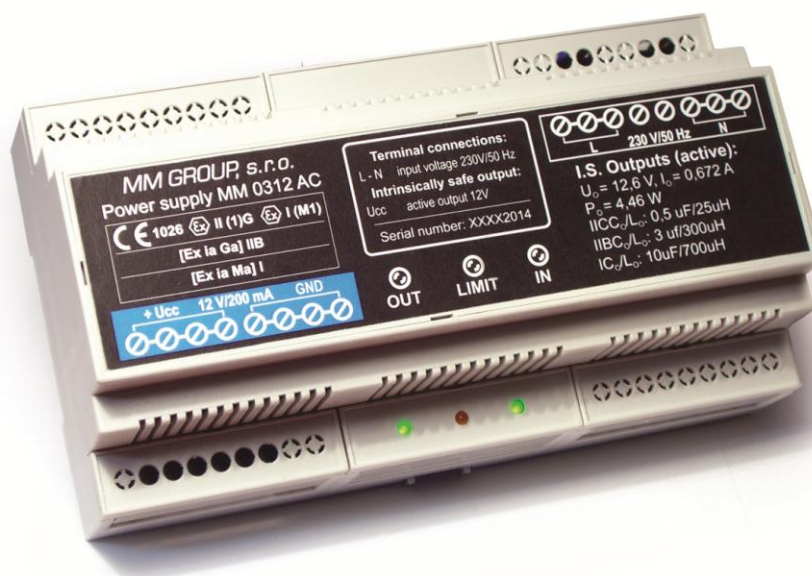
Obrázek 16 - příklady nevyhovujícího návrhu DPS

Uvedené informace vedou k otázce, zda je možné uvažovat poruchu obou zenerových diod ochrany. Ochranné diody jsou kusově testovány dle předpisů a vztahuje se k nim následující - cituji z normy 60079-11:

"Ochranné bariéry, které obsahují pouze dvě diody nebo diodové řetězce, které jsou použity pro úroveň ochrany „ia“ se považují za bezporuchovou sestavu podle 8.6, pokud byly diody podrobeny kusovým zkouškám podle 11.1.2. V tomto případě se při aplikaci kapitoly 5 uvažuje pouze s poruchou jedné diody." [7]

4.4 Sestavení zdroje

Pro uchycení ochranných diod zapotřebí vyvrtat otvory do chladiče. Po připevnění diod jsem chladič připevnil k desce plošných spojů pomocí čtyř samořezných šroubů a k diodám jsem připájel kabelové přívody tak, aby nebyly mechanicky namáhány a přitom nepřekážely ostatním součástem. Veškeré součástky přichycené k chladičům jsem potřel tenkou vrstvou teplovodivé pasty. Součástky jsem pájel ručně. Krabičku bylo nutné mírně upravit provrtáním otvorů pro LED.



Obrázek 17 - hotový zdroj v krabičce



Obrázek 18 - osazená deska plošných spojů

5 MĚŘENÍ

U sestaveného zdroje jsem ověřil požadované parametry. Předpokládám, že bude v provozu plně zatížen, zaměřil jsem se tedy především na testování zdroje v tomto režimu. Nejdříve jsem měřil výstupní voltampérovou charakteristiku zdroje a dále pak šum na výstupu zdroje a ověřil jsem teploty součástek po ustálení.

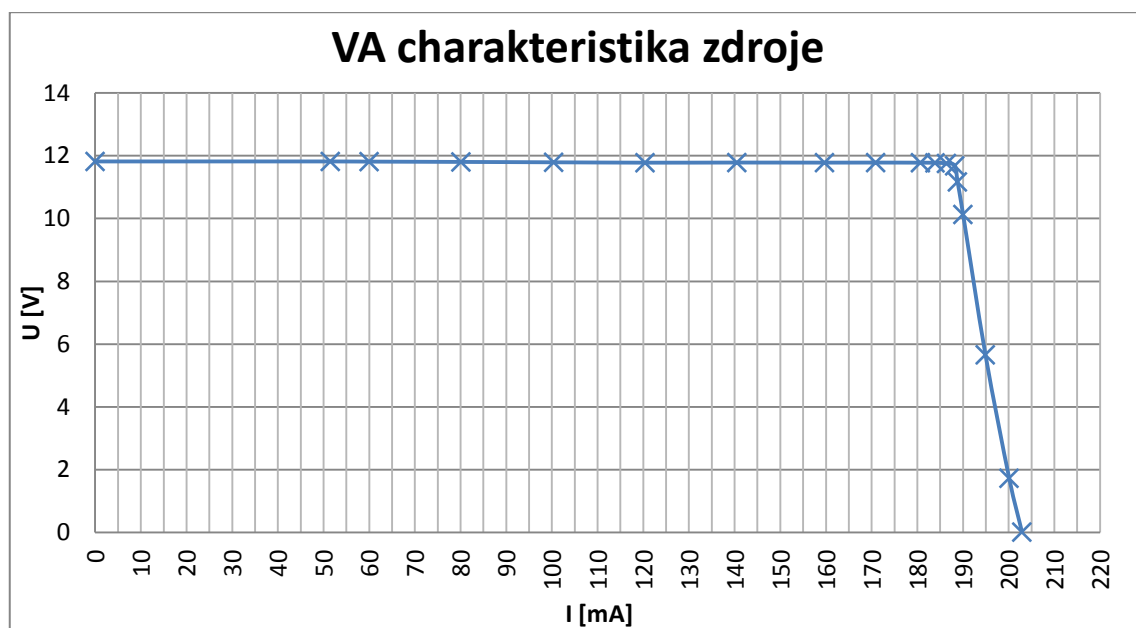
Veškerá měření jsem prováděl za pokojové teploty 23 °C. Měřil jsem digitálním multimetrem APPA 109N a kalibrovaným osciloskopem Tektronix TDS 1012.

5.1 Měření výstupní charakteristiky

Zdroj by podle parametrů měl být schopný dodávat proud 200 mA při napětí 12 V. Při překročení proudu již nemá garantováno plné výstupní napětí. Výstupní charakteristiku zdroje jsem měřil pomocí umělé zátěže tvořené výkonovým reostatem. Z naměřených dat je vidět, že parametry zdroje v normálním provozním režimu byly s tolerancí přibližně 5 % dodrženy.

I [A]	0,000	0,052	0,060	0,080	0,100	0,120	0,141	0,160	0,171
U [V]	11,816	11,816	11,811	11,801	11,789	11,777	11,781	11,779	11,780
P [W]	0,000	0,609	0,709	0,945	1,184	1,418	1,655	1,881	2,013
I [A]	0,181	0,184	0,186	0,188	0,189	0,190	0,195	0,200	0,203
U [V]	11,777	11,772	11,753	11,678	11,165	10,128	5,658	1,725	0,010
P [W]	2,128	2,165	2,191	2,198	2,108	1,924	1,103	0,345	0,002

Tabulka 5 - naměřená data VA charakteristiky

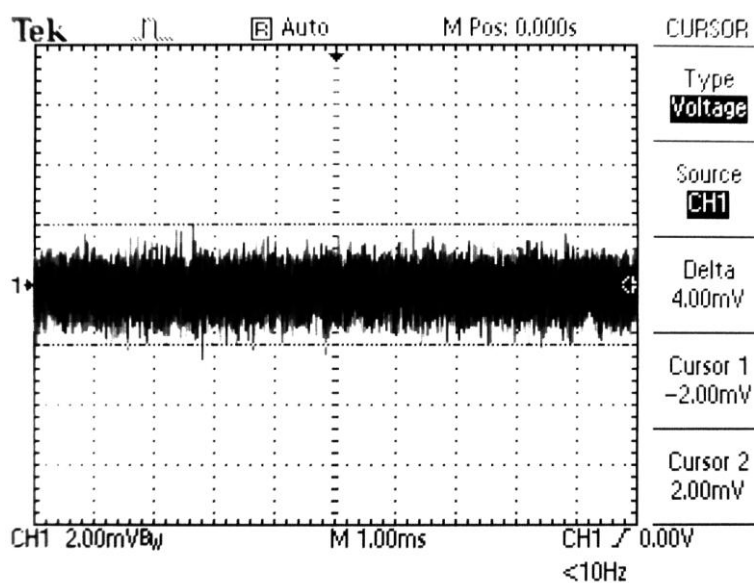


Graf 1 - průběh napětí na zátěži

5.2 Měření výstupního šumu

Měření šumu na výstupu zdroje jsem měřil po zapnutí bez zátěže, po zapnutí s připojenou zátěží, po zahřátí se zátěží (po hodině provozu) a po zahřátí s odpojenou zátěží. Při měření jsem měl od sondy osciloskopu odpojený zemnicí vodič. Šum jsem měřil přiložením špičky a zemnicího kroužku sondy na poslední ochrannou diodu zařazenou těsně před výstupní svorky. Tím jsem se vyvaroval vzniku zemní smyčky a naměření indukovaného šumu z okolí. Osciloskop jsem nastavil na AC vazbu.

Měřením jsem zjistil, že šum není ovlivněn vnitřní teplotou ani připojenou odporovou zátěží. Očekával jsem teplotně závislé projevy tepelného šumu polovodičů ve stabilizátorech a šumu vznikajícího na rezistorech, ale ani jedno se nepotvrdilo. Průběhy se zcela shodovaly. Zdá se, že napěťové stabilizátory tyto šумы úspěšně kompenzují.



Obrázek 19 - snímek osciloskopu zobrazující šum na výstupu



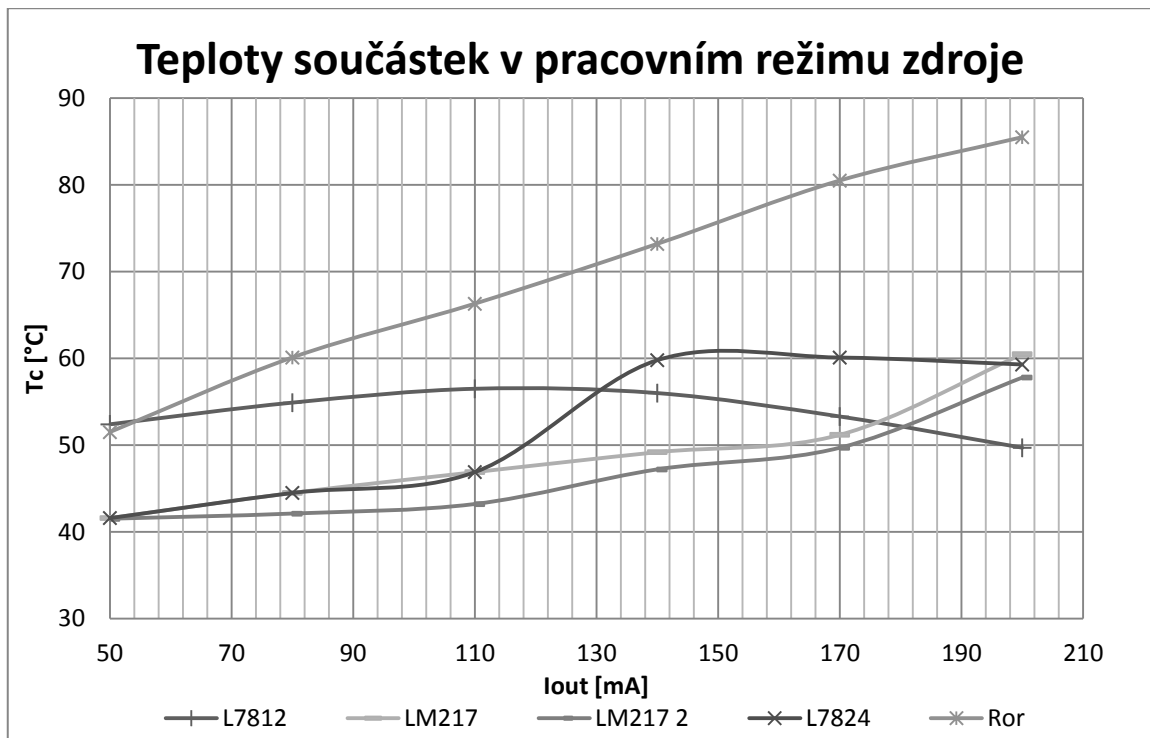
Obrázek 20 - způsob měření šumu

5.3 Měření teplot součástek a ověření stability výstupu

Teploty zatěžovaných součástek jsem měřil v pracovní oblasti zdroje a při zkratu. Zaměřil jsem se na ověření správnosti výpočtu chladičů. Zdroj byl při měření uzavřen v krabici a byl v poloze odpovídající instalaci na lištu DIN 35. Měřením jsem zjistil, že chlazení proudového stabilizátoru je po uzavření do krabičky nedostatečné, neboť při zkratu by mohlo za nejméně příznivých teplotních podmínek dojít k přehřátí součástky. Ke kritickému stabilizátoru jsem tedy připevnil ještě jeden chladič (naměřené teploty s indexem 2), který se při běžném provozu téměř neprojevil, ale teplotu při zkratu snížil. Naměřené hodnoty jsem seřadil do tabulky.

L7812		LM217			L7824		Ror	
I _{out} [mA]	T _c [°C]	I _{out} [mA]	T _c [°C]	T _{c2} [°C]	I _{out} [mA]	T _c [°C]	I _{out} [mA]	T _c [°C]
50	52,4	50	41,6	41,5	50	41,6	50	51,5
80	54,9	80	44,5	42,1	80	44,5	80	60,1
110	56,5	110	46,9	43,2	110	46,9	110	66,3
140	56	140	49,2	47,2	140	59,8	140	73,2
170	53,3	170	51,2	49,7	170	60,1	170	80,5
200	49,7	200	60,5	57,8	200	59,3	200	85,5
zkrat	48,2	zkrat	123,1	102,5	zkrat	58,9	zkrat	86,2

Tabulka 6 - naměřené teploty součástek



Graf 2 - průběh teplot součástek v závislosti na výstupním proudu

6 ZÁVĚR

Při volbě bakalářské práce jsem se rozhodl pro realizaci vlastního zadání ve spolupráci s externí firmou. Cílem bakalářské práce je vývoj a realizace jiskrově bezpečného zdroje. Obsahem práce je úvod do problematiky, vysvětlení pojmů, popis koncepce zdroje, výběr komponent a výpočet hodnot součástek, dále pak návrh desky plošných spojů, celková kompletace zařízení a proměření jeho parametrů.

Při tvorbě této práce jsem vynechal průzkum trhu, neboť jsem nenašel konkurenční alternativu zdroje s výstupem vyšším než 100 mA, který by splňoval úroveň bezpečnosti typu "ia".

Na začátku vývoje jsem promyslel koncepci zdroje, která se později ukázala jako funkční. Výběr vhodných součástek je provázen studiem jejich datových listů a počítáním potřebných parametrů. V případě součástek zajišťujících jiskrovou bezpečnost se k tomu navíc přidává studium příslušných norem a hledání návazností. Pro splnění požadované úrovně bezpečnosti "ia" zdroje jsem musel také vhodně navrhnout desku plošných spojů tak, aby zajistila dodržení požadavků kladených na taková zařízení.

Na sestaveném zdroji jsem provedl řadu testů, které simulují reálný provoz zdroje a prověřil jsem jejich pomocí správnost výpočtů. Proměřil jsem voltampérovou charakteristiku zdroje, která s menšími tolerancemi odpovídá předpokladům. Dále jsem změřil šum na výstupu. Zajímavým zjištěním byl fakt, že amplituda šumu byla stejná při různých pracovních podmínkách zdroje. Ověřil jsem, že uzavření zdroje do krabičky má vliv na účinnost chladičů, což v případě stabilizátoru proudu může vést k provozování součástky na limitních hodnotách teploty. K této součástce jsem tedy připevnil další chladič, což vedlo k lepším výsledkům. Obecně se však zdroj pro dlouhodobé provozování s maximální zátěží příliš nehodí.

V rámci této práce jsem tedy úspěšně navrhl a sestavil jiskrově bezpečný zdroj, který odpovídá vstupním požadavkům.

7 ZDROJE

- [1] ALUTRONIC. Produktinformation Type: PR19/20/SE: Gruppe: Spezial- und Fingerkühlkörper. 1 s. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/620/008/v4330n-datasheet-1.pdf>, dne 2.2.2014
- [2] BRIGHT LED ELECTRONICS CORP. Datasheet: Device number: BL-B2141-L. 2008, 3 s. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/511/200/led-3mm-2mag-datasheet-1.pdf>, dne 2.2.2014
- [3] BRIGHT LED ELECTRONICS CORP. Datasheet: Device number: BL-B3141-L. 2010, 4 s. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/511/202/led-3mm-2may-datasheet-1.pdf>. dne 2.2.2014
- [4] CAMDENBOSS ELECTRONICS & ENCLOSURES. DIN Rail Boxes. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1657841.pdf>, dne 20. 5. 2014
- [5] ČSN EN 50303. Zařízení skupiny I, kategorie M1, určená pro použití za přítomnosti methanu a/nebo hořlavého prachu. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2001, 20 s.
- [6] ČSN EN 60079-0. *Výbušné atmosféry: Část 0: Zařízení - Všeobecné požadavky*. 3. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 92 s.
- [7] ČSN EN 60079-11. *Výbušné atmosféry: Část 11: Ochrana zařízení jiskrovou bezpečností "i"*. 2. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012, 132 s.
- [8] FISCHER ELEKTRONIK. Standard extruded heatsinks. 1 s. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/620/097/sk48-50-sa-3-datasheet-1.pdf>, dne 2. 2. 2014
- [9] FISCHER ELEKTRONIK. Standard extruded heatsinks. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/17537.pdf> , dne 2. 2. 2014
- [10] HAMMERBAUER, Jiří. Elektronické napájecí zdroje a akumulátory. Vyd. 2. Plzeň: Západočeská univerzita, Elektrotechnická fakulta, 1998, 181 s. ISBN 80-708-2411-5.
- [11] JURKOVIČ, K. *Průručka nízkofrekvenční obvodové techniky*. Bratislava: Alfa, 1985, 683 s. ISBN 63-041-85.
- [12] Komparátory s operačními zesilovači. [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.samoweb.wz.cz/elektronika/opzes3/opzes3.htm>
- [13] MICROSEMI. Technical Datasheet: 50 WATT ZENER DIODES. 2. vyd. 2010, 6 s. T4-LDS-0077. Dostupné z: http://download.siliconexpert.com/pdfs/2010/10/28/7/9/0/134/mcs_/manual/lds-0077.pdf
- [14] PHILIPS. BZY 93 Series: Regulator diodes. 1984. Dostupné z: <http://pdf.datasheetarchive.com/indexerfiles/Scans-002/Scans-0047139.pdf>

- [15] POHLUDKA, Jan a Jaromír HRUBÝ. *Elektrická zařízení v prostorách s nebezpečím výbuchu hořlavých plynů, par a prachů*. 2., aktualiz. vyd. Praha: IN-EL, 2013, 238 s. Elektro (IN-EL). ISBN 978-80-86230-87-0.
- [16] SCHURTER ELECTRONIC COMPONENTS. Non resettable fuses: MST 250. 2014, poslední aktualizace 8.5.2014, 4 s. Dostupné z:
http://www.schurter.ch/var/schurter/storage/ilcatalogue/files/document/datasheet/en/pdf/typ_MST_250.pdf
- [17] STMICROELECTRONICS. L7800 Series: Positive voltage regulators. 2004, 33 s. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/330/009/7824cv-dg-datasheet-1.pdf>
- [18] STMICROELECTRONICS. LM117/LM217/LM317: 1.2V to 37V voltage regulator. 1999, 25 s. Dostupné z:
<http://www.gme.cz/img/cache/doc/331/004/lm317t-datasheet-1.pdf>
- [19] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. Příručka ke směrnici ATEX. 2. vyd. Praha: Bořivoj Kleník, PhDr. - Q-Art, 2006. Dostupné z:
http://www.unmz.cz/sborniky_th/sb2006/atex_Master.pdf
- [20] WELWYN COMPONENTS LIMITED. Vitreous Enamelled Wirewound Resistors: W20 Series. 3 s. Dostupné z:
<http://www.farnell.com/datasheets/1449996.pdf>, dne 23. 5. 2014

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

I_{N1}	Proud primárním vinutím transformátoru při plném zatížení zdroje v bezporuchovém stavu
I_{N2}	Výstupní proud transformátoru při plném zatížení zdroje v bezporuchovém stavu
U_{N1}	Síťové napájecí napětí transformátoru
U_{N2}	Výstupní napětí transformátoru při běžném provozním stavu
R_{pr}	Elektrický odpor předřadného rezistoru transformátoru
I_{bc}	Maximální přerušovací proud vstupní tavné pojistky (breaking current)
P_{Rpr}	Maximální výkon na předřadném rezistoru transformátoru
U_{20}	Výstupní napětí usměrňovače
U_{2ef}	Efektivní hodnota vstupního napětí usměrňovače
U_D	Úbytek napětí na diodách usměrňovače v propustném směru
R_Z	Elektrický odpor zátěže zdroje při plném zatížení
I_Z	Proud zátěží zdroje při plném zatížení
R_i	Vnitřní elektrický odpor transformátoru
$P_{st24\ max}$	Maximální výkon na 24 V stabilizátoru napětí
$U_{st24\ out}$	Výstupní napětí 24 V stabilizátoru napětí
$R_{LED\ on}$	Hodnota rezistoru omezujícího proud signálkou indikující správnou funkci transformátoru a usměrňovače
$R_{LED\ out}$	Hodnota rezistoru signálky indikující napětí na výstupu zdroje
ΔT_{j-c}	Teplotní spád na přechodu tepla z polovodiče (čipu) do pouzdra součástky
ΔT_{c-hs}	Teplotní spád na přechodu tepla z pouzdra součástky do chladiče
$\Delta T_{hs-a\ max}$	Maximální přípustný teplotní spád na přechodu tepla z chladiče do okolí
R_{thj-c}	Teplotní odpor přechodu tepla z polovodiče (čipu) do pouzdra součástky

R_{thc-hs}	Teplotní odpor přechodu tepla z pouzdra součástky do chladiče
$R_{thc-a\ max}$	Maximální tepelný odpor chladiče potřebný k dodržení stanovené teploty
U_{zd24}	Zenerovo napětí 24 V Zenerových diod
P_{zd24}	Maximální výkon na 24 V Zenerových diodách při poruše
$P_{zd24\ min}$	Minimální přípustná zatížitelnost 24 V Zenerovy diody
R_{or}	Elektrický odpor omezovacího rezistoru
I_{or}	Proud omezovacím rezistorem při plném zatížení zdroje
$U_{or@0,2A}$	Úbytek napětí na omezovacím rezistoru při proudu 200 mA
$P_{or\ min}$	Minimální přípustná zatížitelnost omezovacího rezistoru
I_n	Maximální proud tavnou pojistkou
R_{sr}	Elektrický odpor snímacího rezistoru
P_{sr}	Výkon na snímacím rezistoru při plném zatížení zdroje
P_{sto}	Výkon na stabilizátoru proudového omezovače při plném zatížení zdroje
U_{epo}	Napětí na elektronickém omezovači proudu
$U_{st12\ in}$	Vstupní napětí 12 V stabilizátoru napětí při plném zatížení
$U_{st12\ out}$	Výstupní napětí 12 V stabilizátoru napětí
$P_{st12\ max}$	Maximální výkon na 12 V stabilizátoru napětí
U_{zd12}	Zenerovo napětí 12 V Zenerových diod
P_{zd12}	Maximální výkon na 12 V Zenerových diodách při poruše
$P_{zd12\ min}$	Minimální přípustná zatížitelnost 12 V Zenerovy diody

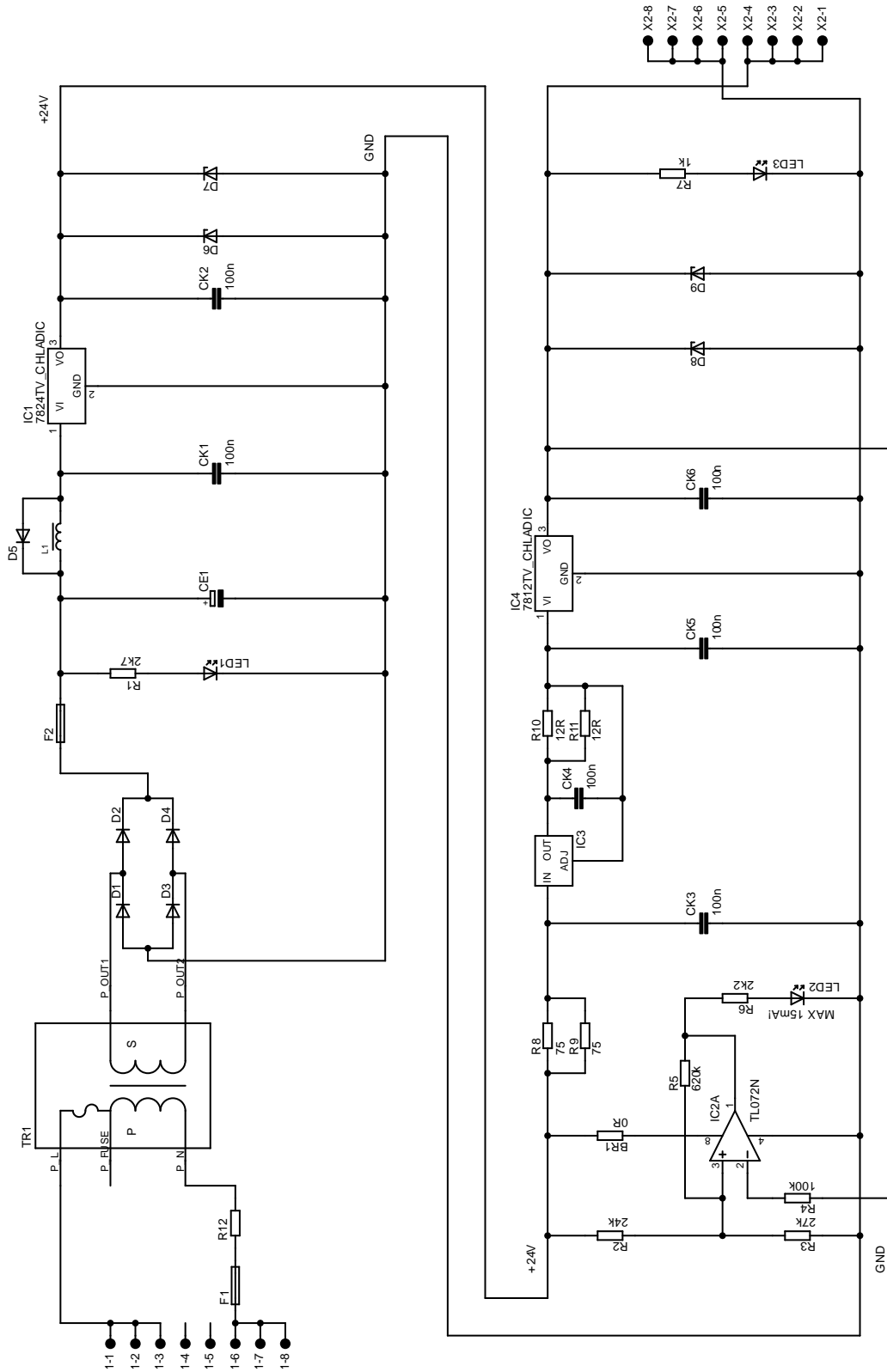
SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

Obrázek 1 - blokové schéma vyvíjeného zdroje	13
Obrázek 2 - předběžné elektrické schéma transformátoru s usměrňovačem	15
Obrázek 3 - vyrobený transformátor ve zdroji.....	16
Obrázek 4 - předběžné elektrické schéma stabilizace na 24V	18
Obrázek 5 - předběžné elektrické schéma sestavy proudové ochrany.....	20
Obrázek 6 - sestava proudové ochrany v hotovém zdroji.....	23
Obrázek 7 - předběžné schéma zapojení signalizace přetížení	24
Obrázek 8 - předběžné elektrické schéma elektronického omezovače proudu	25
Obrázek 9 - předběžné elektrické schéma stabilizace na 12V	27
Obrázek 10 - předběžné elektrické schéma 12V napěťové ochrany.....	29
Obrázek 11 - záběr na ochranné diody na společném chladiči v hotovém zdroji	30
Obrázek 12 - elektrické schéma navrhovaného zdroje	31
Obrázek 13 - krabička CNMB/9/V	32
Obrázek 14 - náhled na navržený štítek v měřítku 9:10	35
Obrázek 15 - znázornění některých bezpečnostních prvků desky (měřítko 9:10).....	35
Obrázek 16 - příklady nevyhovujícího návrhu DPS	37
Obrázek 17 - hotový zdroj v krabičce	38
Obrázek 18 - osazená deska plošných spojů.....	38
Obrázek 19 - snímek osciloskopu zobrazující šum na výstupu	40
Obrázek 20 - způsob měření šumu	40
Tabulka 1- typy ochran [15]	10
Tabulka 2 - maximální přípustné parametry zátěže (vychází z [7])	33
Tabulka 3 - odvození vzorce pro výbušnou plynou atmosféru[15][6][19].....	34
Tabulka 4 - odvození vzorce pro výbušnou atmosféru tvořenou prachy[15][6][19].....	34
Tabulka 5 - naměřená data VA charakteristiky	39
Tabulka 6 - naměřené teploty součástek.....	41
Graf 1 - průběh napětí na zátěži.....	39
Graf 2 - průběh teplot součástek v závislosti na výstupním proudu	41

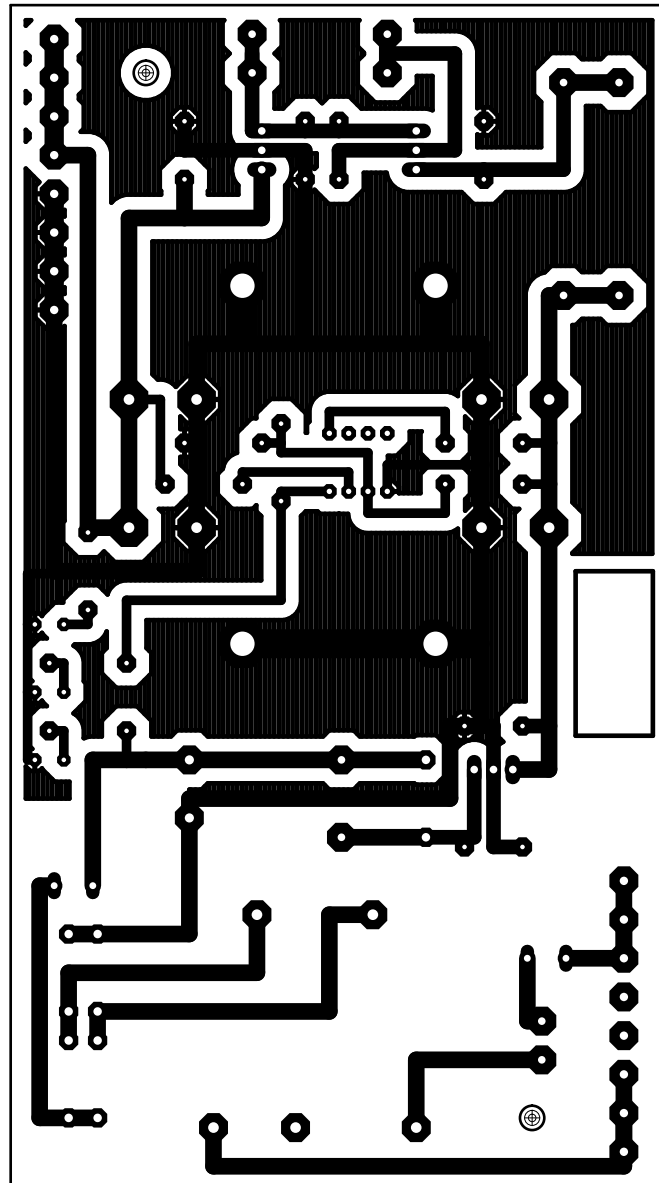
SEZNAM PŘÍLOH

Elektrotechnické schéma	A
Motiv desky plošných spojů	B
Osazovací plán	C
Rozpis použitých součástek	D
Obsah CD	E

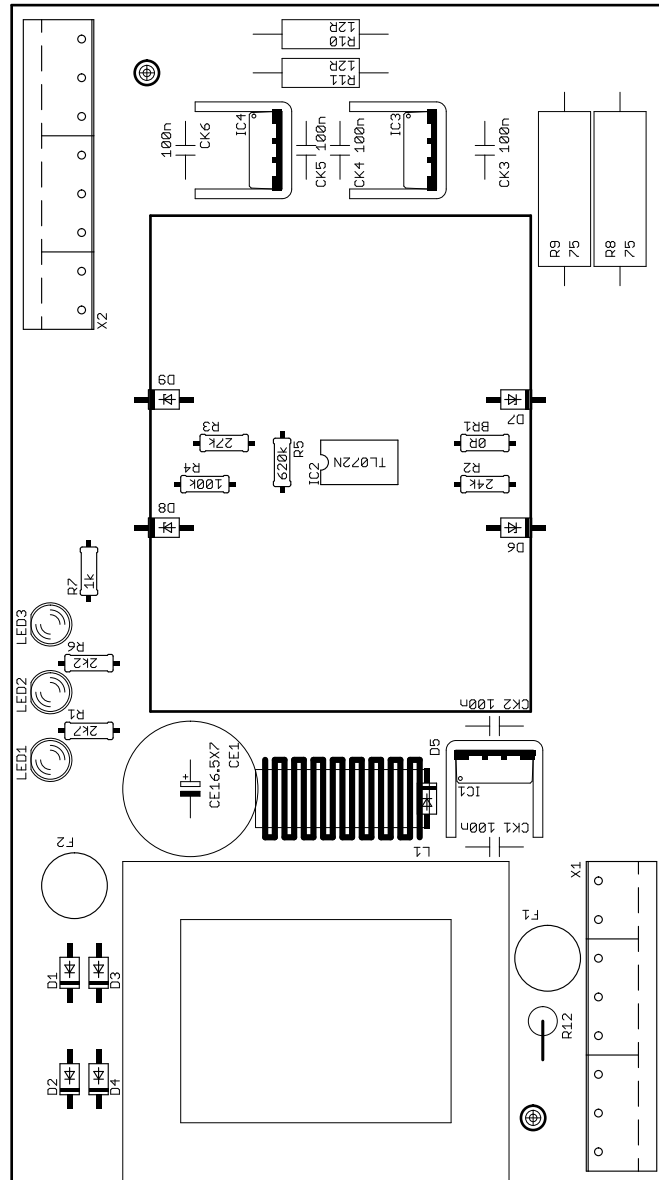
ELEKTROTECHNICKÉ SCHÉMA



MOTIV DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ



OSAZOVACÍ PLÁN



ROZPIS POUŽITÝCH SOUČÁSTEK

Part	Value	Device	Package
BR1	0R	R025W	0207/10
CE1	1000u	CE16.5X7	CE_16.5X7
CK1	100n	CK	KOND_KERAMIKA
CK2	100n	CK	KOND_KERAMIKA
CK3	100n	CK	KOND_KERAMIKA
CK4	100n	CK	KOND_KERAMIKA
CK5	100n	CK	KOND_KERAMIKA
CK6	100n	CK	KOND_KERAMIKA
D1		1N4001	DO41-10
D2		1N4001	DO41-10
D3		1N4001	DO41-10
D4		1N4001	DO41-10
D5		1N4001	DO41-10
D6	24V	1N3321	DO-5
D7	24V	1N3321	DO-5
D8	12V	1N3311	DO-5
D9	12V	1N3311	DO-5
F1	50mA	MST 250	TR5
F2	250mA	MST 250	TR5
IC1		7824T	TO220_CHLADIC
IC2		TL072N	DIL08
IC3		LM317T	TO220_CHLADIC
IC4		7812T	TO220_CHLADIC
LED1		LED5MM	5 mm
LED2		LED5MM	5 mm
LED3		LED5MM	5 mm
R1	2k7		0207/10
R2	24k		0207/10
R3	27k		0207/10
R4	100k		0207/10
R5	620k		0207/10
R6	2k2		0207/10
R7	1k		0207/10
R8	75R	Welwyn W22	R_7W
R9	75R	Welwyn W22	R_7W
R10	12R		0309
R11	12R		0309
R12	8R2		0309
TR1	230V/24V/8VA	TRAFO_Zakazkove_bezporuchove	TRAFO_ZDROJ
X1		W237-08P - Svorky	W237-8P
X2		W237-08P - Svorky	W237-8P

OBSAH CD

- **Plný text bakalářské práce**
- **Projekt návrhu desky plošných spojů v programu EagleCAD**
- **Výrobní dokumentace**
- **Fotografie výrobku**