

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



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

**NAPÁJECÍ A OCHRANNÉ OBVODY PRO 6-KANÁLOVÝ
ZESILOVAČ**

POWER SUPPLY AND PROTECTION CIRCUITS FOR 6-CHANNEL AUDIO AMPLIFIER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Kryška

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Hanák, Ph.D.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**
Ústav telekomunikací

Student: Vojtěch Kryška

ID: 174459

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Napájecí a ochranné obvody pro 6-kanálový zesilovač

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte napájecí a ochranné obvody pro 6-kanálový koncový audio zesilovač, které budou mít následující funkce:

- Filtrace síťového napětí a potlačení přeslechů mezi napájecími transformátory.
- Potlačení proudové špičky po zapnutí.
- Probouzení zesilovače ze standby režimu.
- Zpoždění připojení reproduktorů po zapnutí (eliminace lupnutí).
- Ochrana reproduktorů proti stejnosměrnému napětí na výstupu.
- Automatické vypnutí zesilovače při přehřátí.
- Paměť a indikace poruchových stavů pomocí LED.

Obvody musejí zachovat vzájemné oddělení zemí všech kanálů (eliminace zemních smyček). Funkci obvodů ověřte na testovacím vzorku a proveďte návrh desek plošných spojů v systému Cadsoft Eagle. Při návrhu zohledněte možnosti montáže uvnitř skříně zesilovače a snažte se minimalizovat potřebu kabelových propojení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SELF, D., Small Signal Audio Design. Focal Press, 2010. ISBN 978-0-240-52177-0

[2] SLONE, G., R., The Audiophile's Project Sourcebook: 80 High-Performance Audio Electronics Projects. McGraw-Hill Education, 2001, 361s. ISBN 0071379290

Termín zadání: 1.2.2017

Termín odevzdání: 8.6.2017

Vedoucí práce: Ing. Pavel Hanák, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Jiří Mišurec, 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 bakalářská práce se zabývá návrhem ochranných obvodů pro 6-ti kanálový audio zesilovač. Vytvořené obvody zajišťují filtraci síťového napětí, potlačení proudové špičky po zapnutí, zpožděné připojení reproduktorů pro eliminaci „lupnutí“, automatické vypnutí při přehřátí, indikaci poruchových stavů prostřednictvím LED a probuzení zařízení ze standby režimu. Návrh zohledňuje zachování vzájemné oddělení zemí všech kanálů pro eliminaci zemních smyček.

KLÍČOVÁ SLOVA

ochranné obvody, audio zesilovač, omezení proudové špičky, eliminace lupnutí, detekce přehřátí

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with designing protection circuits for 6 channel audio amplifier. Created circuits provide AC voltage filtering, current peak limitation after switching on, delayed speakers connection for eliminating crackling, automatic shut down in case of overheath, LED indication of failure and waking up from standby mode. Created design focuses on keeping all channels grounds unconnected with each other for eliminating ground loops.

KEYWORDS

protection circuits, audio amplifier, current peak elimination, crackling elimination, overheat sensor

KRYŠKA, Vojtěch *Napájecí a ochranné obvody pro 6-kanálový zesilovač*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2017. 35 s. Vedoucí práce byl Ing. Pavel Hanák, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Napájecí a ochranné obvody pro 6-kanálový zesilovač“ jsem vypracoval(a) 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(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Pavlu Hanákovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
podpis autora(-ky)

OBSAH

Úvod	9
1 Definice požadavků	10
1.1 Souhrn požadavků	10
1.2 Definice vstupů a výstupů	10
1.3 Definice funkčních stavů	10
2 Návrh řešení	12
2.1 Filtř síťového napětí	12
2.2 Pomocný napájecí zdroj	13
2.3 Soft-start a opožděné připojení výstupů	15
2.3.1 Výpočet proudového omezení	16
2.4 Modul ochrany výstupu zesilovače	16
2.5 Řízení napájení	18
2.6 Indikace poruch a stavu	21
2.7 Teplotní senzory chladičů	21
2.8 Návrh plošných spojů	22
3 Ověření funkčnosti návrhu	25
3.1 Časovač softstartu a opožděného připojení reproduktoru	25
3.2 Test teplotních senzorů	27
3.3 Detektor stejnosměrné složky	27
4 Mechanické konstrukční řešení	30
4.1 Eliminace vzniku zemních smyček	31
5 Závěr	32
Literatura	33
A Obsah přiloženého CD	35

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Blokové schéma vnitřního uspořádání	12
2.2	Schéma zapojení pomocného napájecího zdroje	14
2.3	Schéma zapojení transformátorů s implementovaným relé	16
2.4	Náhled schémata zapojení detekce stejnosměrné složky	18
2.5	Náhled schémata zapojení časovačů pro opožděné sepnutí relé	19
2.6	Schéma vnitřní struktury obvodu TLC555	20
2.7	Schéma zapojení termistoru	21
2.8	Návrh desky modulu ochrany	23
2.9	Návrh desky distribuce ochran	24
3.1	Simulační schéma časovačů	25
3.2	Simulační graf časovačů	26
3.3	Nepájivé pole s LED diodami	27
3.4	Test teplotních senzorů na nepájivém poli	28
3.5	Simulační schéma detektoru DC složky	29
3.6	Simulované průběhy	29

ÚVOD

Cílem této práce je návrh a ověření funkce napájecích a ochranných obvodů pro 6-ti kanálový zesilovač. Funkčnost návrhu těchto obvodů bude ověřena simulací nebo na testovacím vzorku. Ochranné obvody budou mít tyto funkce: ochrana audio zesilovače a reproduktorů v průběhu zapínání a vypínání zařízení, v případě výskytu stejnosměrné složky musí odpojit reproduktory, aby nedošlo k jejich poškození. Je-li zesilovač nadměrně zatěžován, bude produkovat vysoké množství tepla, které se projeví zvýšením teploty chladiče. Zde umístěné senzory tuto skutečnost zaznamenají a předají informaci obvodům, které v případě překročení určité teploty zajistí odpojení reproduktorů na potřebně dlouhou dobu. Pro přehled uživatele o jakémkoliv z těchto mimořádných stavů budou sloužit indikační LED diody, koncipované dle zadání. Pro omezení proudové špičky při zapnutí, která běžně vzniká při zapínání velkých transformátorů bude použit tzv. „softstart“ obvod, ten zajistí omezení proudu na potřebně dlouhou dobu, poté se automaticky přemostí. Součástí napájecích obvodů bude také samostatný zdroj pro napájení tzv. „standby“ obvodu, tento obvod bude neustále v provozu, v případě přivedení impulsu na jeho vstup zajistí zapnutí nebo vypnutí všech ostatních bloků. Při návrhu obvodů, které budou v režimu standby neustále v provozu, je na místě snaha o co nejnížší potřebný příkon energie. Celé zařízení bude umístěno do 19" kovové rackové skříně o výšce 2U. Chlazení zařízení je pasivní, hliníkové chladiče jsou umístěny po stranách skříně. Dle zadání má být napájecí část doplněná filtrem k potlačení rušení zavlečenému po síti.

1 DEFINICE POŽADAVKŮ

1.1 Souhrn požadavků

Výsledné zařízení bude vybaveno filtrací síťového napětí, potlačením proudové špičky po zapnutí, zpožděním připojení reproduktorů z důvodu eliminace “lupnutí” a detekcí stejnosměrné složky napětí na výstupu. Při překročení určité teploty se automaticky odpojí zátěž daného zesilovače. V případě poruchy se zobrazí konkrétní problém prostřednictvím LED indikace. Zařízení bude možné probudit ze standby režimu (zajištěním reakce na přivedenou logickou úroveň). Při návrhu je nutné zohlednit rozvedení zemí v zařízení a to z důvodu eliminace vzniku zemních smyček.

1.2 Definice vstupů a výstupů

V řídicí části budou vstupy pro připojení 4x NTC 10 k Ω , jakožto senzorů teploty jednotlivých chladičů, vstup resetovacího tlačítka ochran (současně může být reset realizován zapnutím a vypnutím napájení, nebo uvedením zařízení do režimu standby), vstup pro ovládání standby režimu. Externí řídicí část bude napájena pomocným symetrickým napájecím zdrojem ± 5 V, samotná elektronika ochran je pak napájena asymetrickým nestabilizovaným 12 V zdrojem. Do zařízení bude přivedeno standardní síťové napětí 230 V 50 Hz, které bude přivedeno na 3 transformátory, z výstupů transformátorů bude na vstupy jednotlivých zesilovačů přivedeno symetrické napětí ± 30 V. Zároveň bude síťové napětí přivedeno na pomocný transformátor pro napájení elektroniky ochran a obvodů ochran. Na zesilovače se audio signál přivádí nesymetricky. Výstupy zesilovače pak budou přes ochranné obvody přivedeny na výstupní svorkovnici pro připojení reproduktorů. Elektronika ochran je ovládána pomocí desky vstupů a řízení, která není součástí návrhu. Pro tuto část jsou připraveny monitorovací a ovládací signály na sloučeném konektoru s pomocným napájením.

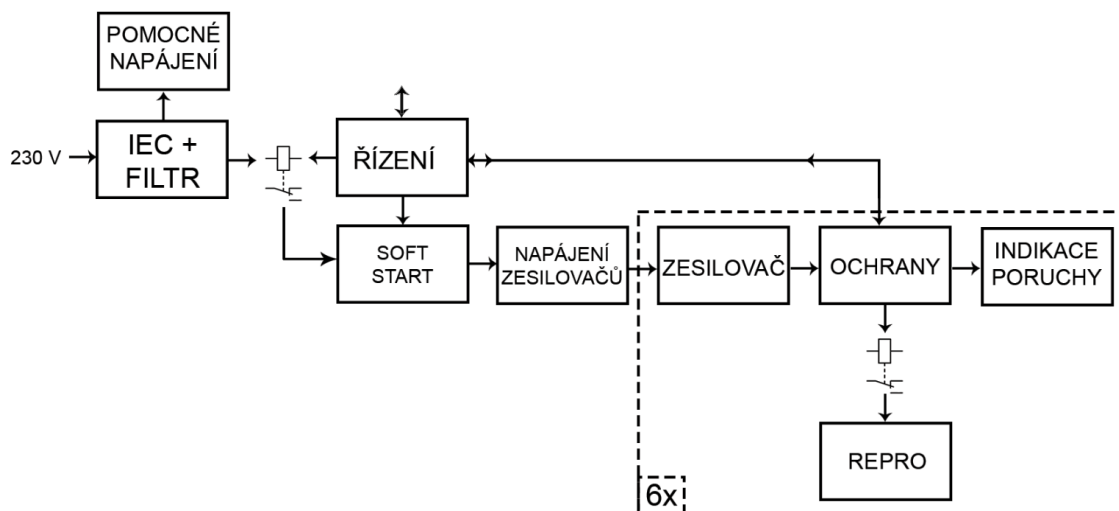
1.3 Definice funkčních stavů

Výchozí stav: výstupy silového napájení zesilovačů jsou vypnuté, ovládací obvody jsou napájeny pomocným napájecím zdrojem. Výstupy reproduktorů jsou odpojeny. Po zapnutí, pomocí přivedené logické úrovně na ovládací vstup, je sepnuto silové napájení přes omezovací rezistor pro eliminaci proudové špičky (nabíjení filtračních kondenzátorů a počátečních magnetizačních proudů transformátorů), omezovací výkonový rezistor je po nastaveném časovém zpoždění přemostěn kontaktem relé. Po

uběhnutí potřebného času pro softstart je spuštěn časovač opožděného připojení výstupů zesilovačů, a to z důvodu eliminace lupnutí po zapnutí. Poté zařízení přejde do normálního provozního režimu. Za normálního provozního režimu je větev symetrického pomocného napájení aktivní. Hlavní silové napájecí výstupy jsou již aktivní bez omezovacího rezistoru. Relé pro připojení zátěží k výstupům jednotlivých zesilovačů se nachází v průchozím stavu. Normální provozní stav je indikován řídicímu systému pomocí k tomu určenému signálu. Zároveň probíhá monitorování standby vstupu, v případě log. “L” dojde k okamžitému zablokování relé výstupů (odpojení zátěží zesilovačů), vypnutí silové napájecí části (odpíná hlavní relé i relé softstartu). Každý kanál ochrany je monitorován nezávisle: tzn. v případě aktivního vstupu blokování relé, je zátěž daného výstupu odpojena za všech okolností (výchozí stav relé bez napájení, odpojená zátěž). Informace o přítomnosti chybového stavu je předávána řídicímu systému pomocí indikačních signálů.

2 NÁVRH ŘEŠENÍ

Tato kapitola se bude odkazovat na obr. 2.1.



Obr. 2.1: Blokové schéma vnitřního uspořádání

2.1 Filtr síťového napětí

Pro odrušení proti vlivům napájecí sítě postačí IEC konektor se zabudovaným filtrem, běžně útlumy těchto filtrů začínají až nad frekvenčním pásmem audio aplikací. Primárním určením těchto filtrů je zamezení průniku rušení z/do zařízení obsahující spínané napájecí zdroje v rozsahu frekvencí typicky 150 kHz – 30 MHz, jak je požadováno v normách pro EMC.

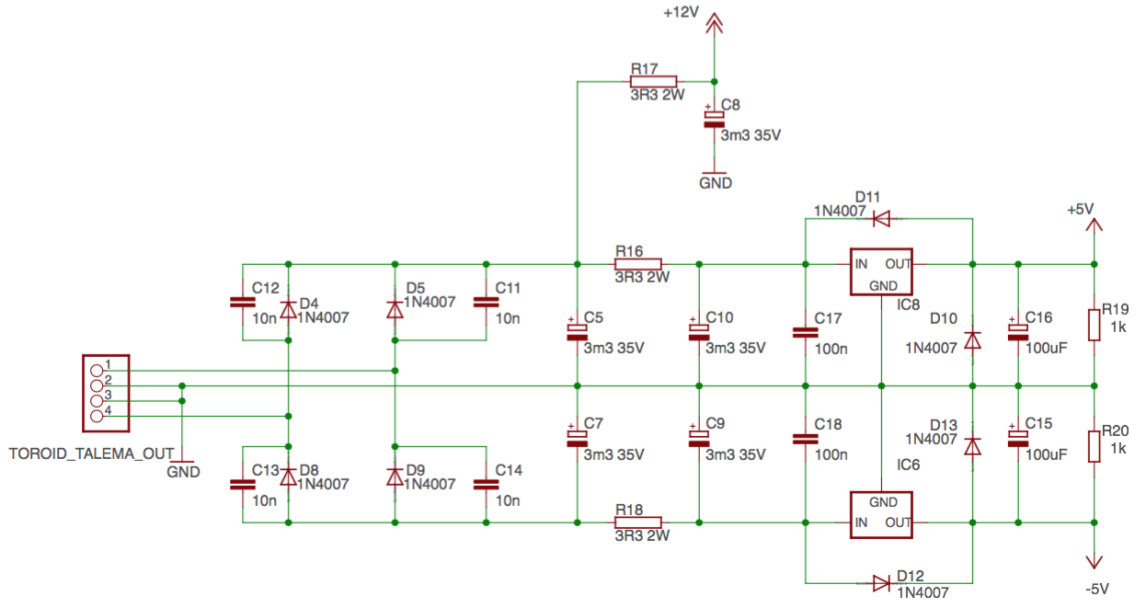
Problematickým zdrojem rušení šířícím se po distribuční síti, především pro audio aplikace, je signál ovládání systému HDO (0,18 - 1 kHz), tedy systém pro dálkovou regulaci odběru elektrické energie. Pracovní frekvence tohoto systému jsou řádově nižší, než jsou potlačovány integrovaným filtrem. Bohužel je toto rušení téměř bez útlumu přenášeno i napájecími transformátory, odrušení je tedy nutno vyřešit důslednou filtrací napájení po usměrnění na sekundární straně transformátorů. Snaha o odstranění tohoto typu rušení na primární straně by byla neekonomická, navíc by výsledná konstrukce filtru tohoto typu využila neúměrně velký zastavěný objem šasi. Existuje i varianta IEC konektoru s integrovaným pouzdrům pro tavnou pojistku. Umístění tavných pojistek bude výhodnější až na přívodu na transformátory, samotný pomocný napájecí zdroj má mnohem menší proudový odběr a je v neustálém provozu. Jedna společná pojistka by tedy nebyla optimálním řešením v

případě paralelní kombinace několika zátěží s řádově odlišným proudovým odběrem. V profesionálních přístrojích se dnes běžně používá napájecí konektor typu „Powercon“, jehož výhodou je aretační pojistka, snižuje se tak riziko vytržení konektoru v případě, kdy někdo zavadí o přívodní napájecí kabel. Jeho další výhodou je vyšší proudové zatížení, a to až 25 A / 230 V. Bohužel se tento konektor nevyrábí ve verzi s integrovaným filtrem síťového napětí. Tento 6kanálový zesilovač spadá spíše do „hobby“ kategorie, proto je použití výše zmíněného IEC konektoru s filtrem dostačující.

Návrh pomocného zdroje napájení obsahuje prvky filtrace, které mohou být uplatněny i v napájecí části výkonových zesilovačů.

2.2 Pomocný napájecí zdroj

Tato podkapitola se bude odkazovat na obr. 2.2. Pro účely napájení vstupní a řídicí části je zadavatelem požadován symetrický ± 5 V zdroj s trvalým provozem. Pro účely napájení ochranných obvodů postačuje nestabilizovaná +12 V větev. Minimální dostupný výkon symetrické stabilizované větve byl zvolen na 5 W (2x250 mA), pro nestabilizovanou pomocnou větev je maximální typický proudový odběr dán především aktivními cívkami relé, které v součtu tvoří cca 4 W příkonu. Spotřeba samotné elektroniky ochrany je přibližně o řád nižší a pro orientační výpočet zanedbatelné. Výkon transformátoru je tedy volen s 20% rezervou (11 W) jako nejbližší vyšší dostupná hodnota ve výrokové řadě. Tato rezerva má své opodstatnění mimo jiné i v asymetrickém zatížení sekundárních vinutí. S ohledem na požadovaný výkon je možné volit zapouzdržený EI. transformátor určený k přímé montáži na DPS, nebo externí toroidní transformátor. Z porovnání vlastností [3] a [15] vyplývá, že s ohledem na klidovou spotřebu transformátoru i zastavěný objem šasi přístroje vychází výhodněji použití toroidního transformátoru. Další výhodou toroidního transformátoru je i to, že na rozdíl od standardní konstrukce má mnohem menší vyzařované rušivé magnetické pole, což je pro audio zařízení žádoucí vlastnost. Byl zvolen typ TALEMA 0015P1-2-012 o nominálním výkonu 15 W a výstupním napětí 2x12 V (nezatížený 14 V). Pro usměrnění je použito klasické můstkové zapojení, kondenzátory C11-C14 mají funkci potlačení rušení vznikajícího spínáním a rozpínáním diod. Za usměrňovačem jsou umístěny vyhlazovací kondenzátory C5 a C7, následují RC filtry pro další potlačení zvlnění a rozdělení na nestabilizovanou 12 V větev pro napájení ochranných obvodů a symetrické stabilizované napájení řídicí části zesilovače. Diody D10-D13 jsou ochranné, dle katalogového zapojení stabilizátorů pro případ, že se na výstupu stabilizátorů objeví napětí vyšší než na jejich vstupech (velké připojené blokové kondenzátory, nechtěné skokové vybití vstupních



Obr. 2.2: Schéma zapojení pomocného napájecího zdroje

filtračních kondenzátorů. Rezistory R19 a R20 zajišťují minimální zatěžovací proud stabilizátorů k zajištění jejich stability. Dimenzování kondenzátorů je provedeno dle [5], kapitola 6.13. Vzhledem k použití v 50 Hz síti je perioda $1/50$ s, minimální vyžadované napětí pro správu funkcí ochranných obvodů a stabilizátorů je 8 V, napětí zatíženého transformátoru při přípustném 10% poklesu napětí napájecí sítě je pak 10 V, přípustná úroveň zvlnění je tedy 2 V. Při výpočtu je uvažován konstantní proud zátěží což značně zjednodušuje výpočet. Proud pro výpočet je volen 300 mA.

$$R_x = \frac{U_{stab}}{I} = \frac{8}{0,3} = 26,67\Omega \quad (2.1)$$

$$U_{DC} \simeq U_{RMS} \cdot \sqrt{2} - U_d = 10V \quad (2.2)$$

kde U_{DC} je maximální napětí za usměrňovačem, U_{RMS} je efektivní hodnota AC napětí transformátoru a U_d úbytek napětí na diodě usměrňovače.

Pro omezení případného přenosu rušení z napájecí sítě a zpětného zavlečení rušení z dynamických změn v elektronice ochran je zařazen na vstupu i RC filtr. Volba rezistoru je kompromisní mezi dosažením co nejnižší mezní frekvence a výkonovou ztrátou, resp. napěťového úbytku. Při předpokladu maximálního proudu větví 0,3A. Jako maximální napěťový úbytek bylo stanovena hodnota 1 V, při které je stále i při maximálním zatížení transformátoru a poklesu síťového napětí zachován vyžadovaný 2 V úbytek na lineárních stabilizátorech, tak jak je vyžadováno dle katalogového listu. Nejbližší tabulková hodnota je 3R3. Mezní frekvence tohoto filtru

je:

$$f_{mezní} = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 3,3 \cdot 3,3 \cdot 10^{-3}} \quad (2.3)$$

Lineární stabilizátory musí být opatřeny vhodně dimenzovaným chladičem, který je galvanicky oddělen od montážní plošky pouzdra stabilizátoru. Za předpokladu maximálního napětí na straně usměrňovače 13 V a proudového odběru je ztrátový výkon:

$$P_d = I \cdot (U_{in} - U_{out}) = 0,3 \cdot (13 - 5) = 2,4W, \quad (2.4)$$

kde P_d je ztrátový výkon, I je maximální předpokládaný proud větvi, U_{in} je maximální napětí usměrňovače a U_{out} je napětí na výstupu.

$\Theta_{j-a} = 65 \text{ K/W}$ použitého pouzdra TO-220, při daném ztrátovém výkonu je tedy teplota čipu dána jako:

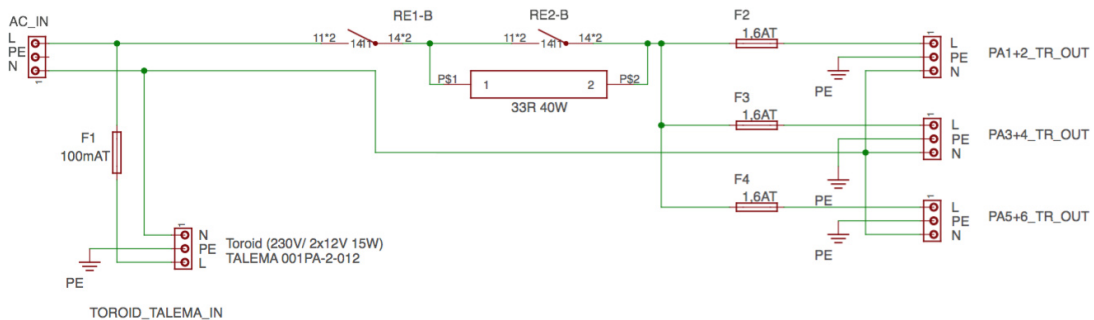
$$T_j = T_{amb} + P_d \cdot \Theta_{j-a} = 40 + 2,4 \cdot 65 = 196^\circ C \quad (2.5)$$

kde Θ_{j-a} je tepelný odpor čip pouzdro, T_{amb} je teplota okolního prostředí, P_d je ztrátový výkon a θ_{c-a} tepelný odpor pouzdro - prostředí.

Při zvolení maximální provozní teploty okolí $40^\circ C$ a stanovení maximální pracovní teploty čipu $100^\circ C$ je tedy patrné, že je nutno stabilizátor opatřit chladičem ($196^\circ C > 100^\circ C$). Výpočet maximálního přípustného tepelného odporu chladiče je nutné provést podle [7].

2.3 Soft-start a opožděné připojení výstupů

V současnosti se nejčastěji pro jištění v elektrických rozvodech nízkého napětí používají jističe s označením "typ B". Jsou určeny pro jištění zařízení, jejichž zapínací proud je stejný jako jmenovitý nebo mírně zvýšený. Jistič typu B vypíná přibližně do 0,1 s při 3 - 5-ti násobku jmenovitého proudu. Dalším typem jističe je jistič typu „C“, používá se pro jištění zařízení, které mají zapínací proud menší než osminásobek jmenovitého proudu. Jistič vypíná přibližně do 0,1 s při 5 - 10-ti násobku jmenovitého proudu. Tento typ jističe však v běžném rozvaděči, např. v domácnosti nebo v kanceláři nenajdeme. Jelikož při zapínání velkých transformátorů může počáteční magnetizační proud dosáhnout až desetinásobku jmenovitého proudu, i když transformátory nejsou zatíženy, je nutné tento počáteční proud omezit na úroveň, při které k reakci jističe nedojde. Proudová špička je navíc podpořena nabíjením filtračních kondenzátorů, umístěných za Graetzovým můstkem. Pro potlačení těchto špiček zavádíme obvod „softstart“, jenž zajistí dostatečné omezení počátečního proudu do doby, než tyto proudové špičky pominou. Ze stejného důvodu budou v konstrukci použity pro ochranu proti přetížení a poruše pojistky s opožděnou reakcí (typ T).



Obr. 2.3: Schéma zapojení transformátorů s implementovaným relé

Pozn.: vývody z L a N vodiče vedoucí mimo schéma slouží k napájení pomocného napájecího zdroje. Vývody PE u svorek transformátoru jsou určeny pro případ použití s transformátorem s elektrostatickým stíněním mezi primárem a sekundárem, případně dodatečné ukostření jádra u EI transformátorů. Po zapnutí zařízení bude nejprve po dobu cca 3 s protékat proud přes výkonový drátový keramický rezistor o hodnotě 33 Ω .

2.3.1 Výpočet proudového omezení

$$I_{RMS} = \frac{U}{R}(A; V; \Omega)$$

$$I_{RMS} = \frac{230}{33}(A; V; \Omega) \quad (2.6)$$

$$I_{RMS} = 6,97A$$

To vyplývá z jednoduchého propočtu pomocí Ohmova zákona. Po uplynutí odpočtu bude přívod proudu přes rezistor prostřednictvím relé přemostěn. Časovače řídící relé jsou obsaženy v bloku řízení.

2.4 Modul ochrany výstupu zesilovače

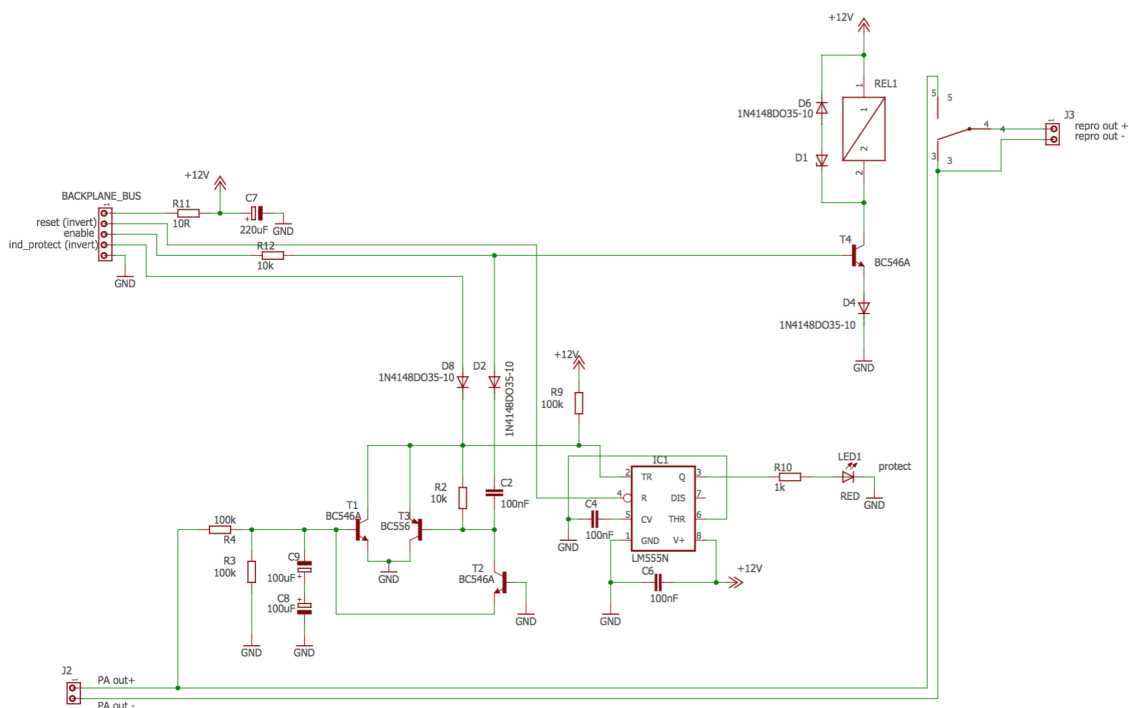
Reproduktory jsou většinou tím nejdražším komponentem v audio systému, do kterého každý z nás, v případě pořízení vlastní audio soupravy, investuje nemalou částku, a proto i zde je moudré si svou investici ochránit a zajistit co nejlépe její bezpečný provoz. Při zapínání audio zesilovače je v poslední době ve větším množství případů bohužel přivedeno na reproduktory nepříjemné lupnutí. Vznik lupnutí může mít za příčinu více faktorů, jako např. návrh obvodů zesilovače nebo návrh napájecího zdroje. Většinou je jediným řešením, jak toto lupnutí zcela eliminovat, zpozdit připojení reproduktorů na nezbytně dlouhou dobu, která je potřebná pro stabilizaci pracovního bodu obvodů zesilovače. Dalším potenciálním problémem je

přítomnost nebezpečné stejnosměrné složky na výstupu zesilovače, která může být zavlčena až na samotný reproduktor a nenávratně jej poškodit. Obvykle se tak stane v případě poškození na výstupní části zesilovače. Vyskytne-li se na výstupu zesilovače stejnosměrná složka, je nutné co nejrychleji odpojit připojené reproduktory. Firmy zabývající se výrobou komerčních audio zesilovačů se snaží vytvořit sofistikované ochrany reproduktorů pro případ výskytu výše zmíněných poruchových stavů koncového stupně nebo nepříjemných transientů při zapnutí zesilovače. I když tyto obvody nejsou zcela spolehlivé a nemohou garantovat bezpečný provoz vašich reproduktorů, dávají jim alespoň šanci „přežít“ reakční dobu ochranných obvodů.

Monitorování stejnosměrné složky je řešeno pomocí integračního RC článku a detektoru překročení prahového napětí řešeného pomocí několika tranzistorů (obr. 2.4). V případě že střední hodnota signálu vykazuje silnou kladnou, nebo zápornou stejnosměrnou složku, aktivuje výstup ochrany blokování výstupního relé, předává signál pomocí diodové OR logiky propojovací desce (indikace okamžitého stavu na předním panelu) a zároveň je přiveden na vstup MKO pro indikační LED umístěnou na zadním panelu pro každý panel. Detekční úroveň je dána prahovým napětím tranzistorů ($U_{be} = 0,65V$) T1 a T2 a vstupním děličem tvořeným rezistory R3 - R4. Pokud napětí na integračním článku tvořeném R4-C1 překročí prahové napětí jednoho z těchto tranzistorů, tranzistor sepne a výstupní část je uvedena do log. L. Toto má za následek vybavení klopného obvodu (zde je v této funkci použit obvod 556) a předání této informace pomocí diodové OR logiky řídicí elektronice. Zároveň dochází k zablokování daného výstupu zesilovače odepnutím výstupního relé. Tranzistory jsou chráněny proti destrukci vzájemně antiparalelně orientovanými přechody BE a omezením maximálního proudu do báze. R9 je zde ve funkci pull-up, tj. pro definování výchozí logické hodnoty vstupu klopného obvodu v případě že žádný ze signálů za diodovým OR není aktivní. Reset klopného obvodu je pro všechny moduly ochrany společný a je zajišťován společnou propojovací deskou. Rychlost odezvy je přímo závislá na hodnotách vstupního integračního článku R4-C1, hodnoty musí být nastaveny tak, aby ani spodní mez přeneseného audio pásma nezpůsobovalo vybavení ochrany.

$$f_m = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_4 \cdot C_1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 10^5 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 1,59Hz \quad (2.7)$$

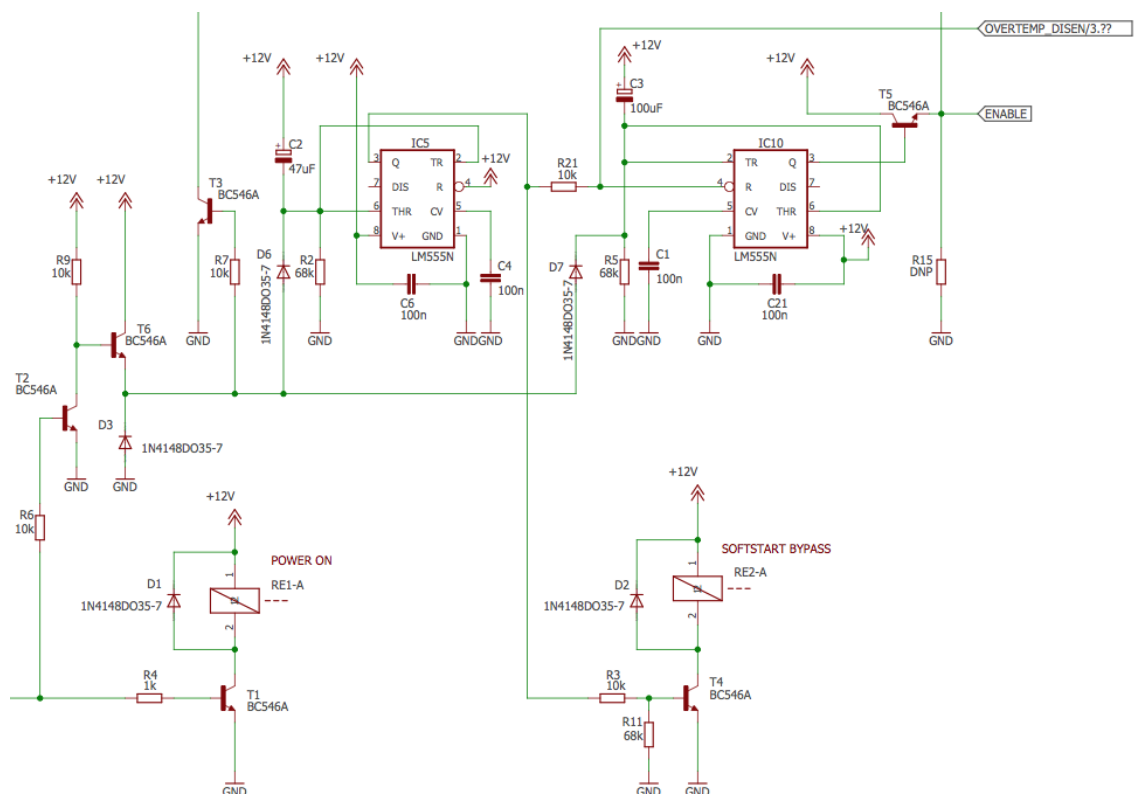
Z důvodu rozpínání stejnosměrného proudu při poruchovém stavu bude vhodné zapojit relé výstupních ochrany tak, aby při odpadnutí kotvy byl přepínací kontakt zkratován proti zemnímu potenciálu daného výstupu, tím bude zabezpečeno, že ani v případě vytažení oblouku nebude poruchový stejnosměrný proud protékat zátěží (reproduktorem). Pro zrychlení odpadu kotvy relé je použito zapojení se Zenerovou diodou pro definované omezení velikosti překmitu.



Obr. 2.4: Náhled schémata zapojení detekce stejnosměrné složky

2.5 Řízení napájení

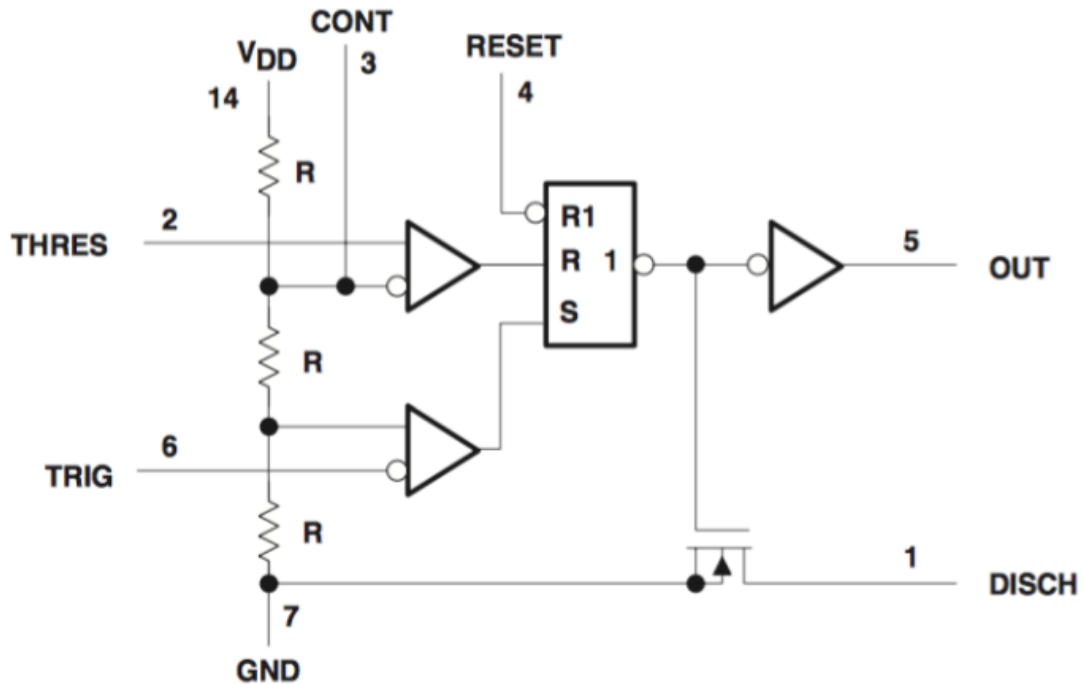
Tahle podkapitola bude pracovat se schématem 2.5. K vytvoření zpoždění lze výhodně použít obvod TLC555. Ve výchozím stavu je na signálu power enable logická L. Relé pro hlavní napájení je tedy vypnuté, na rezistoru R9 nevzniká žádný napěťový úbytek a T6 ve funkci emitorového sledovače impedančně odděluje toto napětí, které je následně použito jednak pro vynucený reset klopných obvodů poruchových indikátorů (reset aktivní), jednak pro zablokování časovačů ve výchozím vyčkávacím stavu (kondenzátory jsou nabity pouze na potenciál úbytku příslušné diody sečteného s U_{be} úbytkem tranzistoru T6), proud vytékající nabíjecími rezistory je zanedbatelný a zcela pokryt z emitoru T6. Dioda D3 zabezpečuje urychlené vybití kondenzátorů časovačů v případě výpadku síťového napětí. V momentě přivedení log. H na signál power enable je aktivováno hlavní relé pro napájení silových transformátorů, na bázi T6 je napětí dané saturačním napětím T2 v sepnutém stavu. Na emitoru T6 je napětí prakticky nulové, kondenzátory časovačů jsou izolovány pomocí diod D6 a D7, jsou postupně nabíjeny a po poklesnutí pod prahové napětí obvodu 555 dochází k překlopení výstupů a nejprve přemostění relé softstartu, následně i vystavení povolovacího signálu jednotlivých výstupních ochranných modulů. Časovač opožděného připojení reproduktorů je navíc blokován výstupem pro ovládání softstartu - v případě že nedojde k aktivaci relé softstartu, nejsou výstupy zesilovačů



Obr. 2.5: Náhled schémata zapojení časovačů pro opožděné sepnutí relé

povoleny.

Časovač 555 je monolitický integrovaný obvod. Jeho zapojení se skládá z napěťového děliče, ze dvou komparátorů, z paměťového klopného obvodu, z výkonového koncového stupně a ze spínacího tranzistoru(??). Trigger (spouštěč): Pin překlápí (spouští) vnitřní komparátor poklesne-li na tomto pinu napětí pod $1/3$ napájecího napětí. Pin má vysoký vstupní odpor $>2\text{ M}\Omega$. V astabilním režimu se využívá pro sledování napětí na časovacím kondenzátoru, v bistabilním režimu je na něm umístěn spínací prvek (například tlačítko). Treshold (komparátor): Nuluje vnitřní komparátor stoupne-li napětí na tomto pinu nad $2/3$ úroveň napájecího napětí. Pin má vysoký vstupní odpor $>10\text{ M}\Omega$. Tento pin se většinou využívá k měření napětí časovacího kondenzátoru. Nulování (reset): Poklesne-li napětí na tomto pinu pod úroveň $0,7\text{V}$, dojde k vynulování vnitřního komparátoru. V případě nevyužití pinu je potřeba pin připojit na úroveň napájecího napětí. Impedance pinu je kolem $10\text{ k}\Omega$. Řídící vstup (control): Může být použit k nastavení prahové úrovně vstupů Spouštění a Komparátor. Je na něm vyvedena úroveň $2/3$ napájecího napětí z vnitřního děliče tvořeného třemi odpory $5\text{ k}\Omega$. Tato funkce není obvykle využita a pin se pro odstranění rušení (není nezbytně nutné) připojuje přes keramický kondenzátor 10 nF na zem. Vybíjení (discharge) není ve skutečnosti vstup, ale je zde uveden



Obr. 2.6: Schéma vnitřní struktury obvodu TLC555

kvůli přehlednosti. Pin je vnitřním tranzistorem připojen na zem v případě, kdy je vnitřní klopný obvod v aktivním stavu. Pin je typu OC (open collector) a většinou se využívá pro vybíjení časovacího kondenzátoru při použití jako astabilní klopný obvod. Výpočty dle katalogového listu [?tme?] pro 3,5 a 7,5 s od zapnutí:

$$t_{3,5[s]} = 1,1 \cdot R \cdot C[s] \rightarrow R = \frac{3,5}{1,1 \cdot 47 \cdot 10^{-6}} = 67,698k\Omega \Rightarrow 68k$$

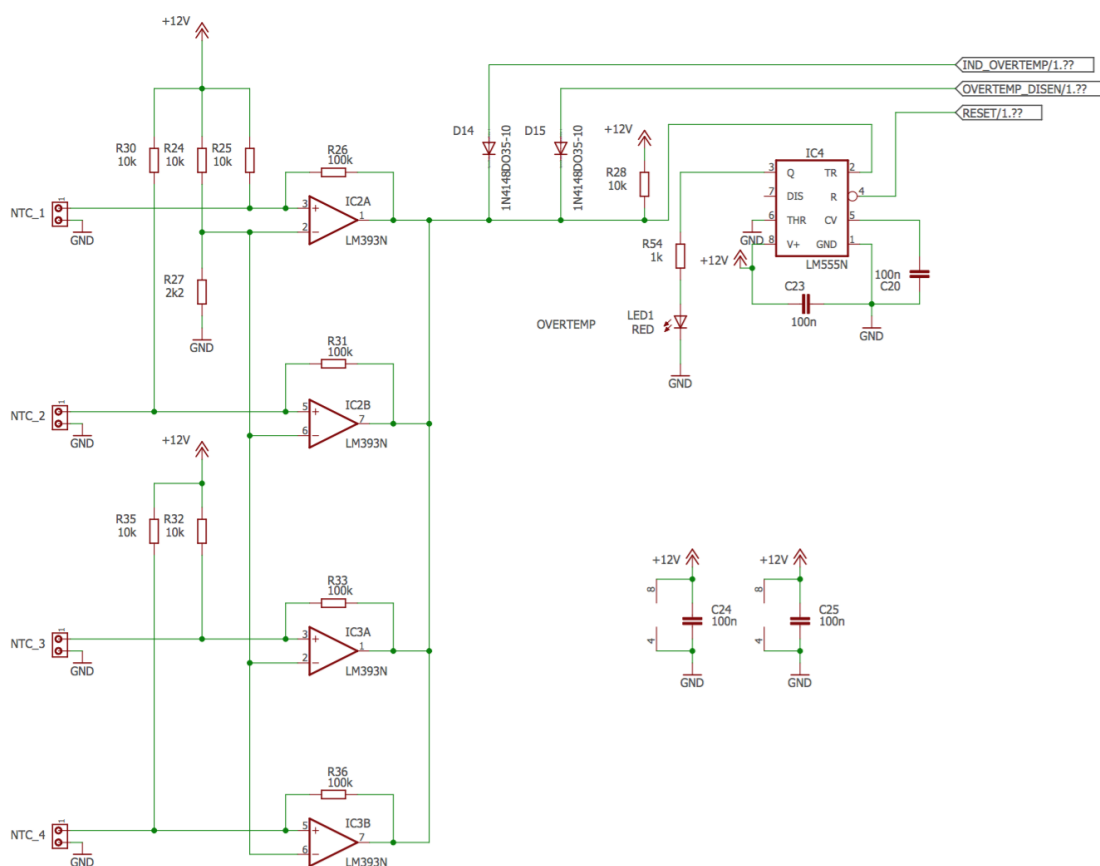
$$t_{7[s]} = 1,1 \cdot R \cdot C[s] \rightarrow R = \frac{7}{1,1 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = 63,636k\Omega \Rightarrow 64k$$
(2.8)

Podstatný rozdíl mezi standardní bipolární verzí obvodu NE555 a CMOS verzí TLC555 je především statický proudový odběr, který je v případě CMOS verze cca 20x nižší. Nevýhodou použití CMOS varianty je však asymetrická budící schopnost výstupu - zatímco bipolární verze zvládá ± 200 mA symetricky, v případě CMOS verze je v případě fungování jako zdroje proudu možno výstup zatížit maximálně cca 10 mA. V log. L (proudová nora) je síla výstupu srovnatelná. Tento problém je v zapojení vyřešen aplikováním emitorového sledovače pomocí tranzistoru T5. Rezistor R15 definuje výchozí logickou úroveň v případě neaktivity výstupu, ve schématu je označen jako “neosazovat”, neboť jeho funkci přebírá dělič na vstupu Schmittova klopného obvodu, kterým jsou zpracovávány signály pro monitorování stavu ochran.

2.6 Indikace poruch a stavu

Zařízení bude schopné indikovat 2 poruchové stavy - přehřátí a detekci stejnosměrné složky na výstupu. Dle požadavků zadavatele poslouží pro indikaci poruchových stavů LED. Signály indikující stav zařízení budou také vyvedeny na společný konektor s pomocným napájením pro vstupní a řídicí část zesilovače. Pro větší přehlednost můžou být použité odlišné barvy LED pro každý z uvedených stavů. Jako další možnost pro přesnější sledování stavu zařízení může být rozšíření o indikaci limity, indikaci intenzity vstupního signálu apod. Pro účely monitorování stavu jsou vyvedeny pro řídicí elektroniku sloučený signál hlášení přehřátí (logický OR všech modulů) a sloučený signál aktivace ochrany proti stejnosměrné složce. Vstupní i výstupní logické signály jsou ošetřeny Schmittovými klopnými obvody, předpokládá se 5 V logika.

2.7 Teplotní senzory chladičů



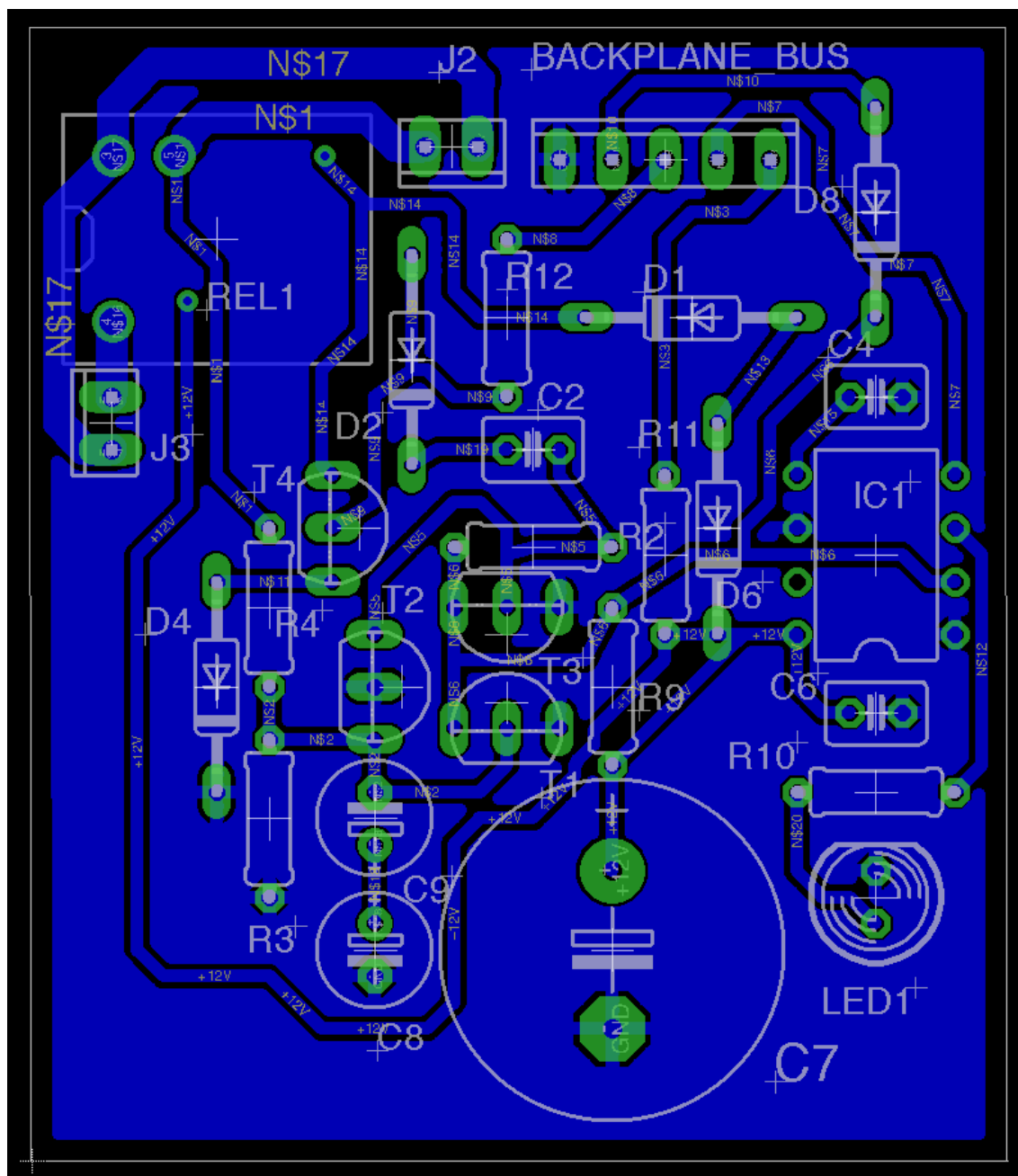
Obr. 2.7: Schéma zapojení termistoru

Zapojení klopného obvodu s 555 je téměř identické (vč. resetu) k zapojení použitého u DC ochran každého výstupu. Monitorování je prováděno pomocí komparátoru s hysterezí s výstupem typu otevřený kolektor. Nezávislosti na úrovni napájecího napětí daného obvodu je dosaženo porovnáváním napětí fixního a proměnného děliče napájeného z totožného napětí. Použití termistoru s NTC charakteristikou o hodnotě $10\text{ k}\Omega$, jakožto velmi používaného, nabízí velice široký výběr dostupných pouzder, včetně kovových se šroubovým výstupkem pro přímé uchycení do chladiče i obvyklejších s jednoduchou dírou na šroubek, kdy závit je vytvořen přímo v chladiči. Nastavení vyhodnocovací úrovně vychází z podobnosti dvou děličů, referenční a měřící - z katalogového listu byla vyčtena při zvolené maximální teplotě $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ hodnota termistoru $1\text{ k}\Omega$, do referenčního děliče je tedy osazena hodnota totožná. Tím je dosaženo překlopení výstupu komparátoru v momentě překročení zvolené teploty. Pro zamezení nežádoucím oscilacím je zavedena pomocí zpětné vazby rezistorem R8 hystereze.

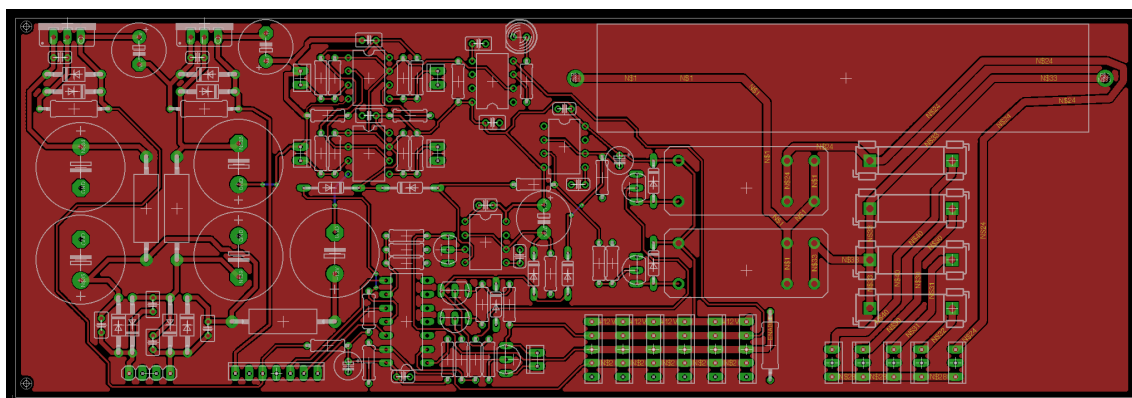
2.8 Návrh plošných spojů

Návrhy plošných spojů bylo dle zadání nutné zhotovit v prostředí CAD SOFT EAGLE, konkrétně pak ve verzi 8.2.1. Jelikož knihovny prostředí EAGLE neobsahovaly některé prvky, bylo je nutné nejprve navrhnout dle katalogových specifikací, konkrétně se jednalo o návrh schémat a pouzder obou typů relé a výkonového rezistoru v obvodu softstart (obr. 2.8). Návrh plošných spojů byl rozdělen do dvou částí, první návrh obsahuje samotný modul ochrany, který bude vyroben v šesti kopiích a hlavní distribuční desky obsahující obvody pro tepelnou ochranu, eliminaci proudové špičky po zapnutí a zpoždění připojení zátěže.

Na obou deskách bylo pro zjednodušení návrhu použito „rozlití“ země. Zároveň bylo zohledněno dimenzování cest v závislosti na předpokládáné velikosti průtoku proudu.



Obr. 2.8: Návrh desky modulu ochrany



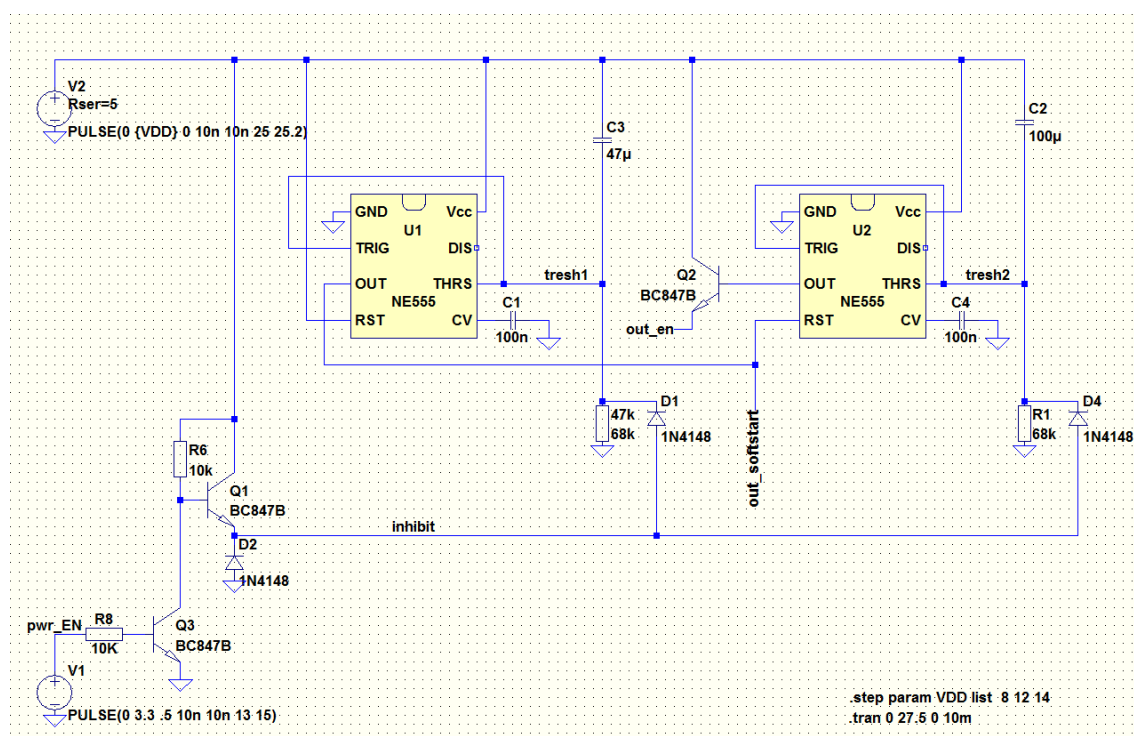
Obr. 2.9: Návrh desky distribuce ochran

3 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI NÁVRHU

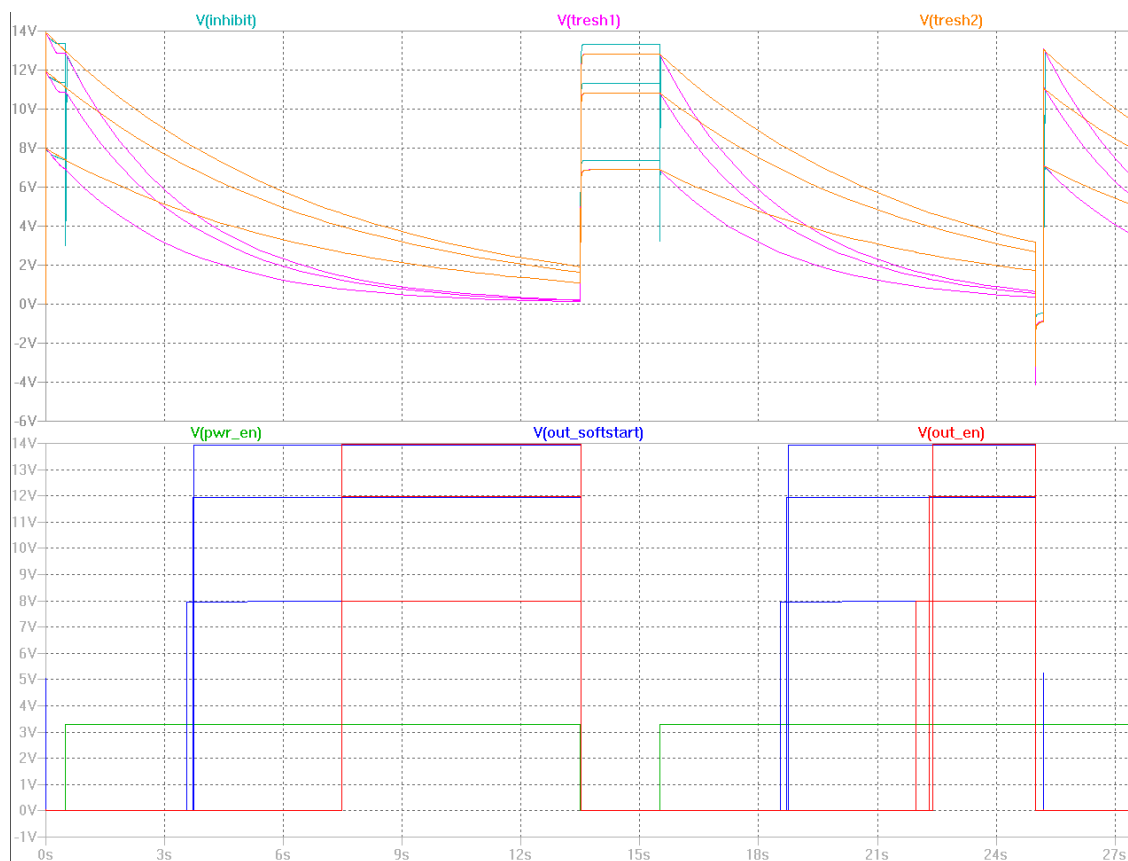
K simulacím byl využit volně šiřitelný SW LTSpice firmy Linear Technology dostupný z [8].

3.1 Časovač softstartu a opožděného připojení reproduktoru

Simulací byla ověřena funkčnost zapojení s obvodem 555, zajišťující přemostění výkonového odporu pro omezení proudové špičky a zpožděné připojení zátěže. Byla také otestována citlivost na změny v úrovni napájecího napětí. Na základě příložených grafů je patrné, že změny napájení ovlivňují časy sepnutí jednotlivých sekcí jen nepatrně (do 10%), s ohledem na nekritickou aplikaci je tato odchylka zanedbatelná. V zaznamenaných průbězích je vidět jednak dvakrát po sobě aktivace a deaktivace řídicím vstupem, čímž je ověřena funkčnost obvodu blokování časovačů, jednak výpadek napájení v čase 25 s od začátku simulace, kde je možné vidět že po obnovení napájení v čase 25,2 s jsou kondenzátory časovačů již vybity a začínají odpočet z výchozího stavu.

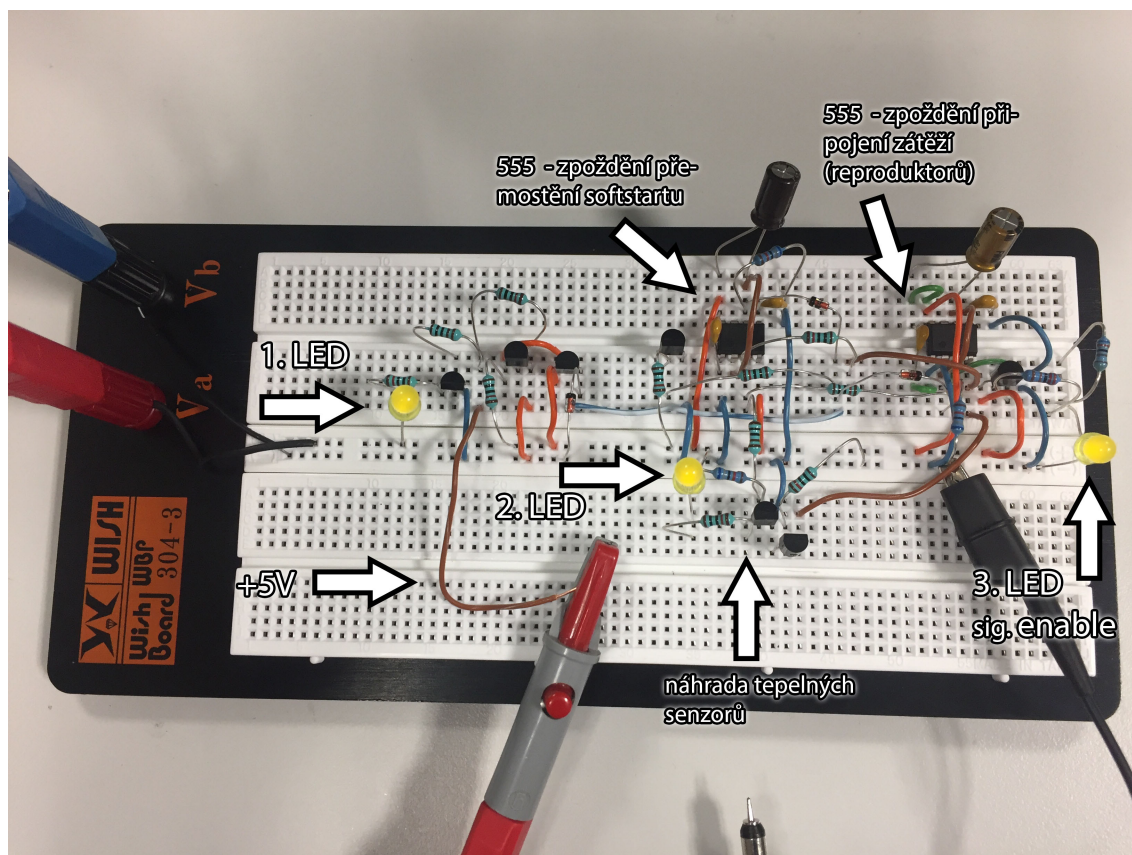


Obr. 3.1: Simulační schéma časovačů



Obr. 3.2: Simulační graf časovačů

Současně byl proveden test obvodů časovačů na zkušebním vzorku v laboratořích podpořených z projektu SIX. Na obr. 3.3 můžeme vidět zapojení dvou obvodů typu 555, kdy probíhající změny je možné vidět na LED diodách, jež znázorňují změny mezi jednotlivými stavy. Toto zapojení po přivedení logické H (5 V logika) indikuje přivedení tohoto signálu a zároveň spustí první časovač, po uplynutí cca 3,5 s se rozsvítí druhá LED dioda indikující přemostění softstart obvodu. Spouští se odpočet druhého obvodu typu 555, po uplynutí přibližně stejné doby přichází signál enable, díky kterému dochází k sepnutí relé, jež připojují zátěže na výstupy zesilovačů. Při testování funkce celého zapojení proběhl i test rychlého vypnutí a zapnutí, pro ověření dostatečně rychlého vybití časovacích kondenzátorů. Celý průběh tohoto testu byl zaznamenán na video, které naleznete v příloze této práce. Manipulace rezistorem sloužila jako simulace změny signálu z NTC termistorů, zároveň se zjišťovala rychlost reakce na tuto změnu. Jak můžete vidět na indikaci poslední LED diody, reakce na změnu je velmi rychlá.



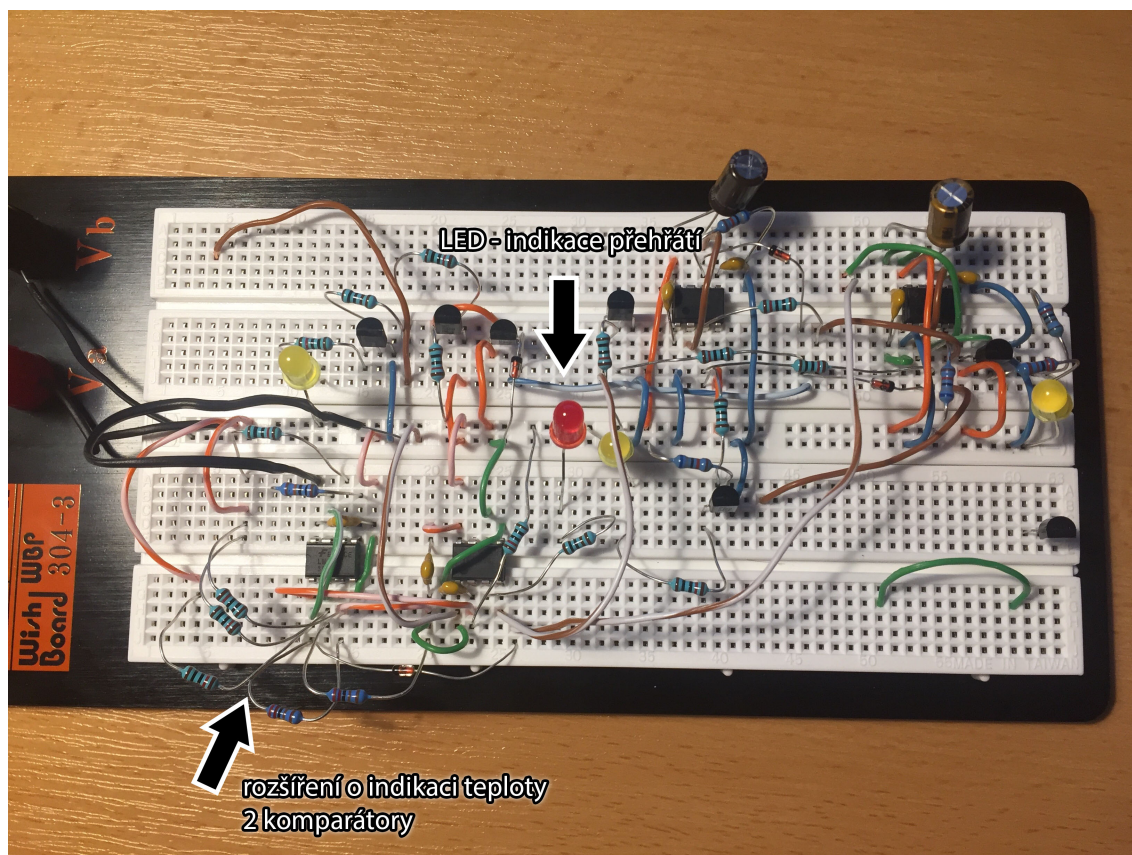
Obr. 3.3: Nepájivé pole s LED diodami

3.2 Test teplotních senzorů

Jeho zobrazení naleznete na (obr.3.4). Dalším rozšířením testu na nepájivém kontaktním poli bylo použití dvou komparátorů LM393 a obvodu 555. Zobrazení naleznete na obr. 3.4. Cílem bylo prověřit správnou funkci teplotních senzorů a to za použití dvou NTC termistorů a zapojení ve smyslu napětového děliče, termistory byly suplovány rezistory o konstantní hodnotě a to ve třech kombinacích, hodnoty obou odporů vyšší, než hodnota na děliči, jedna hodnota odporu vyšší, druhá nižší a ve třetím případě obě hodnoty nižší. Při prvním testu nepracovala kombinace obvodů LM393 a 555 dle očekávání. Po pečlivém prozkoumání variant zapojení s obvodem 555 byla identifikována chyba a to v záměně vstupů Trigger a Threshold. Poté již zapojení pracovalo dle očekávání.

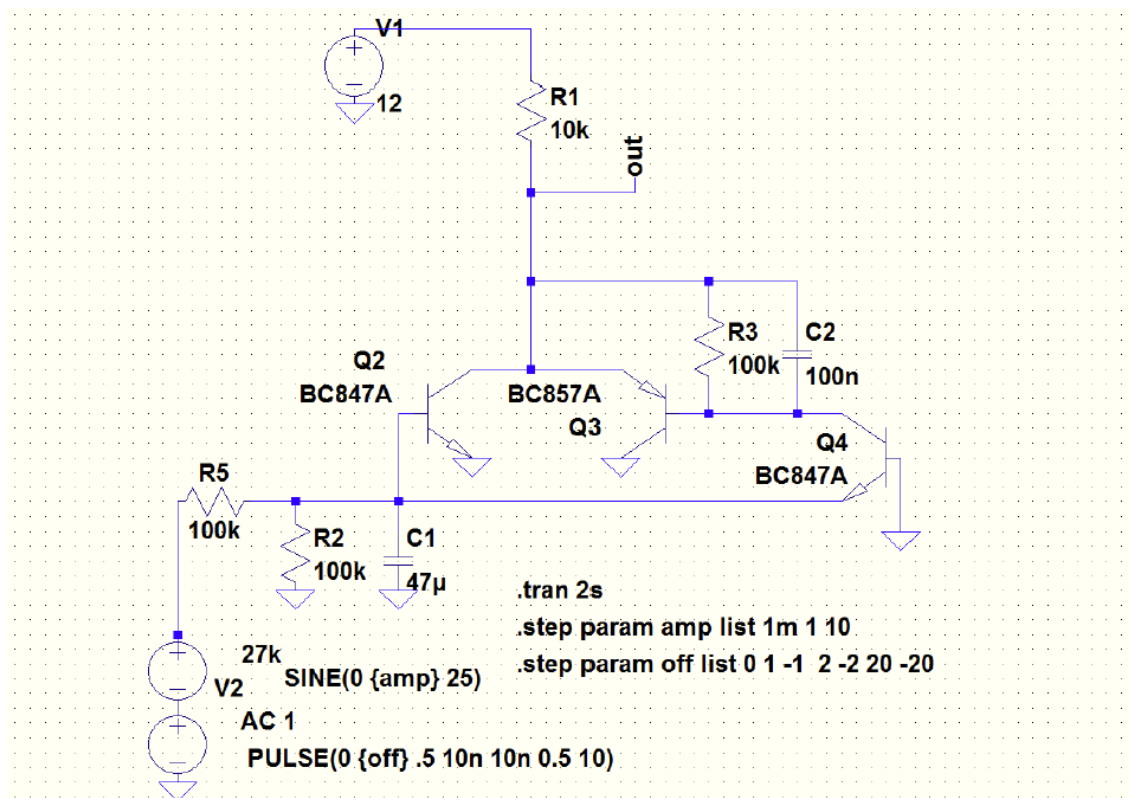
3.3 Detektor stejnosměrné složky

Detektor stejnosměrné složky byl kontrolován simulací pomocí rozmítání parametru výstupní amplitudy a napětí stejnosměrné složky. Na základě simulace bylo potvr-

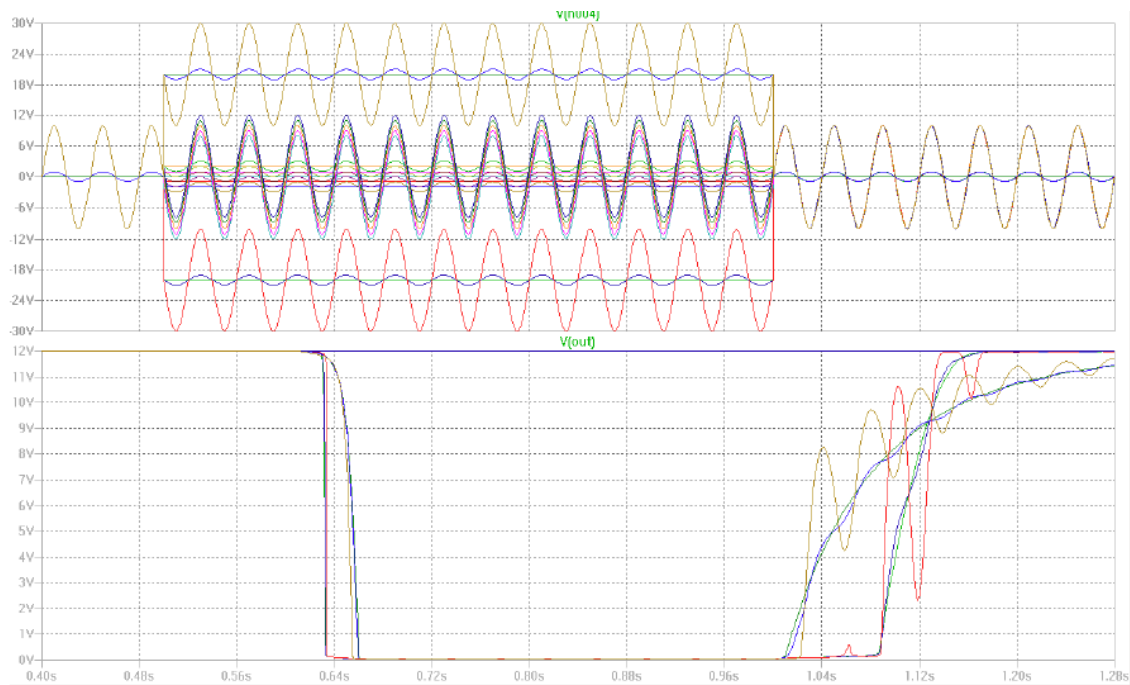


Obr. 3.4: Test teplotních senzorů na nepájitvém poli

zeno, že k aktivaci ochrany dochází pouze v žádoucích případech. Princip funkce zapojení je popsán ve třetí kapitole.



Obr. 3.5: Simulační schéma detektoru DC složky



Obr. 3.6: Simulované průběhy

4 MECHANICKÉ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Jedním z požadavků na realizaci je minimalizace kabelových propojů, konstrukčně proto bude celý systém rozdělen na 2 moduly - základní DPS s řízením napájení a pomocným zdrojem, teplotními senzory a 6x totožný, jednokanálový modul ochrany zesilovače před zavlečením stejnosměrné složky na výstup a s relé pro připojení zátěže. Toto rozložení umožní minimalizaci kabelových propojů, neboť první modul může být řešen jako úzká DPS s propojením potřebných signálů k jednotlivým modulům ochrany pomocí konektorů MTA, zvolených po dohodě s vedoucím práce, navíc bude usnadněn návrh a ožiování ochrany, návrh se tak omezuje na jeden jednokanálový motiv. Logické indikační výstupy pro účely řídicího systému jsou sloučeny pomocí diodové OR logiky do společné sběrnice. Další redukce kabelových propojů je možná použitím pojistkových pouzder určených k přímé montáži do DPS (typ s pouzdem pojistky na zasunutí). Vzhledem k požadavku na indikaci poruchových stavů každého jednotlivého kanálu s pamětí chyby (bistabilní klopný obvod) a výslednému počtu indikačních diod je příhodné jejich umístění na zadní panel v prostoru nad výstupními zdírkami pro reproduktory - obě v přímé montáži na DPS. Pro usnadnění montáže i případného servisu jednotlivých modulů ochrany by bylo adekvátní uvážit i možnost použití miniaturního kovového panelu a odpovídajícího výřezu v zadním panelu zesilovače. Tento panel by jednak zabezpečoval za předpokladu bezpečného ukotvení k DPS ochranu pájených spojů konektorů a indikátorů před zbytečným silovým namáháním, jednak by velice usnadnil montáž a demontáž jednotlivých modulů (zajištění pouze dvěma šroubky skrz zadní panel). Díky takto zvolenému uspořádání se množství kabelů zredukovalo jen na nutné minimum a to:

1x třížilový přívod ze síťového napájecího konektoru

3x dvou/tří-žilový vývod pro toroidní transformátory napájení výkonových zesilovačů

4x dvojžilový přívod k NTC termistorům pro monitorování jednotlivých chladičů zesilovačů

6x dvojžilový přívod z výstupu zesilovače do vstupu příslušné ochrany a sdružený konektor pro plochý kabel pro přivedení pomocného napájení a všech řídicích

a indikačních signálů k elektronice řízení (není předmětem této práce). Vhodnou volbou rozdílných typů konektorů na základě požadovaných izolačních napětí a proudové zatížitelnosti je navíc možné snadno zamezit nechtěné, nebezpečné záměně pozic při manipulaci s kabelovými svazky. Požadované indikátory chybového stavu ochrany s pamětí bude možno resetovat buďto vypnutím a zapnutím zařízení, nebo

pomocí tlačítka umístěného na zadním panelu zesilovače, opět je možno použít přímou montáž do DPS.

4.1 Eliminace vzniku zemních smyček

V audiozařízeních je obvykle jeden referenční bod země, od kterého se země rozvádí hvězdicovitě do jednotlivých obvodů zesilovače. PA moduly mají nesymetrické vstupy audio signálu, takže inherentně potřebují zem na vstupu spojenou se zemí předzesilovače. Zem předzesilovače - jeho napájení - je poskytnuta právě z obvodů ochrany. Čímž je zajištěna jediná společná zem s jedinou cestou. Země PA modulů musí být s ohledem na SE vstupy přivedeny z modulů předzesilovače - země jsou tedy propojeny a to pouze jedinou cestou, modul ochrany nemá žádné galvanické spojení na záporný pól zesilovače úmyslně, právě z důvodu zabránění vytvoření zemních smyček.

5 ZÁVĚR

Konstrukce je řešena s použitím velice rozšířených, komoditních součástek, jedinou výjimku tvoří relé určená pro automotive aplikace, které však mají pro tuto aplikaci opodstatnění ve své odolnosti.

Díky modularitě systému je značně zjednodušeno testování, oživování, ale i případný servis praktické realizace této konstrukce. Implementací integrovaného obvodu 555 ve variantě CMOS se podařilo dosáhnout snížení klidové spotřeby z původních 1,8 W na cca 400 mW.

Dále je možno k modulům ochran doplnit i detektor limitace výstupu pro usnadnění nastavování maximální signálové úrovně jednotlivých kanálů.

LITERATURA

- [1] ČSN EN 55014-1 ed 3. *Elektromagnetická kompatibilita - Požadavky na spotřebiče pro domácnost, elektrické nářadí a podobné přístroje - Část 1: Emise*. Praha : ÚNMZ, 6/2007.
- [2] EPCOS. *NTC thermistors for temperature measurement*. [online]. únor 2009. [Cit. 14.12.2016]. Dostupné z URL: <<http://www.tme.eu/cz/Document/df738e1694624b65da1709a66f31062a/B57045.pdf>>.
- [3] HAHN: *Katalog 2016 EN* [online]. Německo, 2003 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z URL: <<http://hahn-trafo.com/katalog/Hahn-Katalog-2016-EN.pdf>>.
- [4] HÁJEK, Jan. *3x časovač 555: praktická zapojení se třemi časovači*. Praha: BEN - technická literatura, 1999. 555. ISBN 80-86056-36-8.
- [5] HEŘMAN, Josef. *Příručka silnoprůdové elektrotechniky. 2. nezm. vyd.* Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986.
- [6] HOROWITZ, Paul a Winfield. HILL. *The art of electronics. 2nd ed.* New York: Cambridge University Press, 1989. ISBN 0-521-37095-7.
- [7] LÁNÍČEK, Robert. *Elektronika: obvody, součástky, děje*. Praha: BEN - technická literatura, 1998. ISBN 80-86056-25-2.
- [8] LINEAR TECHNOLOGY. *LT Spice* [online]. California [cit. 2016-12-14]. Dostupné z URL: <<http://www.linear.com/designtools/software/#LTspice>>.
- [9] NXP SEMICONDUCTORS *1N4148; 1N4448 High-speed diodes*. [online]. 10. říjen 2004. [cit. 13. prosince 2016] Dostupné z URL: <http://www.nxp.com/documents/data_sheet/1N4148_1N4448.pdf>.
- [10] PANDATRON.CZ. *555 a 556 - popis obvodu* [online]. 2008 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z URL: <http://pandatron.cz/?489&555_a_556_-_popis_obvodu>.
- [11] PHILIPS SEMICONDUCTORS. *NE555 and NE556 applications* [online]. prosinec 1988. [cit. 13. prosince 2016]. Dostupné z URL: <http://www.doctrionics.co.uk/pdf_files/555an.pdf>.
- [12] SLONE, G. Randy. *The audiophile's project sourcebook*. New York: McGraw-Hill, 2002. ISBN 0-07-137929-0.

- [13] TEXAS INSTRUMENTS. *$\mu A 7800$ SERIES POSITIVE-VOLTAGE REGULATORS* [online]. rev. květen 2003. [cit. 14.12.2016]. Dostupné z URL: <<https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/LM7805.pdf>>.
- [14] TEXAS INSTRUMENTS. *TLC556, TLC556Y DUAL LinCMOS TIMERS* [online]. poslední aktualizace září 1997. [cit. 13.prosince 2016]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc556.pdf>>.
- [15] TME. *Talema 55100-P1S2* [online]. [cit. 13.prosince 2016]. Dostupné z URL: <<http://www.tme.eu/cz/details/55100-p1s2/toroidni-transformatory/talema/>>.
- [16] ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY: *9.2.3 Normy pro vysokofrekvenční rušení (RFI Standards)* [online]. Brno [cit. 2016-12-14]. Dostupné z URL: <<http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node77>>.

A OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

/ kořenový adresář přiloženého CD
└ 174459-Vojtech-Kryška-BP.pdf samotná BP
└ projekt EAGLE.zip celý projekt v sw EAGLE
└ datasheety použitých součástek a obvodů.zip archiv datasheetů
└ video testování.mov video testování
└ navod-sablona_FEKT.pdf návod na používání šablony
└ obrázky složka obrázků použitých v práci