

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Přírodovědecká fakulta

**NÁVRH ŘÍZENÍ SOLENOIDOVÉHO VENTILU
POMOCÍ INTEGROVANÉHO ZDROJE
PROUDU NAPÁJENÉHO Z PALUBNÍ SÍTĚ
LETOUNU**

Diplomová práce

Bc. Michal Šenigl

Školitel: Ing. Michal Šerý, Ph.D.

České Budějovice 2022

Bibliografické údaje:

M. Šenigl, 2022: Návrh řízení solenoidového ventilu pomocí integrovaného zdroje proudu napájeného z palubní sítě letounu [Solenoid valve controlled by an integrated current source powered from the aircraft's on-board network, Mgr. Thesis, in Czech] – 72 p., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic

Abstrakt:

Tato práce se zabývá vypracováním konstrukčního návrhu zdroje konstantního proudu pro solenoidový ventil napájený a řízený přímo z palubní sítě letounu. Dále experimentálním ověřením základních vlastností prototypu a jeho optimalizací. Poté bylo provedeno testování prototypu z pohledu působení vnějších vlivů na základě zkoušek odpovídajících normě RTCA DO-160g. Klíčovými parametry, které byly optimalizovány při návrhu zařízení byly: Teplotní stabilita, proudová stabilita, modulárnost a miniaturizace.

Abstract:

The aim of this thesis is to develop design of a constant current source for a solenoid valve powered and controlled directly from the aircraft's on-board network and experimental verification of the basic properties of the prototype. Furthermore, the prototype was tested for the effect of external influences on the basis of tests corresponding to the RTCA DO-160g standard. The key parameters that were optimized during the device design were: Temperature stability, current stability and modularity.

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracoval pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích,

Dne

Podpis studenta

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval Ing. Michalovi Šerému, Ph.D. za trpělivost, ochotu a odborné rady, které mi poskytl v průběhu zpracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat kolegům a to Ing. Františku Staňkovi za pomoc při návrhu a stavbě zařízení, Ing. Janu Pelcmanovi za spolupráci při návrhu simulací a panu Václavu Pilbauerovi za pomoc při realizaci některých experimentů. A v neposlední řadě mojí rodině, která mě bezpodmínečně podporovala v průběhu psaní diplomové práce.

Obsah:

1.	Úvod	1
1.1	Letecký průmysl.....	1
1.1.1	Modulární přístup.....	1
1.1.1.1	Modulární třicestný ventil	1
1.2	Vývoj pro letecký průmysl	2
1.2.1	Technické zadání	3
1.2.2	Finanční odhad.....	3
1.2.3	Předběžný návrh.....	3
1.2.4	Detailní návrh.....	3
1.2.5	Prototyp.....	4
1.2.6	Testování.....	4
1.3	Výzvy při konstrukci pro letecký průmysl.....	4
1.4	Norma RTCA DO-160G.....	5
2.	Teorie	7
2.1	Zdroj konstantního proudu	7
2.1.1	Ideální zdroj proudu	7
2.1.2	Reálný zdroj proudu.....	8
2.1.3	Pasivní zdroje proudu	8
2.1.4	Aktivní zdroje proudu	9
2.1.5	Bipolární tranzistor jako zdroj proudu	9
2.1.6	Spínané zdroje.....	10
2.1.6.1	Operační zesilovače.....	11
2.1.7	Charge pump.....	12
2.1.8	Buck converter	13
2.2	Indukční zátěž.....	14
2.2.1	Solenoid	15
2.3	Časovací obvody.....	17
2.3.1	RC články.....	17

2.3.2 Krystal a binární čítač	18
2.3.3 Integrovaný obvod 555	18
2.3.3.1 Monostabilní 555	19
2.4 Simulační software	19
2.4.1 TINA.....	19
2.4.2 LTspice	20
2.4.3 FEMM.....	21
2.4.3.1 LUA script.....	22
2.5 Návrhový software.....	23
2.5.1 EAGLE	23
2.5.2 Fusion 360.....	24
2.5.3 KiCAD	24
3. Návrh prototypu	25
3.1 Technické zadání	25
3.2 Zdroj založený na LM5117.....	27
3.2.1 Undervoltage lockout.....	27
3.2.2 Nastavení frekvence.....	28
3.2.3 Soft-Start.....	29
3.2.4 Ochrana před zkratem - Hiccup Mode	30
3.2.5 Teplotní ochrana	31
3.2.6 Zpětná vazba	31
3.2.7 Nastavení časování.....	33
3.3 Nedostatek elektronických komponent.....	34
3.4 Zdroj založený na LM2598.....	34
3.4.1 Periferie LM2598.....	35
4. Zkoušky a výsledky	36
4.1 Simulace obvodů	36
4.1.1 Simulace LM5117.....	36
4.1.2 Simulace LM2598.....	37

4.1.3 Simulace zpožďovacího obvodu	38
4.1.4 Simulace solenoidu	39
4.1.5 Simulace zahřívání elektroniky	40
4.2 Základní parametry	41
4.2.1 Základní parametry LM5117	41
4.2.2 Základní parametry LM2598	42
4.3 Zkoušky podle RTCA DO-160G	42
4.3.1 Teplotní zkoušky	43
4.3.1.1 Kategorie	43
4.3.1.2 Měřicí zařízení	43
4.3.1.3 Test dlouhodobé nízké operační teploty	43
4.3.1.4 Nízkoteplotní test přežití na zemi a nízké operační teploty	45
4.3.1.5 Test dlouhodobé vysoké operační teploty	47
4.3.1.6 Vysokoteplotní test přežití na zemi a vysoké operační teploty	49
4.3.1.7 Test dekomprese	50
4.3.2 Zkouška magnetických vlivů	51
4.3.3 Zkouška odolnosti proti elektrostatickému výboji	53
4.3.4 Zkoušky audio-frekvenčního rušení	54
4.3.5 Zkoušky stability palubní sítě	58
4.3.5.1 Krátkodobé přerušení dodávky	58
4.3.5.2 Napěťová špička	60
4.3.5.3 Napěťový úbytek při startu motoru	61
4.3.5.4 Požadavky na náběhový proud	62
4.3.5.5 Zvlnění vstupního proudu	63
4.4 Ověření modelu časování zdroje	64
4.5 Ověření modelu zahřívání elektroniky	65
4.6 Ověření modelu solenoidu	65
5. Diskuse	67
6. Závěr	71

1. Úvod

1.1 Letecký průmysl

Letecký průmysl se zabývá vývojem a produkcí jak součástí, tak výsledných produktů jako jsou letadla, drony a helikoptéry. Letecký a obranný průmysl by měl v nadcházející době zaznamenat silný celosvětový růst (Altıparmak a Xiao 2021). Stále zůstávají bezpečnost a kvalita prvořadé, ale větší důraz je kladen na nákladovou efektivitu a s tím související optimalizaci dodavatelského řetězce. Výsledkem je zvýšená poptávka po nových řešeních, která umožní snížit náklady jak na výrobu, tak na provoz.

1.1.1 Modulární přístup

Jednou z nejsnazších metodou, jak snížit náklady a zároveň udržet případně zvýšit bezpečnost je modulární přístup. Jedná se o metodu, která umožňuje využít jeden produkt pro více aplikací. V ideálním případě tak, že jej lze vložit do systému bez dalších úprav (Wozniak-Szpakiewicz et al. 2018).

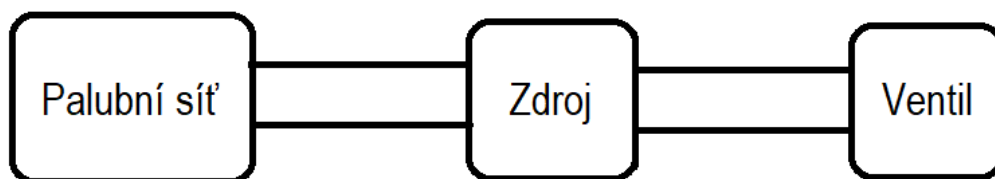
1.1.1.1 Modulární třicestný ventil

V posledních letech dochází k nárůstu produktové řady, ovšem na rozdíl od automobilového průmyslu se letecký často zabývá mnohem nižšími produkcemi. Příkladem může být třicestný ventil. Tento typ ventilu se často využívá jako bezpečnostní prvek. Například u palivové pumpy je takovýto ventil. Ten může v případě potřeby odvést pumpované palivo zpět do nádrže.

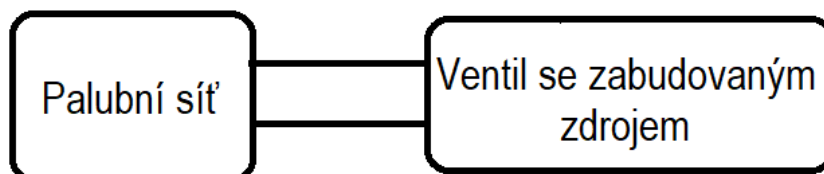
Standardním přístupem k takovému ventilu je vytvoření zdroje, který dostává signál od řídicí jednotky a podle toho řídí spínání ventilů (Wang et al. 2022). Nevýhodou je vyšší složitost při údržbě, vyšší cena, a hlavně potřeba mít správný zdroj k danému ventilu. Zdroj poté musí mít stejný komunikační protokol jako řídicí jednotka.

Modernizovaný přístup obchází řadu těchto problémů. Například již není potřeba samostatný zdroj, to zjednoduší jak údržbu, tak celkově ušetří váhu (viz. Obrázek 1). Další výhodou je řízení. To je umožněno spínáním jednoho spínače. Ten může být zabudován přímo do řídicí jednotky a nehrozí tak problém s komunikačním protokolem.

Standartní přístup:



Modernizovaný přístup:



Obrázek 1: Porovnání standartního a modulárního přístupu

Díky tomu lze ventil řídit pouze přivedením neregulovaného palubního napětí, to umožní například rychlou výměnu ventilu. V případě potíží se pouze odpojí starý a zapojí nový bez dalších úprav. Zároveň může nový ventil mít jiné vlastnosti. V případě standartního provedení by pak bylo nutné vyměnit i jeho zdroj.

Cílem této práce je sestavit a otestovat právě takovýto zabudovaný zdroj, který dokáže spínat ventil na širokém rozpětí podmínek palubní sítě.

1.2 Vývoj pro letecký průmysl

Vývoj pro letecký průmysl je jeden z nejnáročnějších typů vývoje, je nutné zvažovat mnoho různých kombinací externích a interních podmínek daného dílu. Moderní přístup s využitím matematických modelů tak umožňuje získat hlubší znalosti o daném problému i v nestandardních situacích. Ovšem je nutné si uvědomit to, že se jedná o zjednodušené modely a s jejich pomocí nelze proto přesně určit chování systému ve všech podmínkách. Na druhou stranu je díky těmto modelům možné ušetřit značné množství zdrojů dříve využitých na prototypování tím, že se vyřadí nevhodné návrhy ještě před fází, při které dochází na fyzickou výrobu.

1.2.1 Technické zadání

Před začátkem jakéhokoli projektu je nutné jasně definovat funkci dílce v systému, jeho uchycení, v případě aktivních prvků komunikační protokol, povolené rozsahy a další. Tyto podmínky dále rozhodují o procesu vývoje. Například v případě, že již existuje podobný výrobek lze založit finanční odhad na zkušenosti z přechozího projektu.

Nejčastěji jej zadává zákazník, přesně podle požadavků specifického stroje, například regulátor vrtule. Existují i zadání interní na dílce, které lze využít ve více různých aplikacích, například třicestný ventil.

1.2.2 Finanční odhad

Po odhadnutí výsledné ceny za vývoj a produkci je nutné zjistit, zda má za daných podmínek projekt smysl jak pro výrobce, tak pro zákazníka. Pokud ano, přechází se do fáze návrhu, po které bude výsledná cena přesnější.

1.2.3 Předběžný návrh

Tradičně se v této části vytipují součástky, které splňují podmínky technického zadání, určí se základní tvar a provedou se základní simulace podle zvolených součástek. V této fázi je velmi častá změna komponentů v případě lepších výsledků v simulaci. V případě větších projektů se již v této fázi zapojí více týmů, kde je každý zodpovědný za přidělenou část projektu.

1.2.4 Detailní návrh

V tomto kroku jsou již všechny komponenty určeny a řeší se samotný návrh produktu. Je nutné vytvořit výrobní dokumentaci, v případě zdroje jak elektrické schéma, tak návrh rozmístění součástek na tištěném spoji tak, aby bylo možné snadno provádět měření. Podle této dokumentace jsou později nakoupeny a vyrobeny části nutné k sestrojení prototypu.

1.2.5 Prototyp

Výroba samotného prototypu probíhá s využitím základních metod. Například místo pájení součástek takzvanou vlnou se pájí manuálně. Podobné je to s díly například obráběnými. V podstatě není ekonomické programovat CNC frézu na výrobu jednotek kusů.

1.2.6 Testování

Interní testování má ověřit schopnost zařízení splnit certifikované zkoušky podle normy RTCA DO-160g. Samotné interní testování není průkazné pro splnění certifikace. Provádí se z finančních důvodů. Ověřovací zkoušky v certifikované laboratoři stojí v řádech sto tisíců až milionů. Nebylo by tak vhodné testovat produkt, který nemá šanci zkouškami projít.

1.3 Výzvy při konstrukci pro letecký průmysl

Při vývoji pro letecký průmysl existuje celá řada požadavků založených na principech bezpečnosti a zdravého rozumu. Z tohoto důvodu jsou často upřednostňovány starší, ale ověřené návrhy. Toto přináší velké množství výhod (Wang et al. 2022).

Jednou z hlavních je finanční. Zavedení nové výroby v korelaci s komplikovaností dílu roste přibližně s druhou mocninou, kde hlavním nákladem je často kvalifikace potřebná pro určitou opakovatelnost ve výrobě. Ideálně je vhodné tuto kvalifikaci poskytnout více různým zaměstnancům a snížit tak šanci zpomalení výroby například v případě nemoci. Toto ovšem znamená, že zaměstnanci několik měsíců a v určitých případech i roků, neprodukují zisk.

Dalšími náklady jsou nástroje pro výrobu, často specializované, neproprietární součásti, které se nakupují a ověřovací zkoušky, ty v plném rozsahu mohou snadno vyšplhat do milionů a trvat mnoho měsíců.

V případě nového produktu je často nutné vyrábět dvě verze, jednu pouze jako náhradní díl, alespoň po dobu deklarované životnosti letadel, kde je nainstalován příslušný díl od výroby. Toto dále zvyšuje náklady, zvláště pokud se používají jiné technologie.

Druhou hlavní výhodou je bezpečnost produktu. Po mnoha letech výroby je opakovatelnost vysoká. Některé díly jsou ověřené doslova miliony letových hodin, tím pádem již byla ověřena funkčnost v širokém spektru podmínek (Wang et al. 2022).

Nové designy jsou stále složitější. Pokroky ve výpočetním výkonu, výpočetní analýze a numerických metodách také významně proměnily a ovlivnily způsob, jakým je návrh prováděn. Tento přístup ovšem přináší překážku přenosu znalostí mezi výzkumem a průmyslem. Některé návrhy fungují velmi dobře v simulacích, ale v realitě jsou téměř nevyrobitelné a tím pádem nevhodné pro sériovou výrobu.

1.4 Norma RTCA DO-160G

Organizace RTCA neboli Radio Technical Commission for Aeronautics vytvořila normu, která poskytuje standardní postupy a environmentální testovací kritéria na testování palubního vybavení pro celé spektrum letadel od ultra-lightů přes vrtulníky až po komerční letadla přepravující stovky pasažérů.

Tato norma je vytvořena v koordinaci s EUROCAE, normy RTCA DO-160G a EUROCAE ED-14G mají identické znění. RTCA DO-160G je uznávána Mezinárodní organizací pro standardizaci (ISO) jako mezinárodní standard ISO-7137 (RTCA 1975).

Splněním normou předepsaných zkoušek se ověřuje to, že zařízení splňuje minimální výkonnostní charakteristiky i v nekontrolovaném prostředí při provozu zařízení ve vzduchu. Podmínky zkoušek prostředí a zkušební metody uvedené v normě jsou navrženy tak, aby simulovaly nejhorší možné (pravděpodobné) podmínky, při kterých bude zařízení provozováno.

Hodnoty zadané normou musí být vždy překonány z důvodu chyb měření a měření zároveň musí být opakovatelné. Každá instituce je zodpovědná za určení vlastních tolerancí tak, aby výsledná hodnota opravdu splňovala normu. Jak již bylo řečeno, jedná se pouze o minimální požadavky.

Norma obsahuje 26 sekcí a 3 přílohy. První 3 sekce obsahují motivaci pro testování, standardní postupy, prostředí a definice termínů. Sekce 4-26 obsahují samotný popis testů. (viz. Tabulka 1)

Sekce	Název
4	Teplota a nadmořská výška
5	Teplotní variace
6	Odolnost proti vlhkosti
7	Odolnost proti přetížení a nárazu
8	Vibrace
9	Odolnost proti výbuchu
10	Voděodolnost
11	Náchylnost na ostatní kapaliny
12	Odolnost proti prachu a písku
13	Odolnost proti plísňím
14	Solná komora
15	Náchylnost na magnetické pole
16	Nestabilita napájení
17	Odolnost proti napěťovým špičkám
18	Citlivost audio frekvenčního přenosu
19	Náchylnost na indukovaný signál
20	Citlivost na rádiové frekvence
21	Emise radiofrekvenční energie
22,23	Odolnost proti efektům blesku
24	Námraza
25	Odolnost vůči elektrostatickým výbojům
26	Odolnost proti ohni

Tabulka 1: Přehled sekcí normy RTCA DO-160g

Samozřejmě není nutné pro každý díl provádět všechny testy. Například pro zdroj proudu zabudovaný uvnitř letadla dělat testy námrazy, solnou komoru a další testy vhodné pro součásti letadla vystavené počasí nemá smysl, stejně jako pro klapku samotnou nemá smysl dělat citlivost na rádiové frekvence a další elektrické testy.

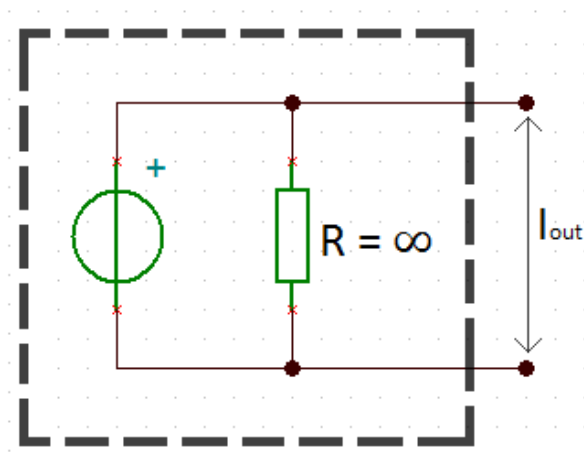
2. Teorie

2.1 Zdroj konstantního proudu

Zdroj konstantního proudu je zdroj, který dodává zátěži konstantní proud, a to i přes změny zátěže. Jinými slovy poskytuje stálou velikost proudu do napájeného obvodu bez ohledu na napětí zdroje na jeho svorkách. Zdroj konstantního proudu je tedy velmi cennou součástí mnoha obvodů, protože může dodávat stabilní proud, i když dochází ke změnám odporu, dokonce i k velkému kolísání, například změnou okolní teploty.

2.1.1 Ideální zdroj proudu

Ideální zdroj proudu je matematický model, kterému se skutečné zdroje dokážou pouze velmi blízko přiblížit. Pokud lze proud přes ideální zdroj specifikovat nezávisle na jakékoli jiné proměnné v obvodu, jedná se o nezávislý zdroj. Naopak, pokud je proud přes ideální zdroj proudu určen nějakým jiným napětím nebo proudem v obvodu, nazývá se závislý (Alexander Krejcirik 1999). Vnitřní odpor ideálního zdroje proudu je nekonečný. Po připojení ke zkratu je nulové napětí, a tedy nulový dodávaný výkon.



Obrázek 2: Ideální zdroj proudu

Při připojení k zatěžovacímu odporu zdroj proudu řídí napětí takovým způsobem, aby udržoval proud konstantní. Vzhledem k tomu, že má velmi vysoký vnitřní odpor a odpor zátěže je mnohem nižší, proud jde cestou nejmenšího odporu, tzn. teče ze zdroje proudu do zatěžového odporu, protože má mnohem nižší odpor (Kamil Vrba a Pavel Buchmaier 1999).

2.1.2 Reálný zdroj proudu

Žádný fyzický zdroj proudu ovšem není ideální. Když zdroj proudu dosáhne svého poddajného napětí, náhle přestane být zdrojem proudu. Také jeho vnitřní odpor není nekonečný i přes to, že se z pohledu zátěže nekonečnu blíží jím protéká proud a množství závisí na zatížení.

2.1.3 Pasivní zdroje proudu

Jako nejjednodušší zdroj proudu by se dal považovat zdroj napětí v sérii s rezistorem. Výsledný proud se určí snadno pomocí Ohmova zákona.

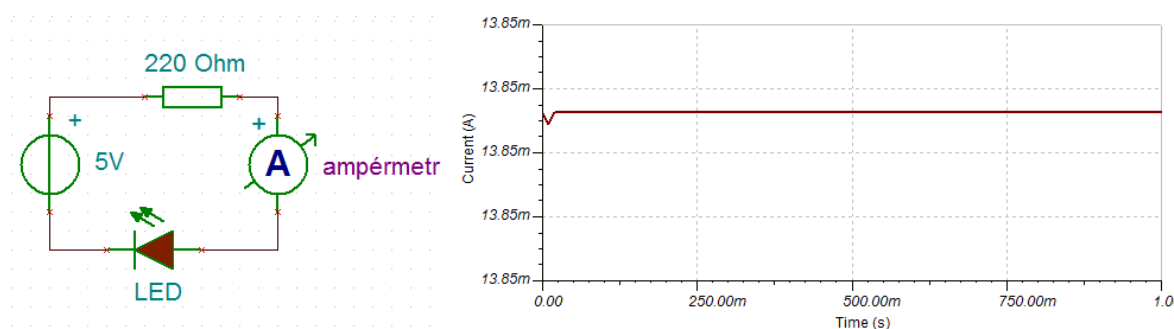
$$I_{out} = \frac{V_{in}}{R} \quad (1)$$

Tento typ zdroje dodává požadovaný proud pouze pro zátěž, která nemá vlastní napěťový úbytek a je velmi neefektivní. Účinnost je nízká kvůli ztrátě výkonu na rezistoru a je obvykle tedy nepraktické konstruovat zdroj proudu tímto způsobem. Tento způsob také zvyšuje nároky na chlazení, ztrátový výkon je převeden na teplo podle rovnice 2.

$$P_{Heat} = I^2 R \quad (2)$$

Existují i situace, kdy je takovýto zdroj vhodný, a to jsou aplikace, pro které stačí velmi malý výkon a zároveň je cena obvodu zásadní. Například k LED kontrolkám se při 5 V napájení často do série zapojuje 220 Ω rezistor, což omezí proud přes diodu po odečtení napěťového úbytku LED (cca 1,95 V) od napájecího napětí (5 V) vychází podle rovnice 1 hodnota necelých 14 mA.

Příklad simulace takového obvodu se nachází na obrázku 3. Vlevo je elektrické schéma, vpravo se nachází výstup ze simulace.



Obrázek 3: Simulace pasivního zdroje proudu pro LED

2.1.4 Aktivní zdroje proudu

Aktivní jsou zdroje, které používají aktivní součástky, jako jsou tranzistory. Tyto obvody se chovají jako dynamické odpory, jejichž hodnota závisí na stavu obvodu. Kompenzují tak změny na zátěži tak, aby obvodem tekla pořád stejný proud (Alexander Krejcirik 1999). Například pokud zátěž zvýší svůj odpor, tranzistor sníží svůj a celkový odpor obvodu tak zůstane zachován.

2.1.5 Bipolární tranzistor jako zdroj proudu

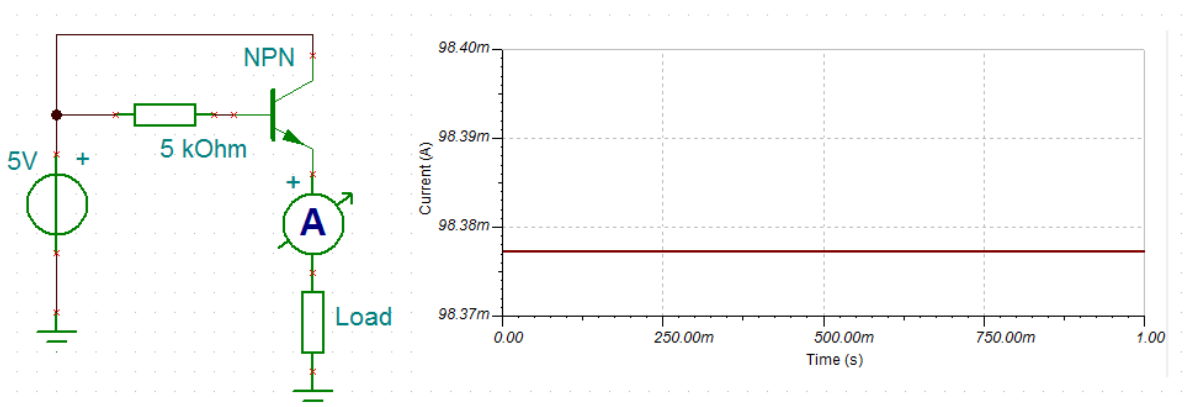
Bipolární tranzistor je typ tranzistoru, který využívá jak elektrony, tak i elektronové díry jako nosiče náboje. Oproti tomu unipolární tranzistor (FET) používá pouze jeden druh nosiče náboje. Bipolární tranzistor umožňuje, aby malý proud na bázi řídil mnohem větší proud tekoucí mezi kolektorem a emitorem, díky čemuž je zařízení schopné nejen spínat, ale i zesilovat. Poměr proudů na bázi a kolektor se značí konstantou β . A výsledný proud lze vypočítat s pomocí rovnice 3.

$$I_{out} = \beta I_{in} \quad (3)$$

Tyto využívají přechodů mezi dvěma typy polovodičů typu P a N. Spoje mohou být vytvořeny několika různými způsoby, jako je změna dopování polovodičového materiálu při jeho růstu, ukládáním kovových pelet za vzniku slitinových spojů, nebo je dopingovou difúzí látek typu N a P (Kamil Vrba, Pavel Buchmaier 1999).

Dle vnitřní struktury se rozdělují na tranzistory typu NPN a PNP. Principiálně jsou velmi podobné jen nosič náboje se liší. Pro NPN to jsou elektrony a pro PNP jsou to elektronové vakance, tzv. díry v substrátu. (Kamil Vrba, Pavel Buchmaier 1999)

Jednoduchým příkladem může být obvod s jedním tranzistorem a jedním odporem. V tomto případě je napájení 5 V a odpor 5 k Ω , a to znamená, že proud do báze je 1 mA. Samotný NPN tranzistor 2N2218A má zesílení $\beta = 102$, tím pádem byla podle rovnice 3 vypočítaná hodnota $I_{out} = 102$ mA, o trochu větší než nasimulovaná hodnota $I_{out} = 98,4$ mA (viz. Obrázek 4). To poukazuje na vlastnost těchto tranzistorů, a to vnitřní odpor, který není nikdy nula a vzniká tak napěťový úbytek a ztrátový výkon. (Alexander Krejcirik 1999)



Obrázek 4: Simulace zdroje založeného na bipolárním tranzistoru

2.1.6 Spínané zdroje

Spínané zdroje napájení obsahují spínací prvek, který je spínán na základě zpětné vazby. Výkonný prvek je proto zatěžován impulzně. Na rozdíl od lineárních zdrojů jsou mnohem lehčí, protože zpravidla pracují s vyšší frekvencí, díky čemuž lze použít menší transformátory. Oproti lineárním zdrojům je ale také větším zdrojem elektromagnetického rušení (Sam Sattel 2017).

Spínané napájecí zdroje jsou kompaktní, energeticky účinné, obvykle s účinností lepší než 85 %. Napětí na vstupu může nabývat hodnot v širokém rozmezí. Zároveň jsou také extrémně flexibilní z hlediska designu, což umožňuje návrhářům najít optimální řešení pro jakékoli požadavky na napájení, které jejich koncový produkt může mít (Lin 2018)

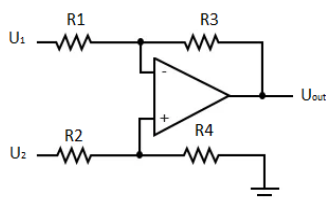
Existují různé typy spínaných zdrojů. Hlavní rozdělení je podle pole, do kterého se ukládá energie. Nejčastěji se jedná o pole magnetické vytvořené s pomocí cívky. Zároveň existují zdroje, které ukládají energii do pole elektrického s pomocí kondenzátorů (Sam Sattel 2017)

2.1.6.1 Operační zesilovače

Spínané zdroje jsou často řízeny zpětnou vazbou napětí, proto je nutné zařadit do obvodu takzvaný snímací odpor, jehož napětěový úbytek se řídí podle rovnice 1. Lze tak snadno zjistit napětěový úbytek přes tento odpor, opět se jedná o ztrátový výkon, ale hodnota tohoto odporu může být velmi malá. Pro nízké proudy je nutné řídicí signál zesílit. K tomu slouží diskretní součástka operační zesilovač.

Operační zesilovače mají mnoho možností zapojení. V kontextu spínaných zdrojů jsou důležitá dvě hlavní, a to diferenciální a neinvertující.

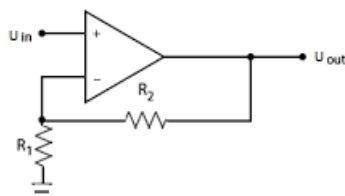
Diferenciální zesilovač zesiluje rozdíl napětí mezi dvěma body v obvodu.



$$U_{out} = \left(\frac{R_3}{R_1}\right) (V_2 - V_1) \quad (4)$$

Obrázek 5: Zapojení diferenciálního zesilovače

Neinvertující zesilovač zesiluje kladné napětí proti zemi, jeho nevýhodou může být horší stabilita, pokud je zem takzvaně plovoucí.



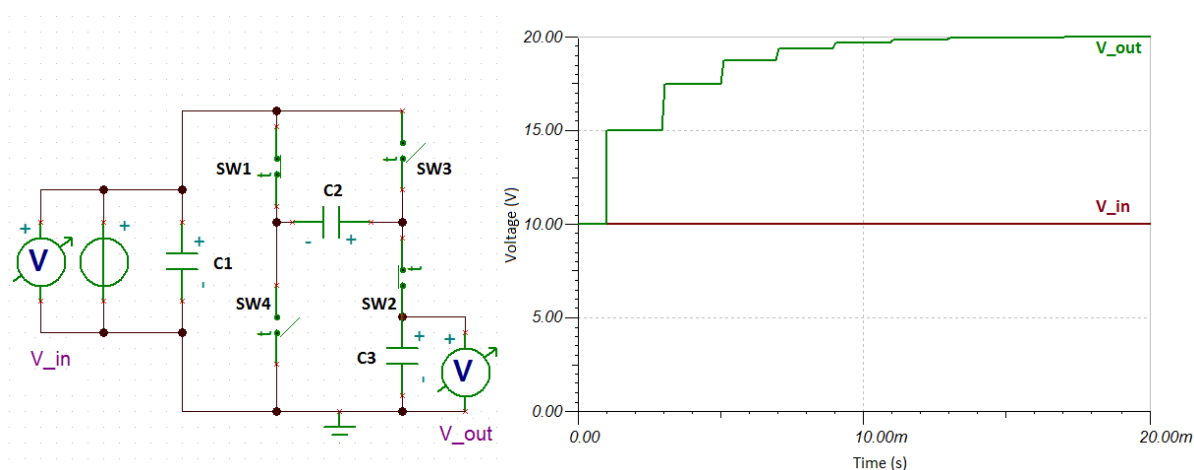
$$U_{out} = U_{in} \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (5)$$

Obrázek 6: Zapojení neinvertujícího zesilovače

2.1.7 Charge pump

Používá techniku zvanou spínání kondenzátorů ke zvýšení nebo snížení napětí. Tyto obvody jsou schopny vysoké účinnosti, někdy až 95 %, přičemž se jedná o relativně jednoduché obvody.

Jedním z příkladů je takzvaný násobič napětí, velmi jednoduchý obvod složený pouze ze tří kondenzátorů a čtyř spínačů. Vstupní kondenzátor C1 je vždy připojen paralelně ke zdroji, C2 je nabíjecí kondenzátor a C3 je výstupní kondenzátor. Spínače SW3 a SW4 se otevrou, v tuto chvíli jsou kondenzátory C1 a C2 zapojeny paralelně. Po uzavření spínačů (3,4) se otevrou spínače SW1 a SW2, tím se změní zapojení kondenzátorů C1 a C2 na sériové. Takto zapojené kondenzátory jsou paralelně s kondenzátorem C3, který se po několika cyklech nabije na dvojnásobek vstupního napětí, jak lze pozorovat na obrázku 7.



Obrázek 7: Simulace nabíjení kondenzátů pomocí charge pump

Tyto obvody se dají sériově stupňovat. Výstupní napětí se pak řídí podle rovnice 6, kde N je počet stupňů.

$$U_{out} = 2N U_{in}$$

(6)

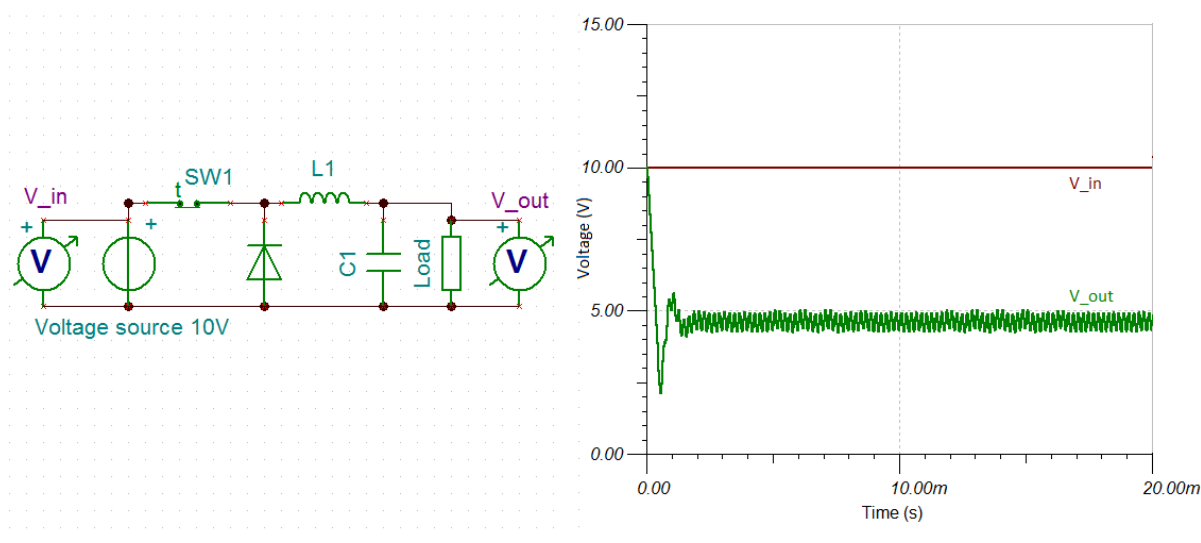
2.1.8 Buck converter

Jinak také step-down měnič je typ zdroje, který umožňuje snižovat napětí. Toho dosahuje s pomocí PWM signálu. Ten může být pevný, případně řízený zpětnou vazbou. Díky tomu lze dosáhnout u komplikovanějších návrhů velmi velké účinnosti, a to i přes 95 %.

PWM signál spíná nejčastěji MOSFET. Ten se používá, protože má velmi nízký interní odpor. Spínáním MOSFETu vzniká v podstatě zesílený PWM signál.

Když je spínač poprvé sepnutý, proud se začne zvyšovat a cívka generuje na svých svorkách opačné napětí v reakci na měnící se proud. V průběhu času se rychlost změny proudu snižuje a napětí na induktoru také klesá, čímž se zvyšuje napětí na zátěži. Během této doby induktor ukládá energii ve formě magnetického pole. Když je spínač znovu otevřen, zdroj napětí bude z obvodu odstraněn a proud se sníží. Klesající proud způsobí pokles napětí na cívce a ta se stane zdrojem proudu. Během vypnutého stavu cívka vybíjí svou uloženou energii do zbytku obvodu. Pokud se spínač znovu sepne před úplným vybitím induktoru, tak zátěž zůstane pod napětím.

Na obrázku 8 lze pozorovat simulaci jednoduchého obvodu pro snížení vstupního napětí, pracovní cyklus je 50 %, napětí by tedy mělo být poloviční. Přesto lze sledovat větší úbytek, samotný zdroj má vždy účinnost nižší než 100 %.



Obrázek 8: Simulace step-down měniče (vlevo schéma vpravo výsledek simulace)

2.2 Indukční zátěž

Cívka v AC obvodu se chová tak, že než propustí proud musí se nabít magnetické pole. To způsobí zpoždění proudu za napětím. Naopak při rozepnutí cívka převede energii magnetického pole na proud a poskytuje tak proud i přes klesající napětí. Při sinusovém průběhu přes ideální cívku předbíhá napětí proud o jednu čtvrtinu periody. V realitě ovšem není tento rozdíl na takové úrovni (viz. Graf 1) každý reálný obvod je typu RLC například kvůli parazitním kapacitám.

Napětí na ideální cívce:

$$U = \frac{d\Phi}{dt} \quad (7)$$

Vlastní indukčnost ideální cívky:

$$L = \frac{N\Phi}{I} \quad (8)$$

Induktance ideální cívky:

$$X_L = \omega L \quad (9)$$

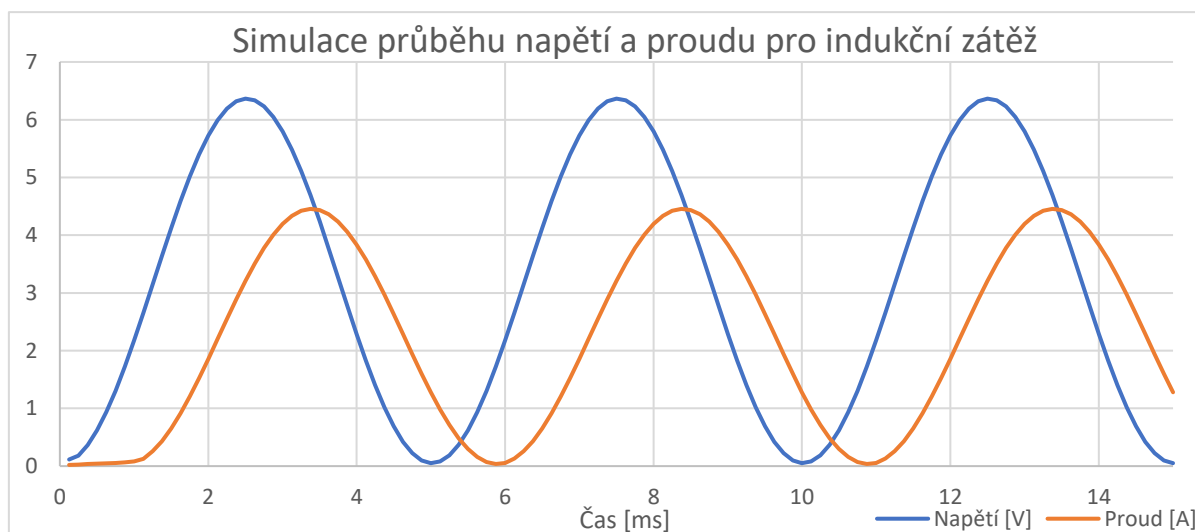
Energie v uložena v poli:

$$W = d\left(\frac{1}{2}LI^2\right) \quad (10)$$

Posun fáze proudu na cívce:

$$\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{X_L - X_C}{R} \right] \quad (11)$$

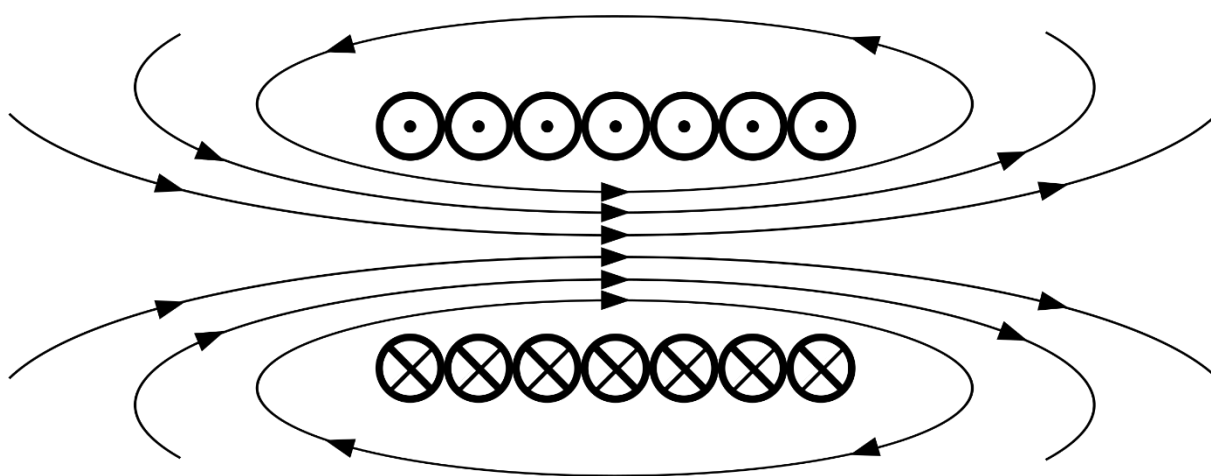
Na grafu 1 se nachází výstup simulace indukční zátěže. Lze pozorovat napětí předbíhající proud.



Graf 1: Simulace průběhu napětí a proudu pro indukční zátěž

2.2.1 Solenoid

Je specifickým druhem cívky, která má válcový tvar se stejně hustými závitů stejného kruhového tvaru po celé délce. Délka cívky musí být výrazně delší než její průměr, jinak se nejedná o solenoid. Výhodou tohoto uspořádání je rovnoměrné magnetické pole (viz. Obrázek 9) vytvořené s pomocí solenoidu, přes který teče elektrický proud.



Obrázek 9: Rovnoměrné magnetické pole solenoidu

Lze tak vytvářet magnety vhodné k řízení ventilů. Zvláště v případě dvupolohových ventilů je jejich využití jednoduché a lze snadno odhadnout magnetické pole a síly produkované při různých proudech. Pro prvotní návrh se užívá zjednodušení, kde solenoid není tvořen diskretními závity konečné šířky, ale mnoha nekonečně tenkými závity bez mezery mezi nimi (Meng et al. 2015)

V této abstrakci je solenoid často vnímán jako válcová deska vodivého materiálu. Magnetické pole uvnitř dlouhého solenoidu je homogenní, jeho síla téměř nezávisí ani na vzdálenosti od osy a ani na ploše průřezu solenoidu. Potom zjistit indukci pomocí rovnice 12:

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l}$$

B magnetická indukce (12)

μ_0 permeabilita vakua

N počet závitů

I proud přes solenoid

l délka solenoidu

Pro odvození hustoty magnetického toku kolem solenoidu, který je dostatečně dlouhý, mohou okrajové efekty být ignorovány a stačí tak indukci vynásobit plochou S. Pak platí:

$$\Phi = \mu_0 \frac{NIS}{d}$$

(13)

Dosazením magnetického toku do rovnice 8 získáme vlastní indukčnost ve tvaru:

$$L = \mu_0 \frac{N^2 S}{l}$$

(14)

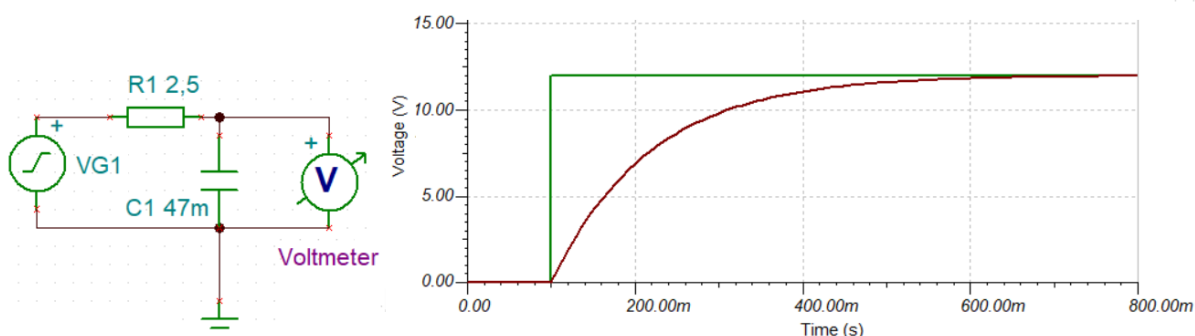
Výsledné hodnoty se používají pouze jako odrazový můstek, zanedbávají mnoho parametrů a jsou založeny na předpokladech, které pouze hrubě reprezentují realitu. Po prvotním návrhu se samozřejmě provedou simulace, které se blíží realitě daleko více.

2.3 Časovací obvody

Všechna zařízení s potřebou časování používají časovací obvody. Základní použití těchto obvodů je pro účely automatizace. Například pouliční osvětlení, kde se světla musí rozsvítit na určitou dobu, semaforey a například i zdroj s časově proměnným výstupem.

2.3.1 RC článek

Nejjednodušším časovacím obvodem je obyčejný RC článek. Jedná se vhodnou kombinací odporu a kondenzátoru. S rostoucím odporem se snižuje proud, který může nabíjet kondenzátor a snižuje tak čas do úplného nabití kondenzátoru. Samozřejmě s rostoucí kapacitou kondenzátoru roste také čas nabíjení.



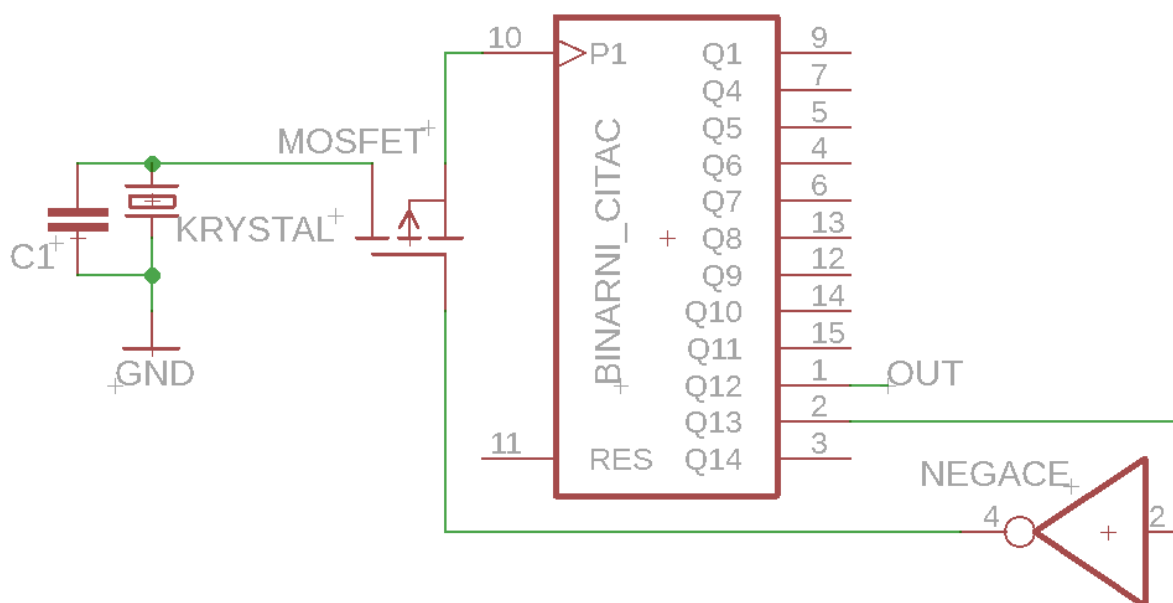
Obrázek 10: Simulace nabíjení RC článku

Z obrázku 10 je vidět, že při nastavení spínacího napětí na 10 V, by tento obvod zpožďoval o přibližně 200 ms.

Ovšem při změně napětí v síti by zůstalo spínací napětí stejné, ale čas, za který se RC článek nabije, by se změnil. Proto je tato metoda vhodná pouze pro stabilní napájecí síť, za kterou se palubní síť letadla nedá považovat.

2.3.2 Krystal a binární čítač

Kombinace krystalu a binárního čítače je velmi přesná, ale pouze pokud lze výslednou hodnotu získat dělením frekvence krystalu číslem 2^N , kde N je celé kladné číslo. V podstatě se jedná o podobný princip jako jsou předděličky u mikrokontrolerů. Jedná se o periodický jev, proto jsou v případě potřeby provést pouze jeden cyklus nutné další periferie. Zároveň logické obvody jsou náchylné na různá rušení a pro letecký průmysl vyžadují další testy a snižují spolehlivost celku.



Obrázek 11: Schéma zapojení časovacího obvodu založeného na oscilačním krystalu

Na obrázku 11 lze pozorovat zjednodušené schéma zapojení krystalu s binárním čítačem. Výstup je na pinu Q12, to znamená dělení frekvence číslem 2^{12} tedy 4096. Po dosáhnutí hodnoty 4097 je pin Q13 pod napětím. Tento signál po negaci rozeptne MOSFET a zabrání vstupu dalších pulzů.

2.3.3 Integrovaný obvod 555

LM555 je vysoce stabilní integrovaný obvod pro generování přesného časového zpoždění, případně oscilace. Je složen ze dvou komparátorů a jednoho klopného obvodu na výstupu. Komparační úrovně jsou odvozeny z napětového děliče složeného ze tří 5 kΩ rezistorů, proto získal název 555. V případě potřeby jej lze resetovat s pomocí určeného pinu.

V roce 2017 bylo řečeno, že podle některých odhadů se ročně vyrobí přes miliardu 555 časovačů a že tento návrh byl „pravděpodobně nejpopulárnějším integrovaným obvodem, jaký byl kdy vyroben“ (Lowe 2017)

2.3.3.1 Monostabilní 555

V režimu časového zpoždovače je čas přesně řízen jedním externím rezistorem a kondenzátorem. V podstatě se jedná o RC článek (viz. kapitola 2.3.1). Výhodou je to, že se jedná o diferenciální přístup. IC reaguje, když se článek nabije na 2/3 napájecího napětí. Výsledný čas se vypočítá podle rovnice 15. Díky tomu nezáleží na napájecím napětí jako u klasického RC článku.

$$t = 1,1 * RC \quad (15)$$

2.4 Simulační software

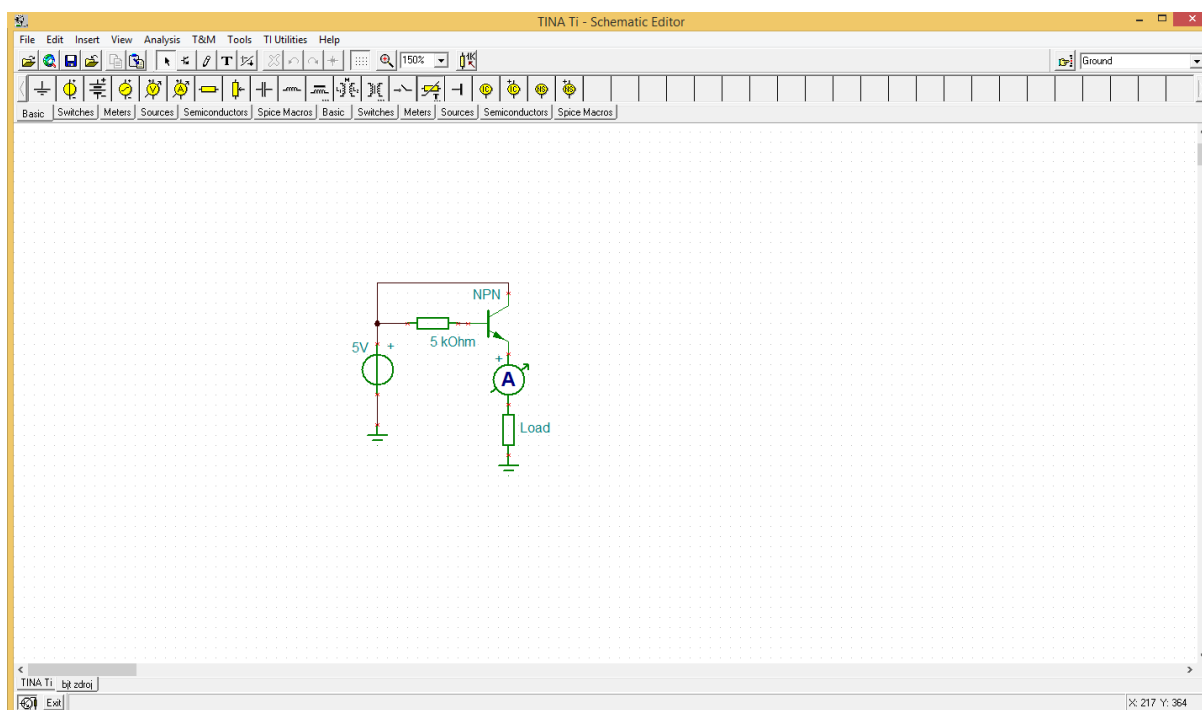
Software pro simulaci elektroniky využívá matematické modely k replikaci chování skutečného elektronického zařízení nebo obvodu. Simulační software umožňuje zobrazovat průběhy na obrazovce v řádu sekund, případně minut pro komplikovanější modely. To umožní snadné a okamžité prototypování. Simulaci chování obvodu před jeho skutečným vytvořením lze výrazně zlepšit účinnost a poskytuje pohled na chování a stabilitu návrhů. Většina simulátorů používá SPICE engine, který simuluje analogové, digitální a smíšené A/D obvody pro výjimečný výkon a přesnost. Obvykle také obsahují rozsáhlé knihovny modelů a zařízení.

2.4.1 TINA

Neboli Toolkit for Interactive Network Analysis je program vhodný pro simulace jak DC, tak AC obvodů. Také lze simulovat přechodové jevy. Díky tomu lze simulovat širokou škálu smíšených elektronických obvodů včetně spínaných zdrojů napájení, RF komunikace, MCU, logických a optoelektronických obvodů a mnoho dalších.

Verze TINA-Ti je freeware verze a je plně funkční, ale nepodporuje některé další funkce dostupné v plné verzi, jako výpočet pomocí mnoha jader a obsahuje pouze součástky od společnosti Texas Instruments, která zároveň spolupracuje na vývoji.

Další modely součástek lze v případě potřeby často stáhnout jako takzvané SPICE modely a naimportovat je do simulace. TINA dokáže pracovat s Berkely Spice a XSpice a předkompilovanými modely. Také lze vytvářet nové komponenty úpravou libovolného dílčího obvodu SPICE, ať už byl vytvořen uživatelem, stáhnut z internetu, nebo získán z části schématu jiného obvodu. TINA automaticky nastaví jako symbol pravoúhlý blok, ale lze vytvořit jakýkoli tvar pomocí TINA Schematic Symbol Editor (Chaudhari a Waghulade 2018).



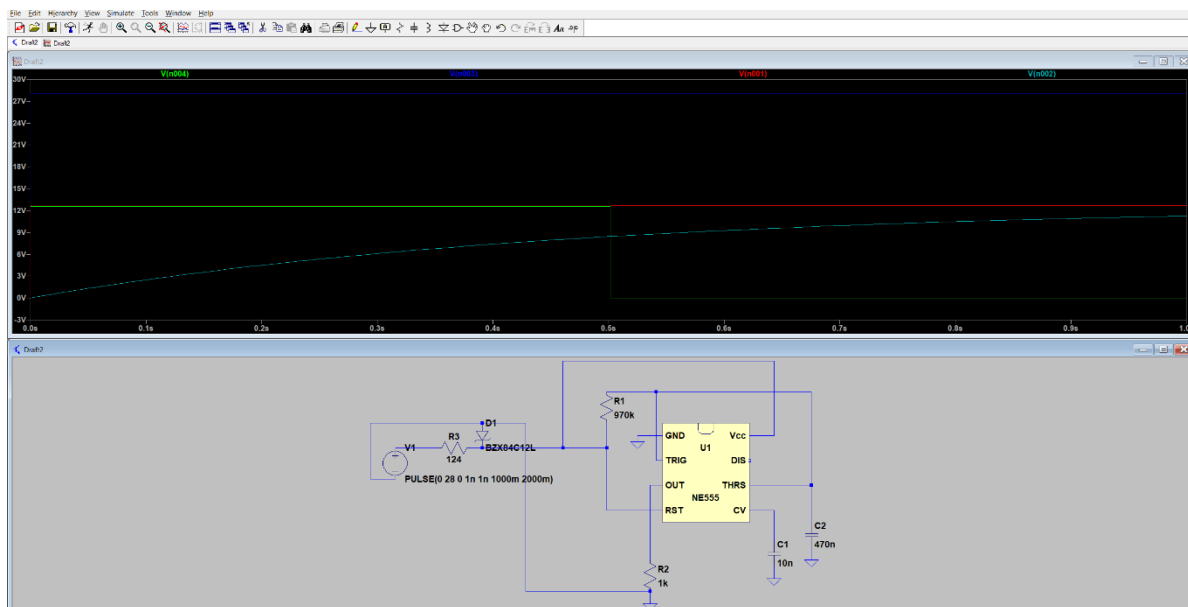
Obrázek 12: Prostředí programu TINA

2.4.2 LTspice

LTspice je program pro simulace analogových obvodů. Díky tomu, že je plná verze zdarma, jedná se o nejpoužívanější SPICE simulátor na světě. Také není omezený počtem součástek, uzlů a podobvodů. To umožňuje nasimulovat téměř jakýkoli dobře definovaný analogový obvod. Problémem může být spuštění na slabém hardwaru, důležitá je hlavně paměť RAM a výkon jednotlivých jader.

Používá se nejčastěji na simulace radiofrekvenční elektroniky, výkonové elektroniky, audio elektroniky, digitální elektroniky a dalších obvodů. V LTspice nelze navrhovat PCB, ale lze exportovat list součástek pro import do programů na routování plošných spojů (Analog Devices 2018).

Velkou výhodou je široké spektrum součástek, díky spolupráci s firmami jako Analog Devices, Maxim Integrated a Linear Technology. Stejně jako TINA má možnost importu součástek stažených z internetu a vytvářet vlastní modely, které lze uzamknout v případě potřeby ochránit intelektuální vlastnictví (Analog Devices 2018).



Obrázek 13: Prostředí programu LTspice

2.4.3 FEMM

Finite Element Method Magnetics dále jen FEMM je sada programů pro řešení nízkofrekvenčních elektromagnetických problémů ve 2D. Program dokáže řešit lineární i nelineární magnetostatické problémy, lineární i nelineární časové harmonické magnetické problémy, lineární elektrostatické problémy a problémy s tokem tepla v ustáleném stavu (David Meeker 2015).

Je složen ze tří hlavních částí:

1. Grafické rozhraní

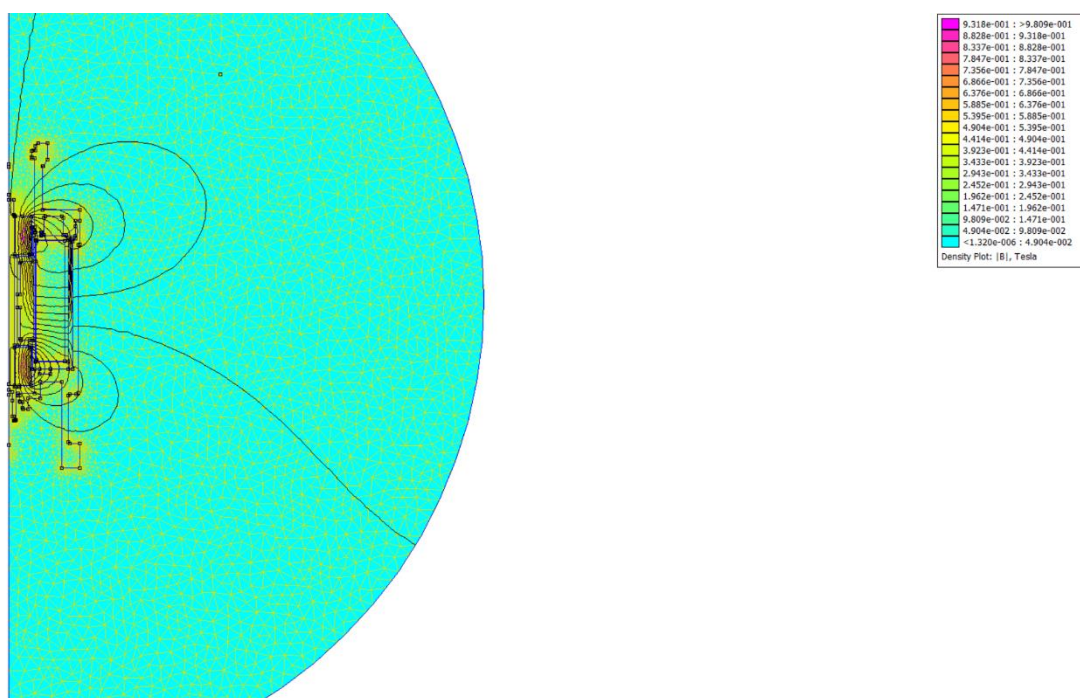
Tento program je pre a postprocesor pro různé typy problémů řešených metodou konečných prvků. Obsahuje rozhraní podobné CADu pro vytyčení geometrie řešeného problému, definování materiálových vlastností a okrajových podmínek. Řešení lze zobrazit ve formě grafu hustoty. Program také umožňuje uživateli sledovat intenzitu pole v libovolném bodě a vypočítat různé zajímavé veličiny jako sílu, nebo moment (David Meeker 2015).

2. Generátor sítě

Adaptivně rozdělí řešený problém do sítě trojúhelníků, podle složitosti geometrie v dané lokalitě a umožní tak výpočet metodou konečných prvků.

3. Řešitel

Řešitel zpracuje sadu datových souborů, které popisují daný problém a řeší příslušné parciální diferenciální rovnice, aby získal požadované hodnoty v celé doméně řešení.



Obrázek 14: Prostředí programu FEMM

2.4.3.1 LUA script

Lua je kompletní skriptovací jazyk s open-source kódem. Podrobnou dokumentaci o programování v Lua lze stejně jako Lua script samotný stáhnout z domovské stránky Lua (David Meeker 2015).

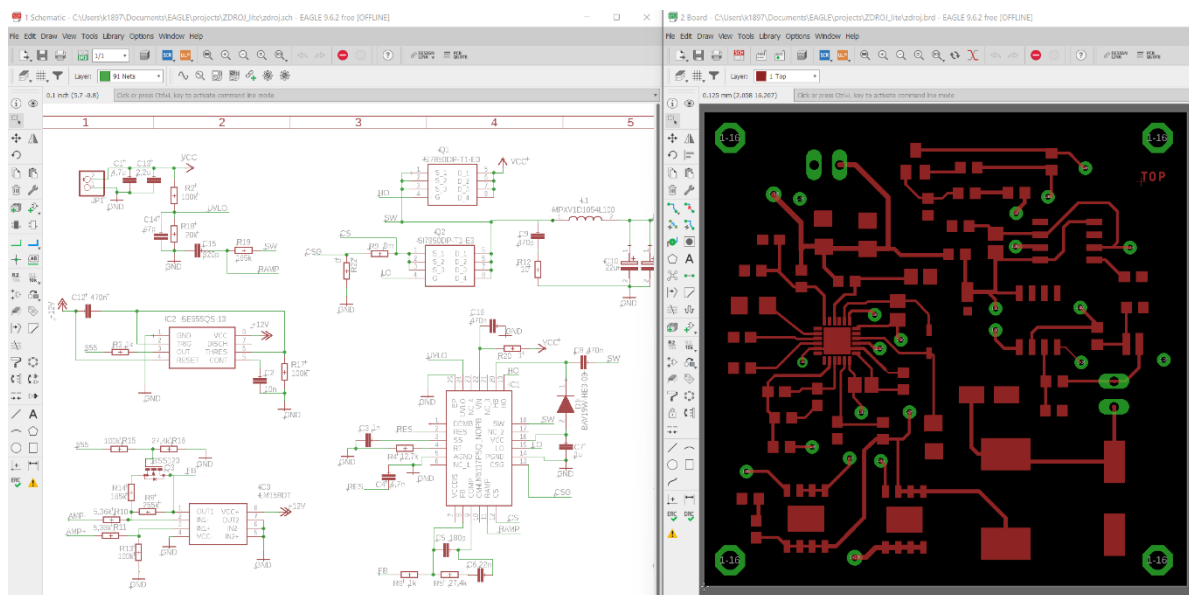
FEMM umožňuje využití Lua scriptu pro automatizaci výpočtů například v různých polohách, nebo při různých proudech přes solenoid. Spojení výsledků v určitém časovém kroku umožňuje vytvořit video s vizualizací hodnot, jako je například intenzita magnetického pole.

2.5 Návrhový software

Návrhový software umožňuje navrhovat a v některých případech i simulovat výsledný produkt na základě schématu elektrického zapojení. V tomto případě je nutná hlavně možnost takzvaně „routovat“ desky plošných spojů (anglicky Printed Circuit Boards neboli PCB). Pro tyto účely existuje mnoho možností, některé jako Altium jsou placené a poskytují nonstop podporu, jiné například KiCad jsou freeware a open source.

2.5.1 EAGLE

EAGLE znamená Easily Applicable Graphical Layout Editor, neboli snadno ovladatelný grafický editor rozložení. Obsahuje editor schémat pro návrh zapojení. Schémata jsou uložena v souborech s příponou .sch, jednotlivé díly jsou definovány v knihovnách s příponou .lbr. Editor rozložení na PCB ukládá soubory s příponou .brd. Umožňuje zpětnou anotaci do schématu a automatické routování na základě propojení definovaných ve schématu. Ve většině případů je ovšem preferováno manuální routování.

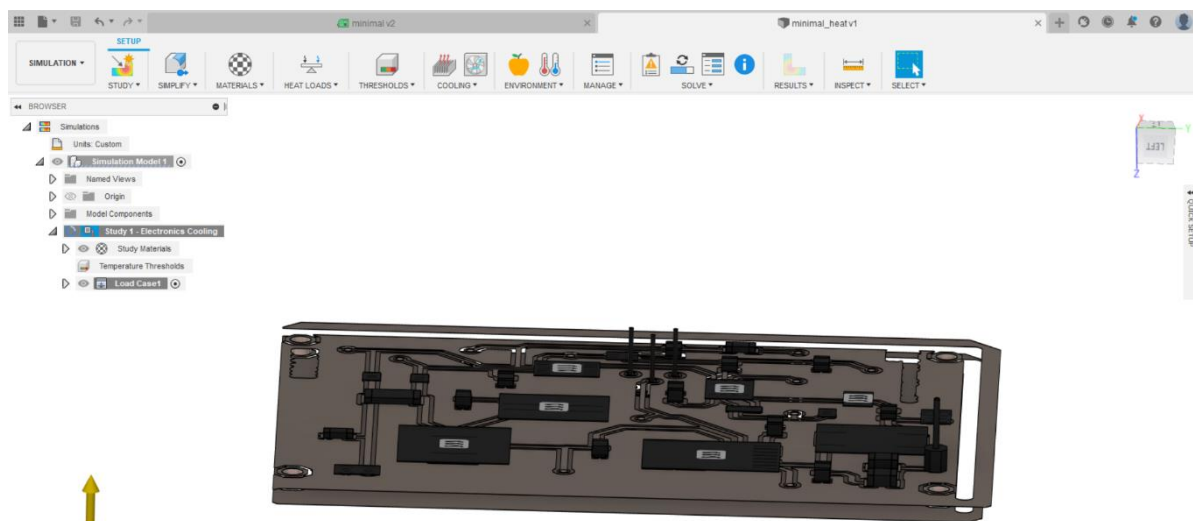


Obrázek 15: Prostředí programu EAGLE (vlevo editor schématu vpravo editor PCB)

Velkou výhodou je možnost předdefinovat pravidla a pokud ve výsledném produktu nejsou tato pravidla splněna EAGLE otevře okno, ve kterém lze identifikovat problémy a učinit nápravná opatření.

2.5.2 Fusion 360

V dnešní době již není možné koupit prémiovou verzi EAGLE samostatně. Mnoho jeho funkcí je ve Fusion již zabudováno, zároveň lze převádět modely PCB mezi těmito programy. Fusion sám o sobě je CAD systém s možností simulací, převod desky z EAGLE tak umožní vytvořit model začlenění PCB do finálního produktu. Funkce simulací umožní vytvořit model chlazení PCB.



Obrázek 16: Prostředí programu Fusion 360

2.5.3 KiCAD

KiCAD funguje podobně jako EAGLE. Jednoznačnou výhodou je plná funkčnost free verze. Usnadňuje návrh a simulaci elektronického hardwaru. Vyznačuje se integrovaným prostředím pro schematické zachycení a rozložení PCB, stejně jako EAGLE. Dále lze vytvářet a prohlížet výrobní soubory, plus lze udělat základní technické výpočty. Balíček obsahuje nástroje pro vytváření kusovníku, Gerber souborů a 3D modelů PCB a jejich součástí.

3. Návrh prototypu

3.1 Technické zadání

Technické zadání je soubor požadavků, které musí výsledný produkt splňovat. Zároveň popisuje funkci dílce v systému, jeho uchycení, v případě aktivních prvků komunikační protokol, povolené rozsahy, a specifikuje normy, podle kterých se bude výsledný prototyp testovat, stejně jako přibližný časový harmonogram a další. Nejčastěji jej zadává zákazník, přesně podle požadavků specifického stroje, například regulátor vrtule. Existují i zadání interní, na dílce, které lze využít ve více různých aplikacích, například požární ventil.

Technické zadání slovy:

Navrhnout a sestavit prototyp zdroje napájení pro dvoupolohový solenoid, tak aby bylo možné později integrovat zdroj přímo do výrobku s minimálními komplikacemi a provést sérii základních testů podle normy DO-160G. Tyto testy ověří, zda je vhodné s návrhem přejít do fáze funkčního vzorku pro testování v certifikované laboratoři.

Základní vlastnosti solenoidu:

Proud sepnutí	592 mA	při tlaku 300 kPa
Proud rozepnutí	226 mA	při tlaku 2 MPa
Indukčnost	31,22 mH	při frekvenci 10 kHz
Odpor vinutí	$8,5 \pm 1 \Omega$	při teplotě 20 °C

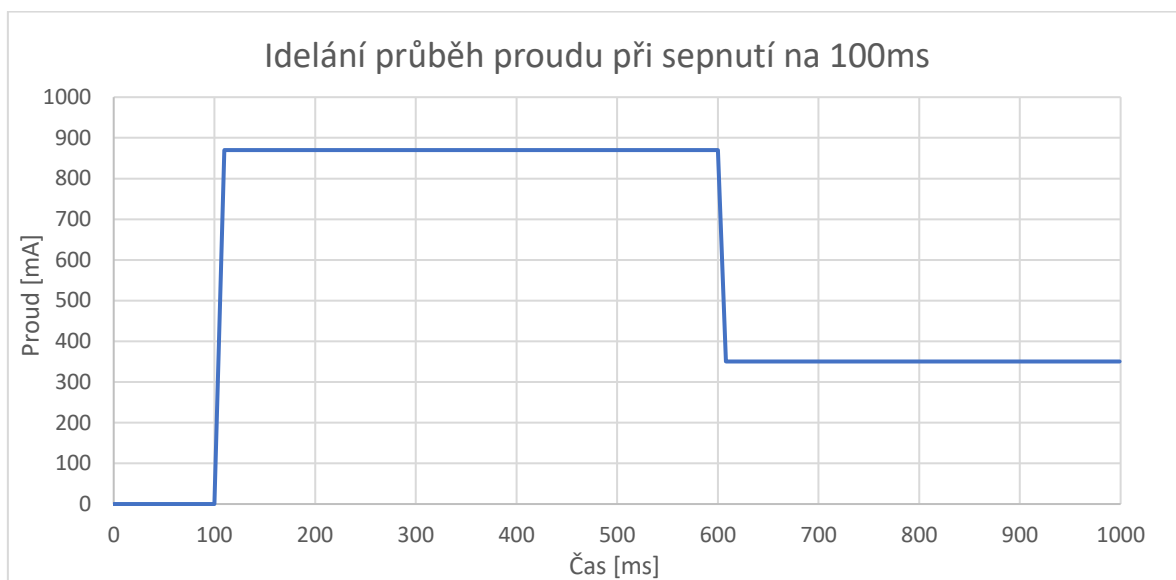
Tabulka 2: Naměřené hodnoty prototypu solenoidu

Požadavky na zdroj:

Proud spínací	870 ± 50 mA
Proud udržovací	350 ± 50 mA
Doba spínacího proudu	500 ± 100 ms
Teplotní rozsah	-45 až 125 °C
Maximální doba do sepnutí	30 ms

Tabulka 3: Výsledné požadavky určené s pomocí dat z tabulky 2

V následujícím grafu 2 je zobrazen ideální průběh proudu přes solenoid. Toho bohužel nelze dosáhnout, změna proudu je zároveň změnou napětí a způsobuje silný přechodový jev, protože se jedná o indukční zátěž. Vektor napětí pak předbíhá před vektorem proudu a při vypínání vzniká napětí, které může být několikanásobně vyšší a s opačnou polaritou viz. kapitola 2.3.



Graf 2: Simulace ideálního průběhu proudu v čase

Specifikace palubní sítě:

Stav zdroje	Napětí na terminálu [V]
Nominální	28
Maximální	32
Minimální	22
Nouzový provoz	18

Tabulka 4: Specifikace stavů palubní sítě podle normy RTCA DO-160g

Jedná se o bezpečnostní zařízení, z tohoto důvodu je ideální větší funkční rozsah napětí nežli zde specifikovaný.

Zdroj bude navrhován tak, aby fungoval do spodní hranice 12 V bez omezení. Při nižším napětí již nelze zaručit dostatečný spínací proud.

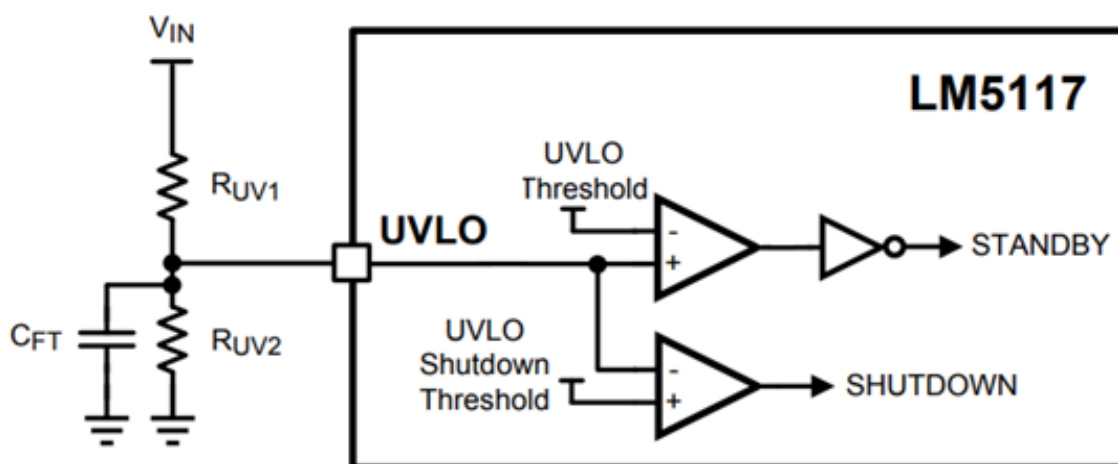
3.2 Zdroj založený na LM5117

LM5117 je step-down měnič určen pro regulaci napětí z vysokonapěťových zdrojů, případně napěťově nestabilních zdrojů. Použití řídicí rampy snižuje citlivost pulzní šířkové modulace na šum, což umožňuje spolehlivé řízení velmi malých pracovních cyklů nezbytných v aplikacích s vysokým vstupním napětím. (Incorporated 2018)

Frekvence spínání může být nastavena od 50 do 750 kHz. Jedinečná funkce analogového snímání poskytuje měnič informace o průměrném výstupním proudu. Mezi další funkce patří automatické vypínání při přehřátí, omezení proudu při zkratu a nastavitelný limit napětí v obvodu. (Incorporated 2018)

3.2.1 Undervoltage lockout

Takzvaný UVLO pin DC-DC měniče, umožňuje přepínání mezi různými operačními módy na základě napětí palubního zdroje. Pokud je na pinu napětí menší než 0.4 V regulátor se vypne. V případě, že je napětí mezi 0,4 V až 1.25 V regulátor se přepne do stand-by režimu a čeká, zda napětí překročí hranici $U_{uvlo} = 1,25$ V. (viz. Obrázek 17) Při překročení této hranice je aktivován standartní režim, kdy zabudovaný budič začne řídit MOSFETový můstek na základě zpětné vazby.



Obrázek 17: Nastavení minimálního napětí pro provoz LM5117

Jedná se o jednoduchý napěťový dělič. Je nutné použít vysoké hodnoty odporů R_{UV1} a R_{UV2} tak, aby byl protékající proud minimální. Hodnota palubního napětí by neměla klesnout pod 18 V (viz. Tabulka 4).

Přesto je možné napájet solenoid i pokud klesne pod normálně přípustnou hodnotu. Zvolená hodnota pro přepnutí do stand-by režimu je $U_{min} = 7,5$ V. V případě návrhu bezpečnostního zařízení není na škodu překonat stanovené limity. Kondenzátor C_{FT} redukuje rušení na pinu způsobené spínáním, produktový list doporučuje rozmezí 10-200 pF.

Zvolené hodnoty:

$$C_{FT} = 47 \text{ pF}$$

$$R_{UV1} = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_{UV2} = \frac{U_{uvlo} * R_1}{U_{min} - U_{uvlo}} = \frac{1,25 * 100000}{7,5 - 1,25} = 20 \text{ k}\Omega \quad (16)$$

Napětí na pin nesmí překročit hodnotu 15 V. Ovšem v tomto případě by napětí v palubní síti muselo překročit 90 V. Toto není za standardních podmínek možné a zároveň limit měniče samotného je pouze 65 V.

3.2.2 Nastavení frekvence

Nastavení frekvence pro LM5117 probíhá pomocí jediného externího odporu. Ten by měl být zapojen co nejblíže k měniči, jelikož je skrze něj vybíjen interní RC článek měniče.

Vyšší frekvence snižuje závislost na stabilitě palubního napětí a nároky na filtraci výstupního napětí, ale zároveň snižuje maximální procento pracovního cyklu. To je způsobeno minimální dobou, po kterou nelze MOSFET po vypnutí znovu sepnout, typicky 72 ns podle produktového listu.

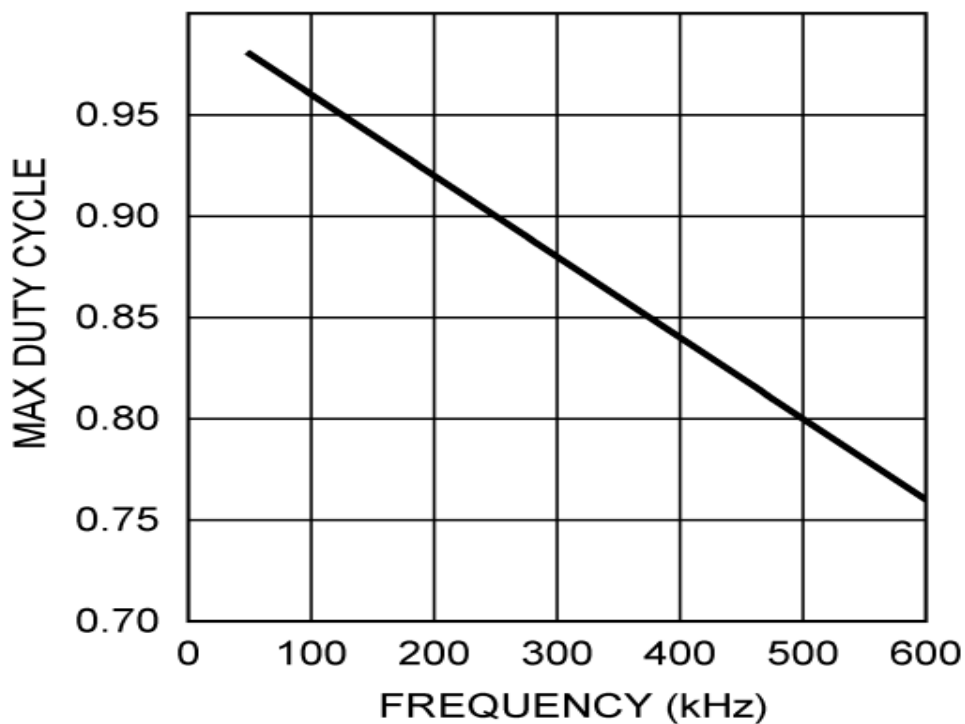
Byla zvolena hodnota $f_{sw} = 400$ kHz, pak je R_T podle vzorce 17:

$$R_T = \frac{5,2 * 10^9}{f_{sw}} - 948 = 13 \text{ k}\Omega \quad (17)$$

Nejbližší standardní hodnotou je 12,7 k Ω , pro tuto hodnotu je frekvence vypočítána úpravou vzorce 17:

$$f_{sw} = \frac{5,2 \cdot 10^9}{R_T} - 948 = 409,45 \text{ kHz}$$

Z grafu 3 lze vyčíst, že při tomto nastavení bude maximální střída neboli pracovní cyklus přibližně 84 %.



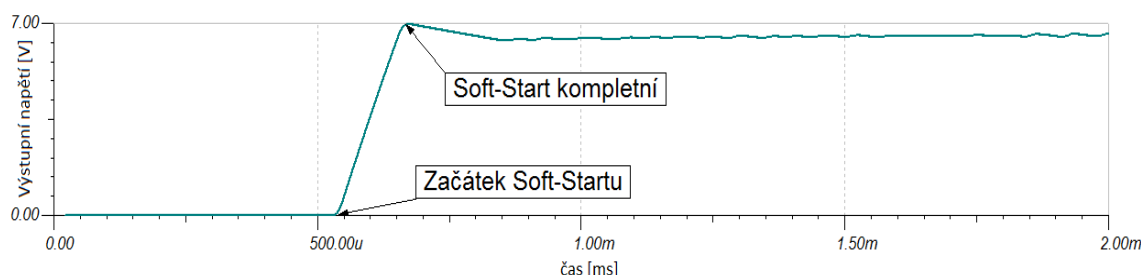
Graf 3: Závislost maximálního pracovního cyklu na frekvenci

3.2.3 Soft-Start

Na schématu označený jako pin SS umožňuje měniči postupně dosáhnout provozního stavu, a tak redukuje zátěž měniče tím, že reguluje pin FB na napětí pinu SS nebo interní $U_{ref} = 0,8 \text{ V}$ reference podle toho, která je nižší. Interní zdroj proudu $I_{ss} = 10 \mu\text{A}$ postupně zvyšuje napětí na externí kondenzátor $C_{ss} = 1 \text{ nF}$ připojený na SS pin. To má za následek postupný nárůst výstupního napětí. Zpoždění se určí podle vzorce 18:

$$t_{ss} = \frac{C_{ss} * U_{ref}}{I_{ss}} = 0,08 \text{ ms} \quad (18)$$

Hodnota získaná s pomocí rovnice, okolo jedné desetiny milisekundy, se zdá být optimální kombinací rychlého startu a limitace přechodových jevů.



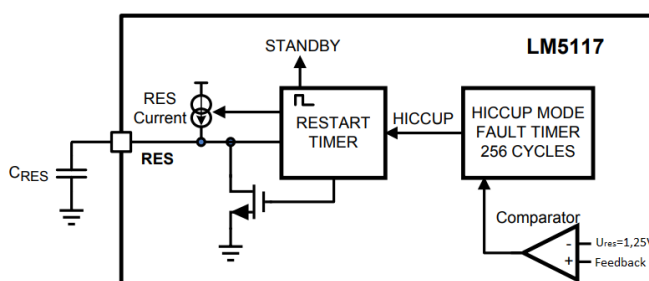
Graf 4: Simulace funkce soft-start

Ze simulace (Graf 4) je vidět, že Soft-Start má také překmit, ale je řádově nižší než překmit měničů bez této funkce.

3.2.4 Ochrana před zkratem - Hiccup Mode

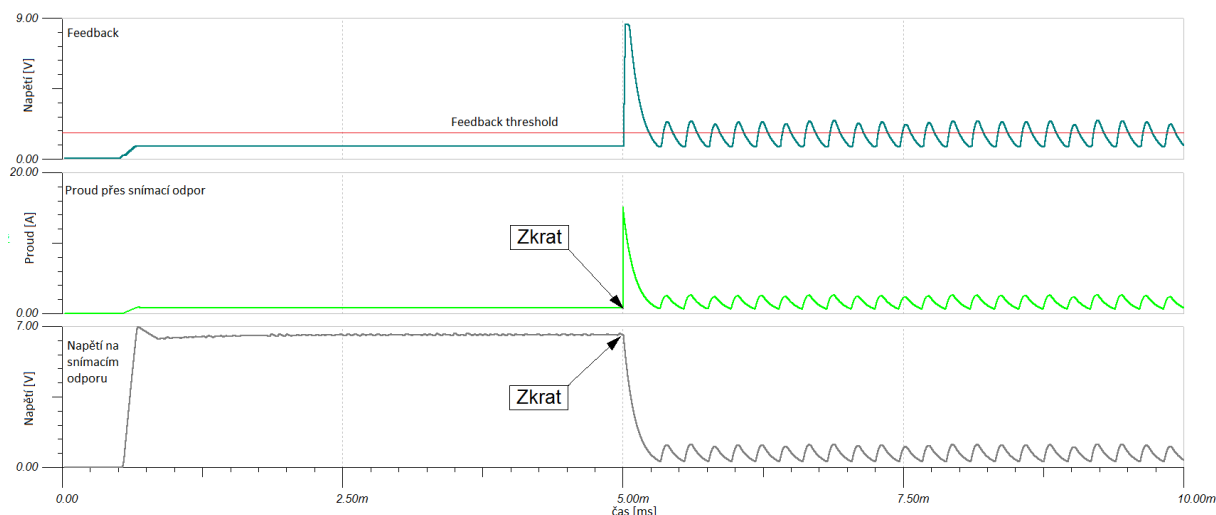
Hiccup Mode funguje jako ochrana před zkratem tak, že při detekci poklesu hodnoty napětí přes zátěž vzroste napěťový úbytek na snímacím odporu R_s a tím tedy hodnota i zpětné vazby. Pokud bude tato hodnota přes limit $U_{res} = 1.25$ V po celkem 256 cyklů spínání, měnič spustí hiccup mode. Kondenzátorem se nastavuje doba, po kterou je obvod ve stand-by režimu. (viz. Obrázek 18) Díky setrvačnosti a přechodným jevům se ventil několik milisekund udrží uzavřen i bez napájení. Proto je maximální rychlost prioritou, a tak byl zvolen kondenzátor o hodnotě $C_{res} = 4,7$ nF, který je nabíjen interním zdrojem proudem $I_{res} = 10$ μ A, pak lze určit čas pomocí vzorce 19:

$$t_{res} = \frac{C_{res} * U_{res}}{I_{res}} = 0,5875 \text{ ms} \quad (19)$$



Obrázek 18: Schematické znázornění funkce HICCUP

V následující simulaci (viz. Graf 5) lze pozorovat chování obvodu při zkratu přes kostru ventilu s odhadnutým odporem $R = 0,3 \Omega$ v čase $t = 5 \text{ ms}$. V grafu časového průběhu zpětné vazby (feedback) je vyznačen threshold. Při jeho překročení se aktivuje hiccup mode, ve kterém měnič periodicky zkouší, zda byl zkrat vyřešen. V případě že ano, zdroj se znovu spustí pomocí soft-startu.



Graf 5: Výstup ze simulace zkratu LM5117

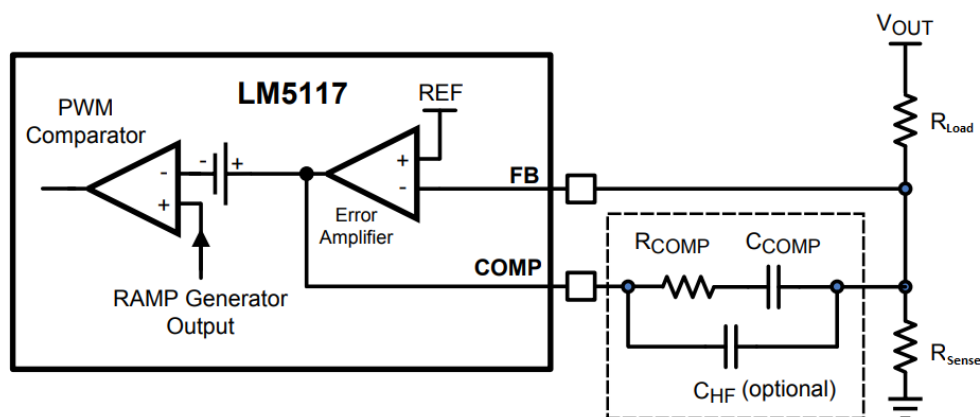
3.2.5 Teplotní ochrana

LM5117 disponuje zabudovanou tepelnou pojistkou, která typicky při 160°C přepne měnič do stand-by stavu, a ten přestane ovládat tranzistorový můstek do doby, než se teplota dostane do operačního rozmezí, tedy pod 125°C .

3.2.6 Zpětná vazba

V tomto zapojení je měnič řízen pomocí zpětné vazby. Reguluje tak, aby na pinu FB bylo napětí co nejbližší hodnotě $U_{\text{FB}(\text{threshold})} = 0,8 \text{ V}$ podle produktového listu. Způsob regulace lze upravovat s pomocí R_{COMP} , C_{COMP} a C_{HF} . Těmito komponenty se nastavuje rychlost reakce zpětné vazby, proto je nutné určit hodnoty tak, aby se našel kompromis mezi reakční dobou a stabilitou proudu.

Na obrázku 19 je doporučené zapojení podle produktového listu výrobce. Jedná se ovšem o zapojení pro zdroj napětí.



Obrázek 19: Standardní zapojení zpětné vazby

Produktový list doporučuje pouze hodnotu R_{COMP} mezi $2\text{ k}\Omega$ a $20\text{ k}\Omega$. Simulacemi v programu TINA byly určeny vhodné hodnoty kondenzátorů $C_{COMP} = 22\text{ nF}$ a $C_{HF} = 180\text{ pF}$.

Pro vytvoření zdroje proudu se klasicky mezi zátěž a zem umístí teplotně stabilní odpor R_{Sense} , přes který se změří napětí zpětné vazby. Nevýhodou této metody je v případě relativně nenáročné zátěže, jako v tomto případě, že jsou procentuální ztráty na odporu nezanedbatelné. To také může způsobit selhání v testu vysoké teploty. (Incorporated 2018)

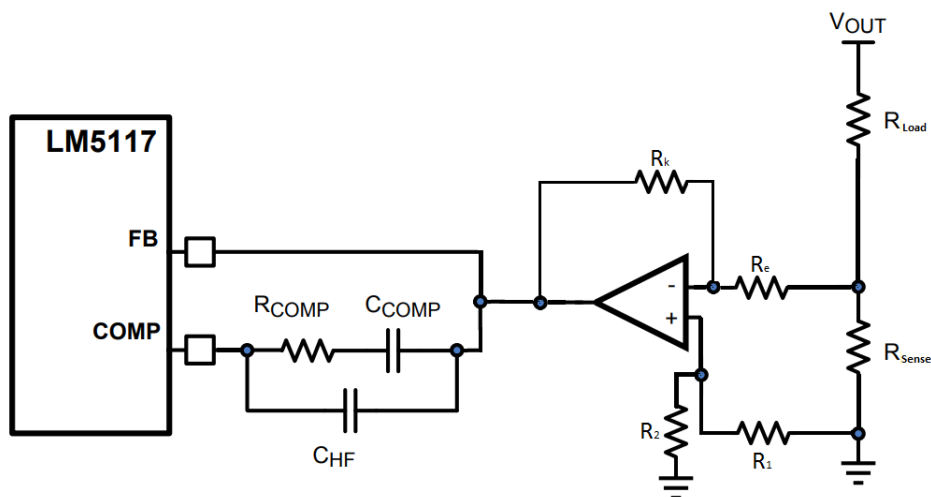
Odpor, který při $I_{out} = 0,3\text{ A}$ bude mít rozdíl potenciálů roven $U_{FB(treshold)} = 0,8\text{ V}$ vyjde podle rovnice 1 hodnota $R_{Sense} = 2,67\text{ }\Omega$. Ztrátový výkon je podle rovnice 2:

$$P_{HEAT(2,67\Omega)} = 0,2403\text{ W}$$

Přibližně jedna čtvrtina wattu je velká ztráta, vezmeme-li v potaz to, že solenoid sám o sobě potřebuje méně než jeden watt při pokojové teplotě. Z toho důvodu byl zvolen co nejmenší odpor a napětí přes $R_{Sense} = 50\text{ m}\Omega$ bylo zesíleno pomocí diferenciálního operačního zesilovače Lm158. Výsledný ztrátový výkon je tak o 2 řády nižší. Podle rovnice 2:

$$P_{HEAT(50m\Omega)} = 0,0045\text{ W}$$

Výsledné zapojení je schematicky zobrazeno na obrázku 20. Hodnoty pro nastavení reakce zpětné vazby byly zachovány.



Obrázek 20: Zapojení LM5117 jako zdroje proudu

Podle vzorce 1 bylo určeno, že hodnota napětí na R_{sense} při daném proudu je:

$$I(350mA) = 17,5 mV$$

$$I(870mA) = 43,5 mV$$

Tento signál je nutné zesílit na hodnotu 0,8 V. Podělením těchto hodnot bylo vypočítáno potřebné zesílení:

$$G(350mA) = 45,71$$

$$G(870mA) = 18,39$$

Přepínání výstupního proudu je řešeno pomocí změny zesílení, hodnoty odporů byly určeny podle vzorce 4. Výsledné schéma elektrického zapojení a návrh PCB jsou přílohy 1,2.

3.2.7 Nastavení časování

Časování bylo řešeno pomocí 555 integrovaného obvodu v monostabilním režimu viz. kapitola 2.4.2.1. Obvod prvních 500 ms udržuje svůj output pin na napájecím napětí, lze tak udržet sepnutý MOSFET. Po uplynutí 500 ms se pin odpojí klesne na 0 V a MOSFET se rozezne.

Podle rovnice 15 byly určeny vhodné hodnoty odporu a kapacity.

$$R = 970 \text{ k}\Omega$$

$$C = 470 \text{ nF}$$

3.3 Nedostatek elektronických komponent

Již před pandemií se firmy v oboru vývoje mikro elektroniky potýkaly s postupnými vlnami nedostatku dílů, zvyšováním cen a prodlužujícími se dodacími lhůtami. Velký nárůst poptávky na jedné straně a kritický nedostatek materiálů způsoboval, že bylo těžké uspokojit poptávku. Hlavně po standardnějších pasivních součástkách, jako jsou paměti, vícevrstvé keramické kondenzátory (MLCC), tranzistory, diody a dokonce rezistory (Matric Group 2022).

V průběhu pandemie se zastavila výroba a tento problém byl zesílen. Hlavním problémem je automotive průmysl, kde byla očekávána snížená poptávka. Bylo tak zrušeno mnoho objednávek například na step-down měniče, které byly později naprosto vykoupeny. Například LM5117 je nedostupný až do druhé poloviny roku 2023.

Po prvotních zkouškách zbyl jen jeden prototyp a nebylo možné koupit další součástky. Bylo tak nutné zvolit jiný základ prototypu.

3.4 Zdroj založený na LM2598

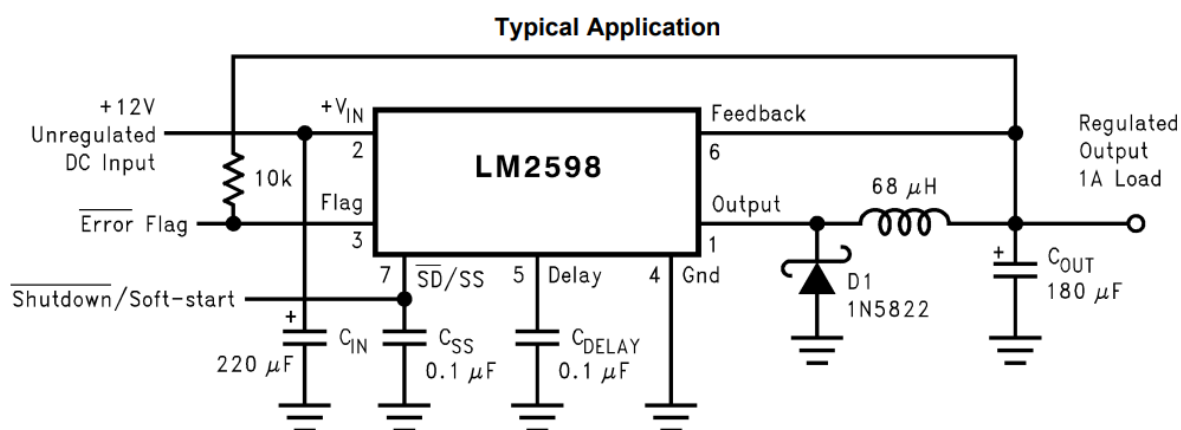
Je integrovaný obvod, který poskytuje aktivní část step-down regulátoru, schopný řídit zátěž až 1 A. Tyto IC jsou k dispozici ve verzi s pevným výstupním napětím 5 V, 12 V, ale i nastavitelným výstupem. K dispozici ve standardním balení TO-220 (Incorporated 2016).

Jedná se o step-down měnič starší konstrukce. Jasnou výhodou je dostupnost, zároveň je méně komplikovaný než LM5117 a má méně externích komponent. Ovšem rozměrově a efektivitou se nemůže rovnat a bylo by tak nutné větší, hlavně širší, pouzdro na PCB.

Zkoušky, u kterých existuje šance na poškození prototypu budou provedeny s tímto měničem. V případě poškození jej lze snadno nahradit. To umožní pokrok na této práci.

3.4.1 Periferie LM2598

Tyto regulátory vyžadují minimální počet externích komponent (viz. Obrázek 21), snadno se používají a zahrnují vnitřní frekvenční kompenzaci, oscilátor s pevnou frekvencí a měkký start. Řada LM2598 pracuje na spínací frekvenci 150 kHz, což umožňuje menší komponenty filtru, než jaké by bylo potřeba u spínacích regulátorů s nižší frekvencí.



Obrázek 21: Typické zapojení měniče LM2598

Samotný návrh je usnadněn tím, že existuje standardní série induktorů v několika různých provedeních výrobci optimalizovaných pro použití s LM2598 (Incorporated 2016). Bohužel velká část byla v průběhu roku 2022 nedostupná.

Zpoždovací a zesilovací obvody zůstávají téměř stejné, pouze s úpravou operačního zesilovače na neinvertující. V tomto případě se měnič snaží regulovat tak, aby FB pin dosahoval napětí 1,2 V. Je tak nutné přepočítat zesílení. Výsledné schéma elektrického zapojení a návrh PCB jsou přílohami 3,4.

Snímací odpor je v tomto případě $R_{\text{sense}} = 70 \text{ m}\Omega$ podle rovnice 1 je napětí přes tento odpor při daném proudu:

$$I(350\text{mA}) = 24,5 \text{ mV}$$

$$I(870\text{mA}) = 60,9 \text{ mV}$$

A potřebná zesílení:

$$G(350\text{mA}) = 48,98$$

$$G(870\text{mA}) = 19,70$$

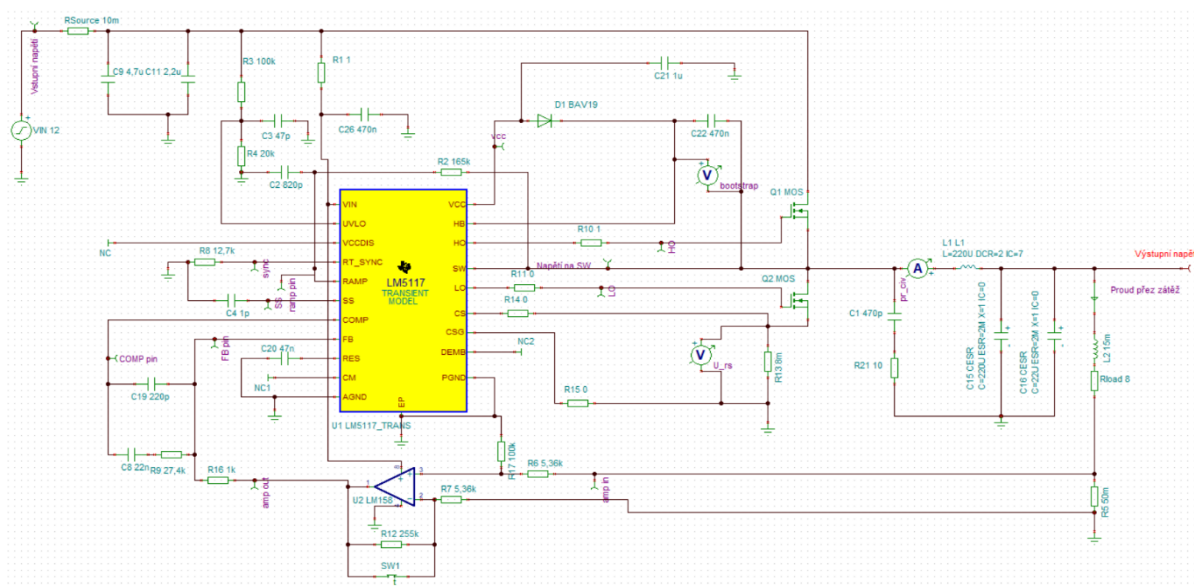
4. Zkoušky a výsledky

4.1 Simulace obvodů

Před výrobou PCB byly obvody prototypů nasimulovány v programu TINA viz. kapitola 2.5.1. To se ukázalo jako velká výhoda při určování hodnot filtrů a ověření základních předpokladů. Zároveň bylo možné určit hodnoty ztrátového výkonu na součástkách pro simulaci chlazení PCB.

4.1.1 Simulace LM5117

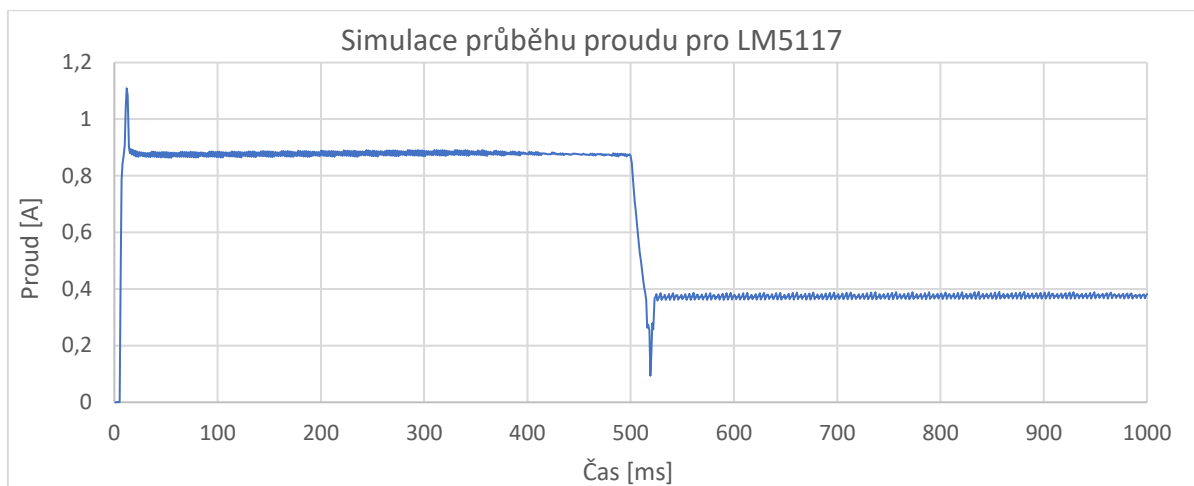
Pro tento měnič byla simulace velmi přínosná, nebyl sledován pouze výstupní proud, ale i chování ostatních pinů, například spínání externích MOSFETů, zpětná vazba před i po zesílení a tak dále.



Obrázek 22: Schéma elektrického zapojení pro simulaci LM5117

Simulace pro tento měnič byla provedena s časovým krokem 200 ns. Pro výsledný graf 6 byl vynesena pouze každý stý bod pro zvýšení přehlednosti. Na tomto grafu lze pozorovat funkci soft start. Zpoždění je jen malé, přesto výrazně limituje přechodový jev při zapnutí.

Stabilita proudu je lepší při vyšším proudu. To značí, že návrh by měl být ještě upraven tak, aby byl maximálně stabilní při nižším proudu, kde bude operovat většinu času.

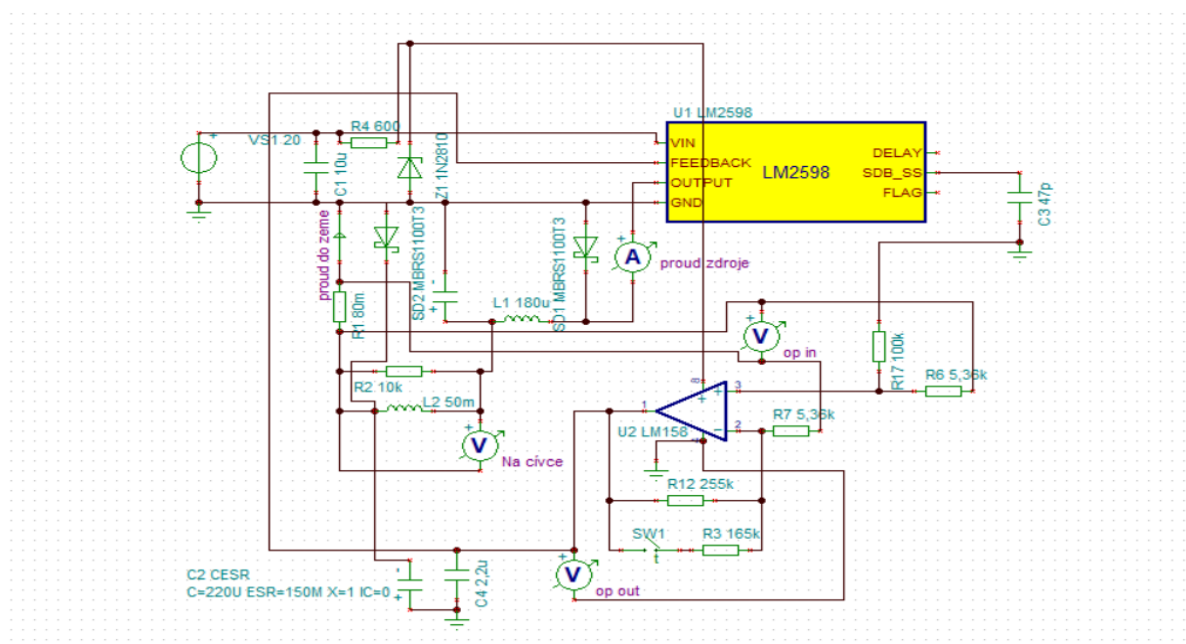


Graf 6: Simulace průběhu proudu pro LM5117 při zapojení podle obrázku 22

Čas dosáhnutí spínacího napětí je značně pod přípustnou hranicí. Časovací obvod zde nebyl simulován, v modelu byl nahrazen časovým spínačem, který je přesnější, nežli reálný časovač založený na obvodu 555.

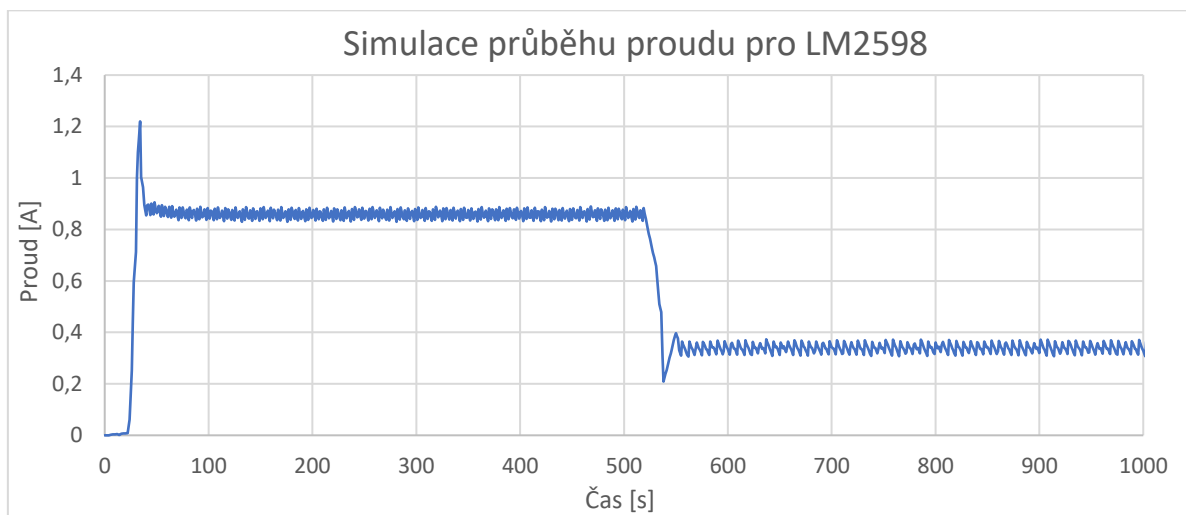
4.1.2 Simulace LM2598

Simulace LM2598 probíhala o mnoho rychleji, jak návrh, tak simulace samotná. Jedná se o jednodušší obvod o menší spínací frekvenci s integrovanými MOSFETy (Incorporated 2016).



Obrázek 23: Schéma elektrického zapojení měniče LM2598

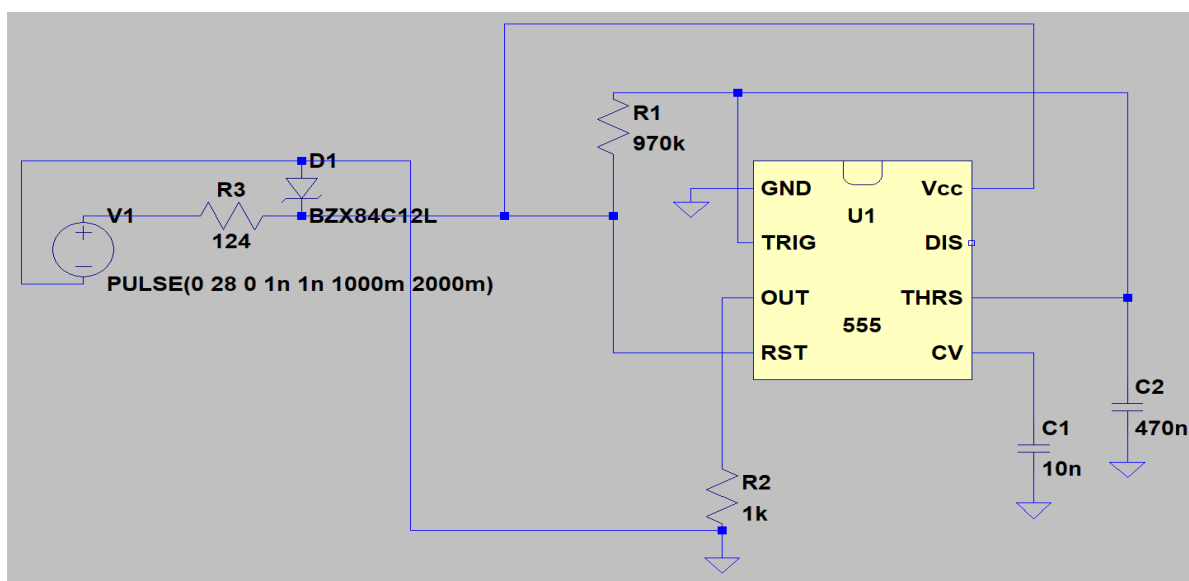
Z grafu 7 lze určit, že doba sepnutí je výrazně delší a stabilita je menší než u LM5117. Ovšem simulace splňuje požadované parametry. Prototyp bude samozřejmě dále laděn během základních zkoušek. Výhodou pomalejších reakcí měniče je zeslabení přechodových jevů, ovšem nižší frekvence spínání způsobuje pilové zvlnění proudu.



Graf 7: Výsledek simulace obvodu s měničem LM2598, při zapojení podle obrázku 23

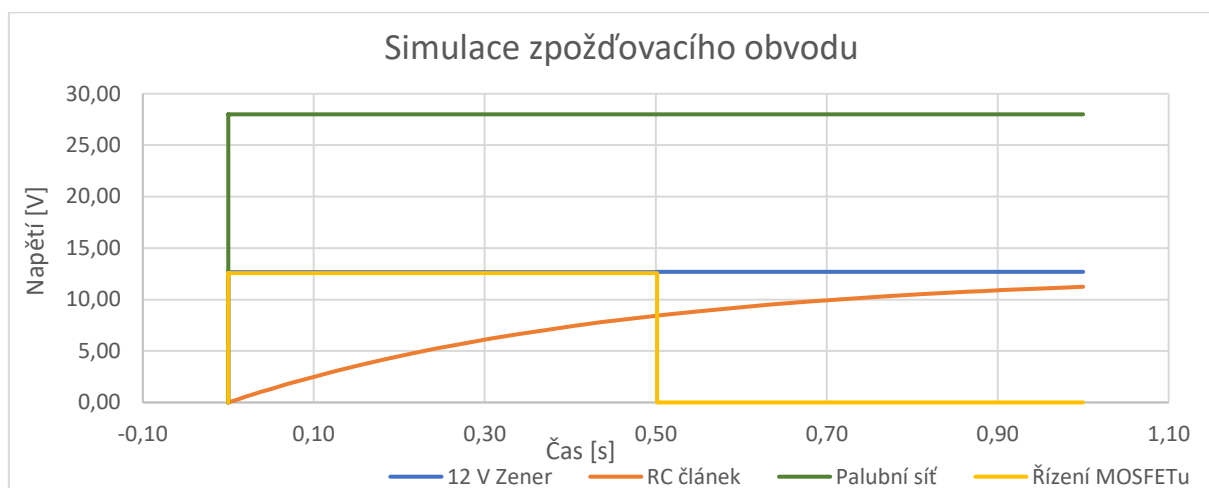
4.1.3 Simulace zpožd'ovacího obvodu

Ve freeware verzi TINA není součástka SE555 dostupná. Samozřejmě by šla importovat, ale program LTspice (viz. kapitola 2.5.2) má tuto součástku v základu. Z tohoto důvodu byl zvolen pro tuto simulaci.



Obrázek 24: Schéma elektrického zapojení monostabilního obvodu 555

Hodnoty pro nastavení zpoždění byly zvoleny v kapitole 3.2.7. Výstup ze simulace (viz. Obrázek 24) byl importován a převeden do grafu 8. Simulován byl jak RC článek a výstup (řízení MOSFETu), tak i obvod se Zenerovo diodou, která zde účinkuje jako zdroj 12 V napětí jak pro obvod 555, tak pro operační zesilovač.



Graf 8: Výsledek simulace monostabilního obvodu 555

4.1.4 Simulace solenoidu

Simulace solenoidu byla provedena v programu FEMM (viz. Kapitola 2.5.3) model byl vytvořen na základě firemní dokumentace k solenoidu. Pomocí vzorců 7-11 lze určit základní vlastnosti solenoidu, dále byly nasimulovány 2 polohy solenoidu. První je poloha, kdy je ventil rozepnutý, v této poloze je důležitá síla při spínacím proudu. Jedná se o sílu, kterou působí solenoid na šoupátko v momentu sepnutí. V tomto bodě je síla nejnižší. Druhá poloha je po dosednutí, zde je důležitá síla při proudu udržovacím.

FEMM poskytuje dobrý přehled o silách magnetických, nezapočítává však parazitní jevy jako je tření. Výsledné hodnoty se nacházejí v tabulce 5.

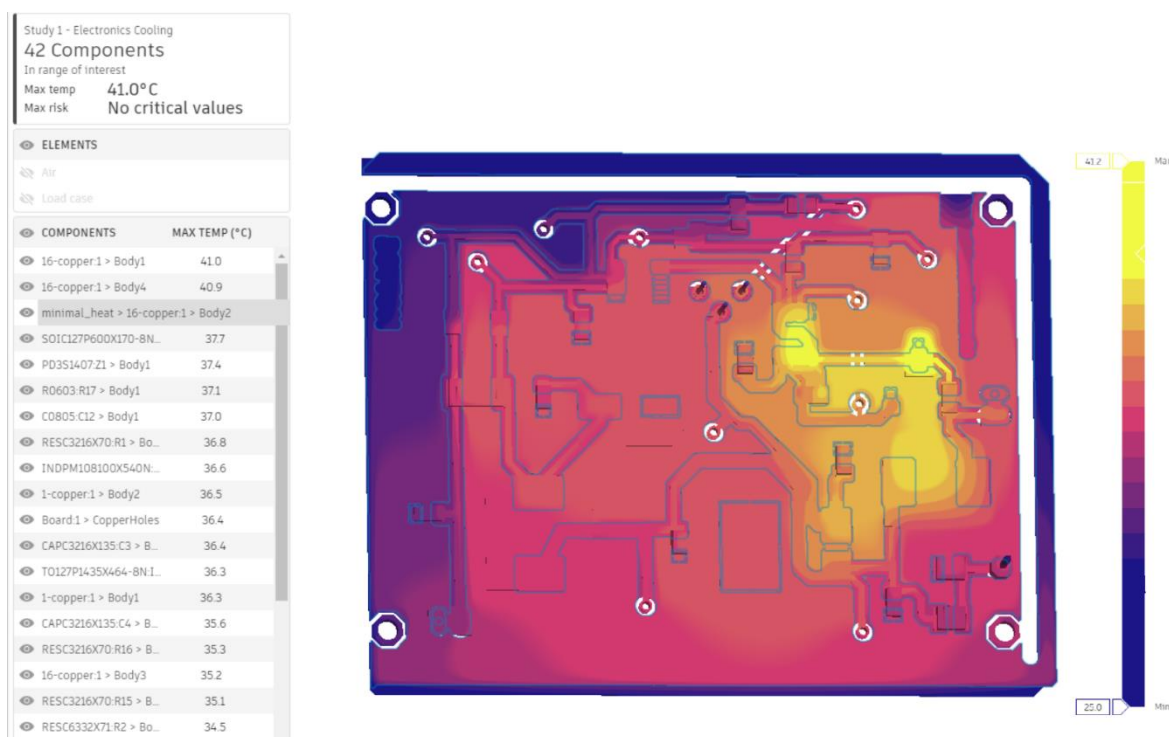
Proud 870 mA		Proud 350 mA	
Stav ventilu	Síla [N]	Stav ventilu	Síla [N]
zavřeno	79,96	zavřeno	60,36
otevřeno	55,12	otevřeno	25,83

Tabulka 5: Přehled hodnot ze simulace síly působící na šoupátko ventilu

4.1.5 Simulace zahřívání elektroniky

Simulace zahřívání byla provedena s pomocí programu Fusion 360 (viz. Kapitola 2.6.2). Do programu lze přímo z EAGLE importovat návrh tištěného spoje. Hodnoty ztrátového výkonu byly určeny s pomocí simulace i výpočtů. Byly zvoleny maximální hodnoty ztrátového výkonu v operačním rozsahu zdroje, okolní teplota 25 °C a tloušťka mědi na tištěném spoji 70 µm.

Simulace probíhá na takzvaném cloudu, tedy na počítači firmy Autodesk, to umožní vytvářet komplikované simulace i na slabších zařízeních.



Obrázek 25: Simulace zahřívání elektroniky v programu Fusion 360

Výsledkem simulace je grafický výstup (viz. Obrázek 25), rozložení teploty je při vysokém napětí podle očekávání. Zenerova dioda se dá považovat za pasivní zdroj. Nepotřebný výkon přeměňuje na teplo a jelikož se jedná o součástku o ploše cca 1 mm² výkon je soustředěn téměř bodově. Přesto je maximální teplota na desce tištěných spojů pouze 41 °C.

V nominálních podmínkách takový ohřev nehrozí. Nominální napětí sítě je nižší, než bylo určeno pro výpočet a zároveň v simulaci není započítáno proudění vzduchu.

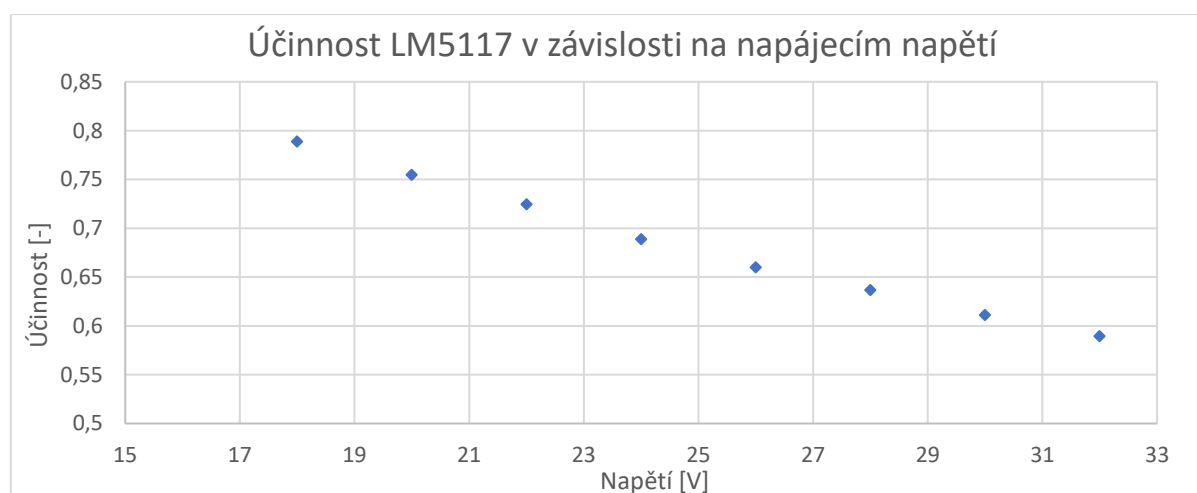
4.2 Základní parametry

Jako první je nutné ověřit základní parametry zdrojů jako účinnost, stabilita, přepínání proudů a doba mezi signálem a požadovaným proudem.

Provedení: Účinnost byla měřena s pomocí dvou multimetrů, jeden měřil napětí a druhý proud přes solenoid. Po ustálení hodnot byly údaje zapsány. Měření byla provedena pouze na výkonové části obvodu. V realitě je hodnota účinnosti o něco nižší kvůli ztrátám na Zenerově diodě a spotřebě obvodu 555, i když je mizivá. Hodnota příkonu byla odečtena z laboratorního zdroje. Odezva mezi požadavkem na spuštění a dobou, kdy zdroj dosáhne požadovaného proudu, byla určena s pomocí osciloskopu. Stabilita byla v tomto kroku určena pouze funkcí min/max na multimetru.

4.2.1 Základní parametry LM5117

V grafu 9 lze pozorovat účinnost zdroje založeného na LM5117. Ta není taková jako uvedená v produktovém listě, přesto je více než akceptovatelná. Ventil v ustáleném stavu má nízkou spotřebu, zahřívání tak není značné.

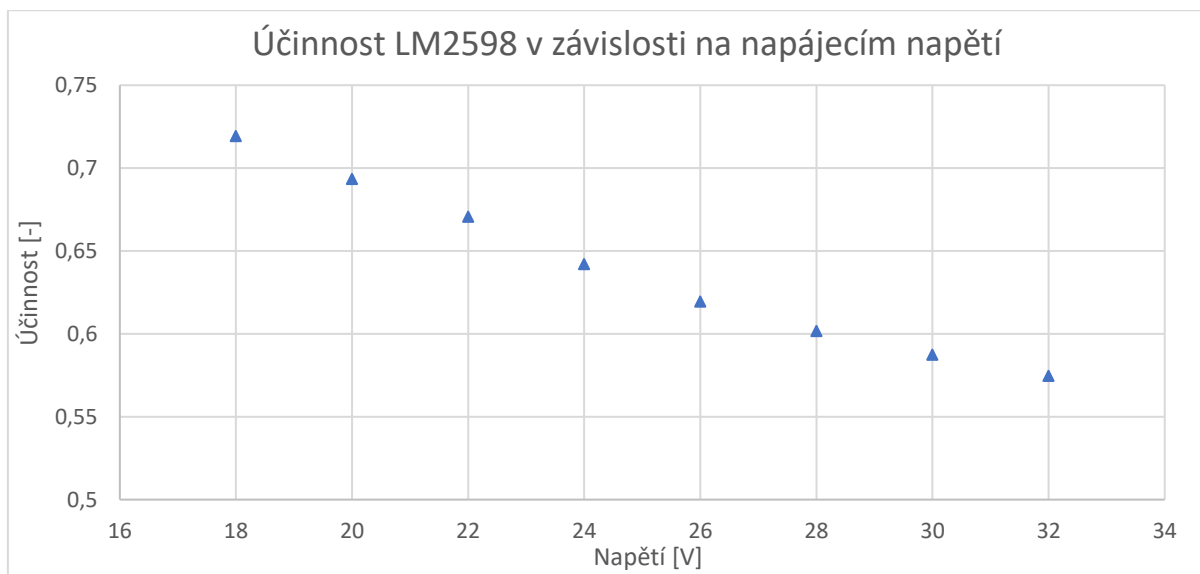


Graf 9: Účinnost LM5117 v závislosti na napájecím napětí

Stabilita určená touto základní metodou je velmi dobrá, zákmit je po ustálení pouze 0,2 mA. Doba spuštění zdroje je 17 ms, To je znatelně větší hodnota než 9 ms určených simulací (viz. Graf 6), přesto však hodnota spadá do povolených limitů.

4.2.2 Základní parametry LM2598

Účinnost LM2598 je znatelně nižší při nominálním napětí sítě tedy 28 V je pouze 60,1 %. (viz. Graf 10) Po odečtení výkonu odebraného Zenerovo diodou je účinnost menší než 60 %. To se dá považovat za hodnotu na hraně přípustnosti. V tomto případě se jedná o ztrátový výkon okolo jednoho wattu. Tato skutečnost by mohla být problémem při zkoušce vysoké teploty.



Graf 10: Účinnost LM2598 v závislosti na napájecím napětí

Spínací čas je zde naopak od LM5117 výrazně rychlejší než v simulaci (Graf 7), a to pouze 6 ms, přesto je přechodový jev méně výrazný.

Zkouška stability bude provedena v pozdější fázi vývoje. Proudová stabilita je jedním z testů podle normy RTCA DO-160g.

4.3 Zkoušky podle RTCA DO-160G

Zkoušky byly provedeny s prototypem na bázi LM2598. První prototyp s LM5117 byl poškozen neopatrnou manipulací a začít zkoušky pouze s jedním kusem není ideální. Jak již bylo řečeno v kapitole 3.3, nedostatek součástí znemožnil vytvořit další kusy. Byl tak zvolen méně vhodný, ale dostupný měnič.

4.3.1 Teplotní zkoušky

Tyto testy určují výkonnostní charakteristiky zařízení v příslušných kategoriích pro teploty a nadmořské výšky definovaných v normě RTCA DO-160g. Je definováno několik postupů testování teploty a nadmořské výšky, z nichž každý je třeba vybrat podle kategorie, pro kterou je zařízení určeno k použití při instalaci v letadle. Výběr kategorie závisí na umístění, maximální provozní nadmořské výšce letadla a zda je vybavení umístěné v oblasti s regulovanou teplotou a tlakem. To musí vzít v úvahu konstruktér zařízení při hodnocení kategorie (RTCA 1975).

4.3.1.1 Kategorie

Zvolenou kategorií je D2. Zařízení určené pro instalaci v místech bez tlaku a bez kontrolované teploty na letadle, které je provozováno ve výškách do 50 000 ft (15 200 m) (RTCA 1975).

4.3.1.2 Měřicí zařízení

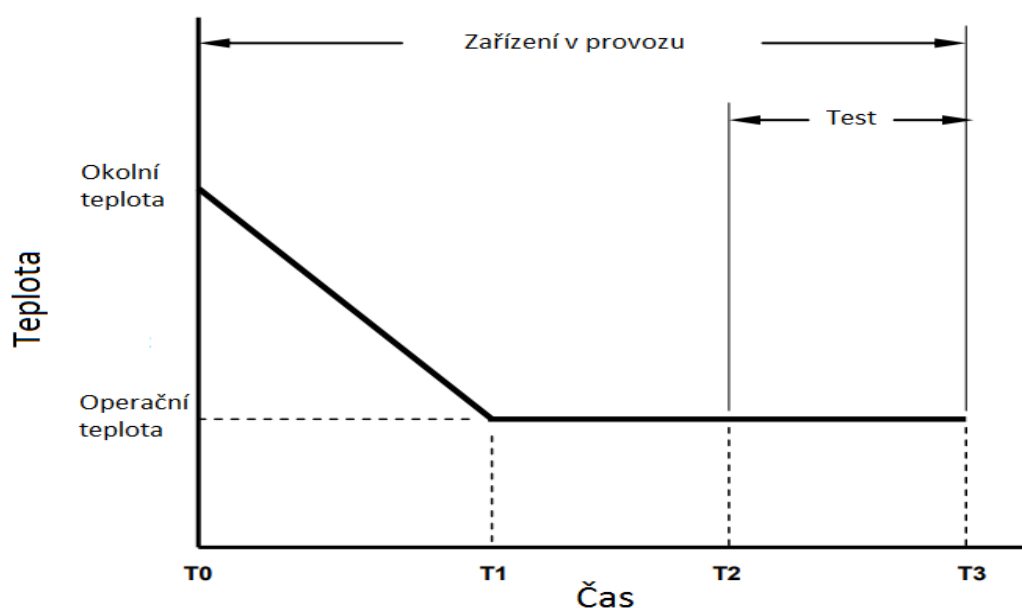
Multimetr FLUKE 287 na snímání proudu. Tento přístroj je pravidelně kalibrován (viz. Příloha 5). Na rozsahu 0-400 mA je při kalibraci maximální dovolená chyba 0,15% z rozsahu, to znamená že všechna měření mohou mít maximální chybu 0,6 mA. Toto je maximální hodnota. Chyba bývá většinou znatelně menší.

Teplotní komora CTS T-65/50 s rozsahem -65 až +180 °C, maximální dovolená chyba při kalibraci je 0,2 % z rozsahu tedy 0,5 °C. Regulace teploty probíhá s pomocí PID regulátoru, to umožňuje udržení stabilní teploty po dobu potřebnou k provedení zkoušky. Samotná teplota je snímána pomocí senzoru PT-100.

4.3.1.3 Test dlouhodobé nízké operační teploty

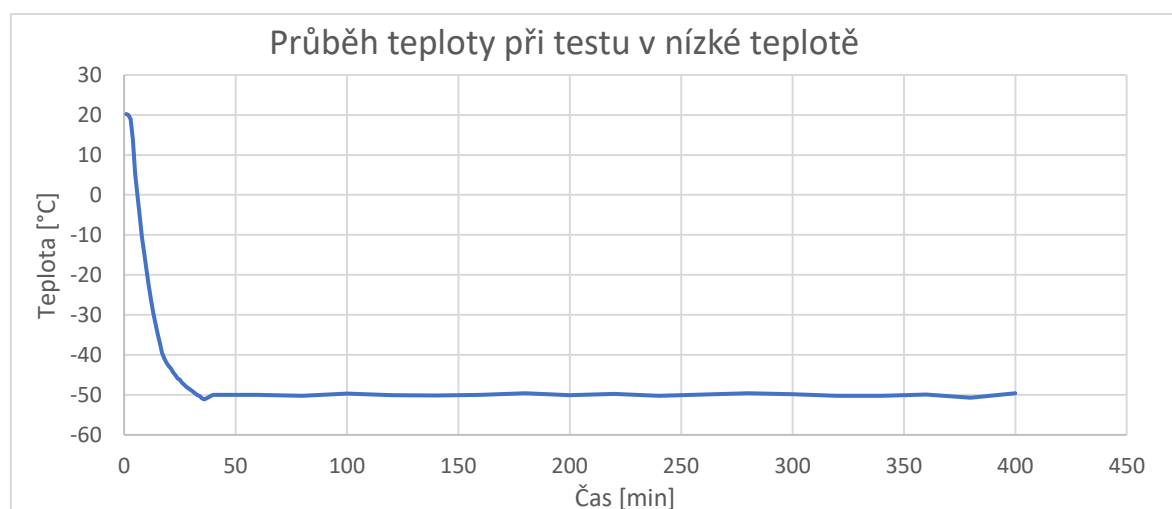
Tento test ověří správnou funkci zařízení při minimální očekávané teplotě zařízení při provozu letadla za standardních podmínek.

Při provozu zařízení se upraví teplota vzduchu ve zkušební komoře na hodnotu provozní nízká teplota specifikovanou v normě RTCA DO-160g při okolním tlaku a rychlosti nejméně 2 °C/min. Po stabilizaci teploty se zařízení provozuje po dobu minimálně dvou hodin. Udržování teploty vzduchu ve zkušební komoře na provozní nízké teplotě je nutné (viz. Graf 11).



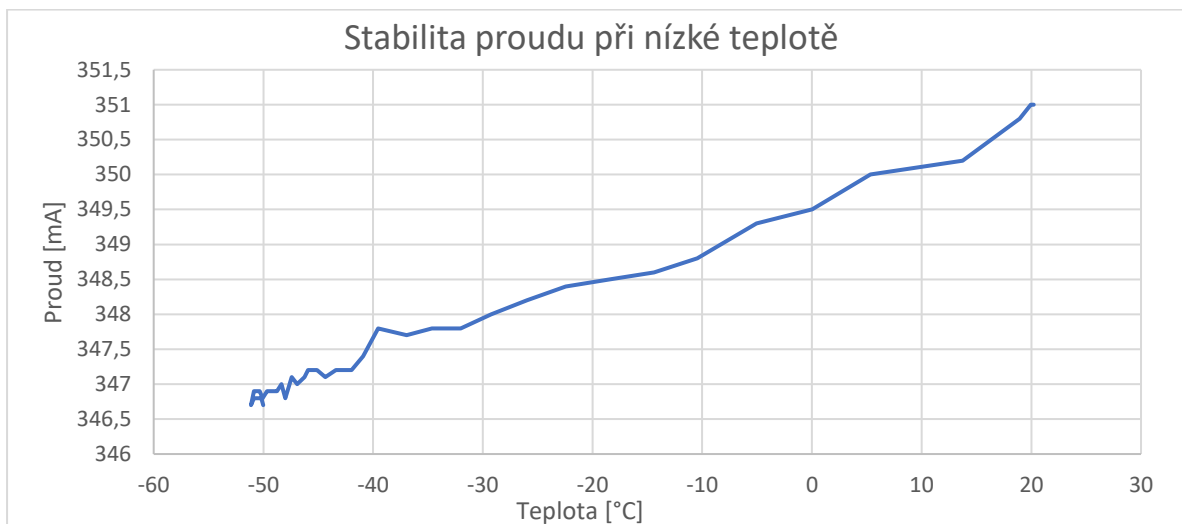
Graf 11: Průběh zkoušky dlouhodobé nízké operační teploty podle RTCA DO-160g

Provedení: Záznam jak proudu, tak teploty byl prováděn v intervalech jedné minuty. Gradient teploty byl nastaven na maximální možný.



Graf 12: Reálný průběh teploty při zkoušce dlouhodobé nízké operační teploty

Z grafu 12 je jasné, že podmínka 2 °C/min byla splněna. Také byl překonán požadavek na provozně nízkou teplotu -45 °C. Test byl proveden při -50 °C, jedná se podnikový standard. Dříve nebyly komory takto teplotně stabilní a výchyly v teplotách způsobovaly nepříjemnou odchylku od požadované teploty (zvláště u nízkých teplot). Tato nová komora po ustálení na provozní nízké teplotě neměla po dobu záznamu odchylku větší než $\pm 1,2$ °C.



Graf 13: Závislost dodávaného proudu na okolní teplotě pro zkoušku nízké operační teploty

Na grafu 13 lze pozorovat velmi dobrou stabilitu proudu v širokém spektru nízkých teplot. Nestálost proudu okolo -50 °C je způsobena způsobem záznamu dat. Ta byla zaznamenávána v určitých časových intervalech a PID regulátor okolo požadované hodnoty provádí pouze malé úpravy za jednotku času. Z tohoto důvodu existuje více záznamů v okolí nastavené teploty.

Vizuální kontrola: Zařízení beze změn.

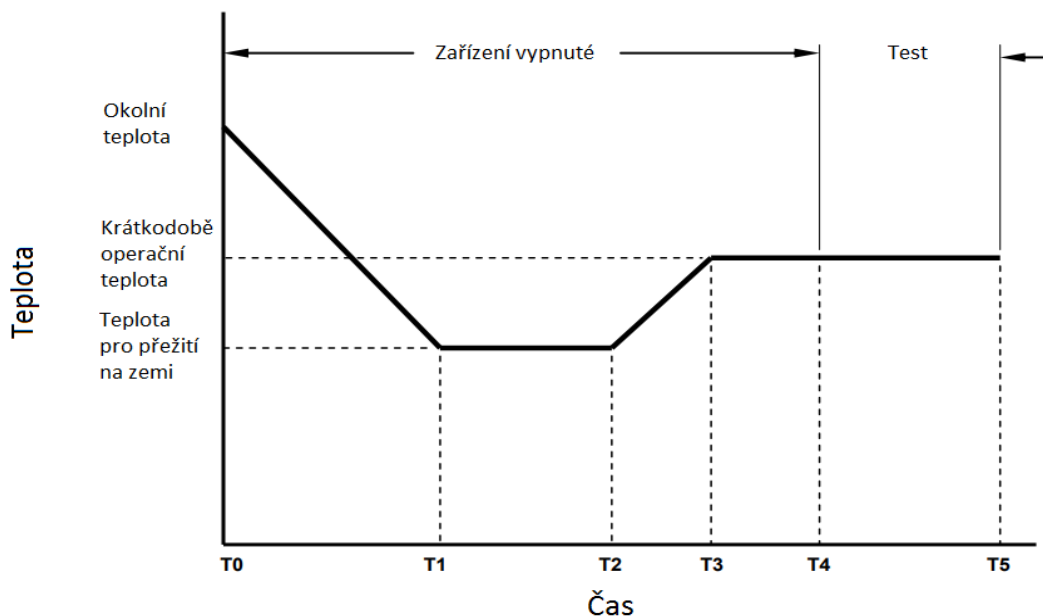
Proud po ustálení na pokojovou teplotu: 351,2 mA

Závěr: Vyhovělo

4.3.1.4 Nízkoteplotní test přežití na zemi a test krátkodobě nízké operační teploty

Tento test simuluje podmínky, kterým může být zařízení vystaveno v době, kdy je letadlo na zemi a není v provozu (RTCA 1975).

Při tomto testu je tlak roven okolí a zařízení je vypnuté, podle kategorie zařízení se určí vhodná nízká teplota pro přežití na zemi. Tato teplota se udržuje po dobu alespoň tří hodin. (viz. Graf 14). Poté se teplota zvýší na krátkodobou provozní nízkou teplotu, při minimální rychlosti $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (RTCA 1975). Jakmile teplota dosáhne požadované hodnoty, zařízení se spustí po dobu alespoň 30 minut. Po dobu celého testu je nutné udržovat teplotu vzduchu ve zkušební komoře pod hranicí určenou normou.



Graf 14: Průběh zkoušky dlouhodobé nízké operační teploty podle RTCA DO-160g

V důsledku neúplného utěsnění komory v okolí napájecích kabelů vznikla při tomto testu na zařízení námraza, která by nevznikla při provozu, ani na zemi při nízké teplotě, neboť v takovém případě je relativní vlhkost vzduchu zanedbatelná. Námraza se po spuštění začínala rozpouštět, ztráty v obvodu způsobují zahřívání zařízení a zkouška tak musela být ukončena předčasně.

Vizuální kontrola: Zařízení mokré, ale beze změn.

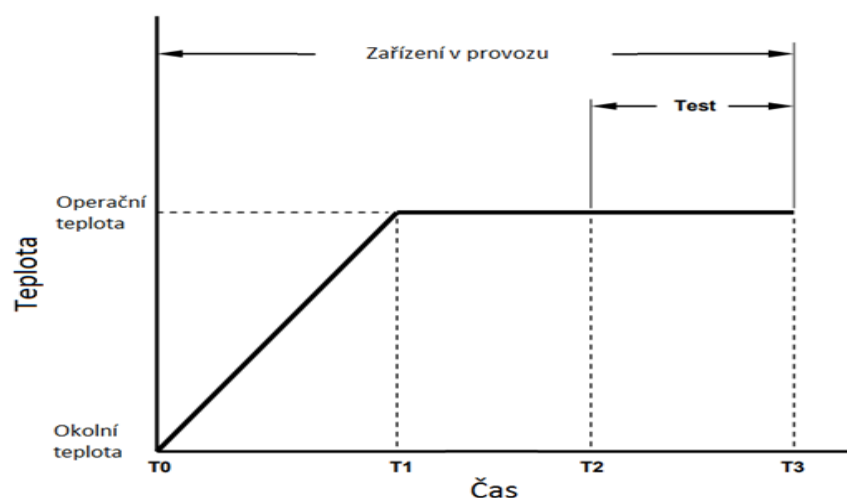
Proud po ustálení na pokojovou teplotu: 350,7 mA

Závěr: Zkoušku bude nutné opakovat s lepším těsněním okolo napájecích kabelů.

4.3.1.5 Test dlouhodobé vysoké operační teploty

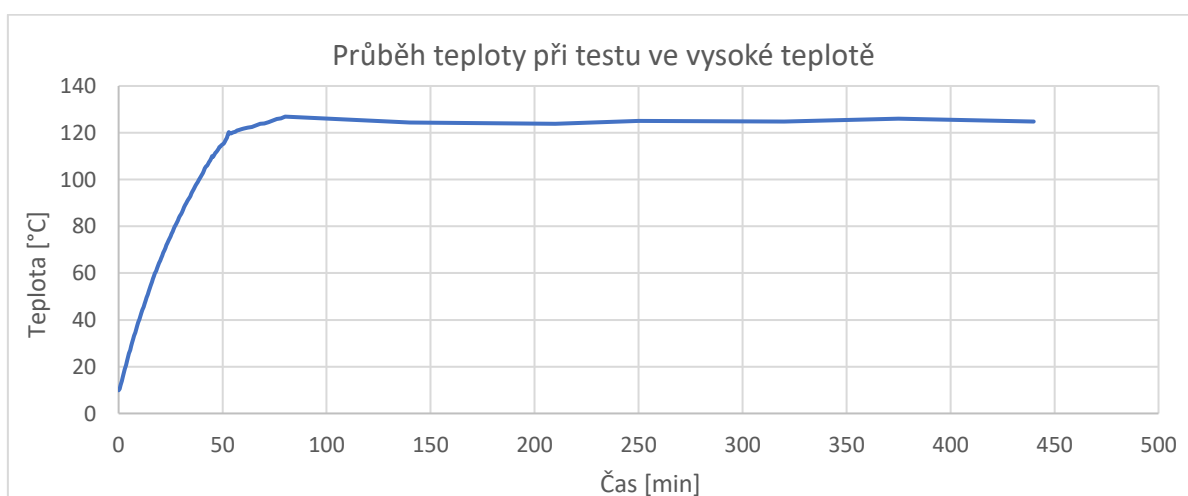
Tento test ověří správnou funkci zařízení při maximální očekávané teplotě zařízení při provozu letadla za standardních podmínek. Foto zařízení před začátkem testu je příloha 6.

Při provozu zařízení se upraví teplota vzduchu ve zkušební komoře na hodnotu provozní vysoká teplota specifikovanou v normě RTCA DO-160g při okolním tlaku. Po stabilizaci teploty se zařízení provozuje po dobu minimálně dvou hodin.



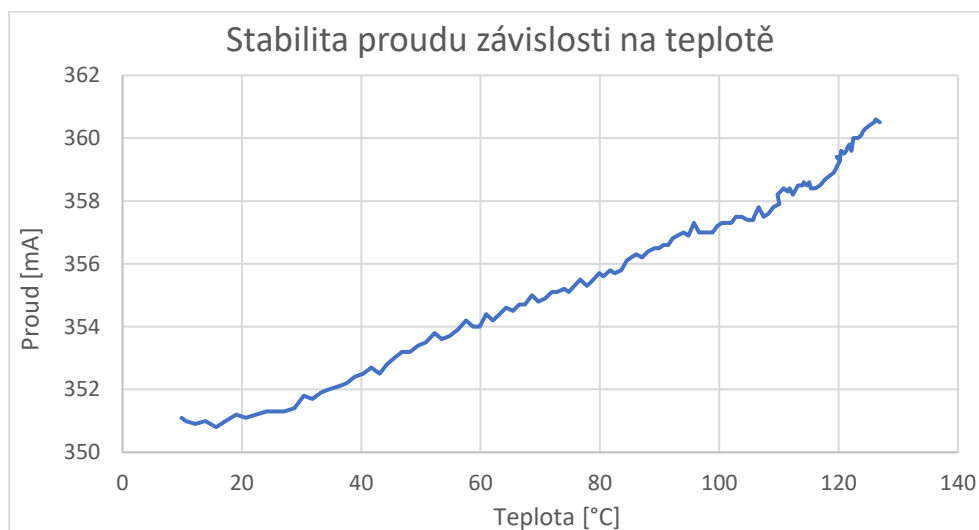
Graf 15: Průběh zkoušky dlouhodobé vysoké operační teploty podle RTCA DO-160g

Provedení: Záznam jak proudu, tak teploty byl prováděn v intervalech jedné minuty. Gradient teploty byl nastaven na maximální možný.



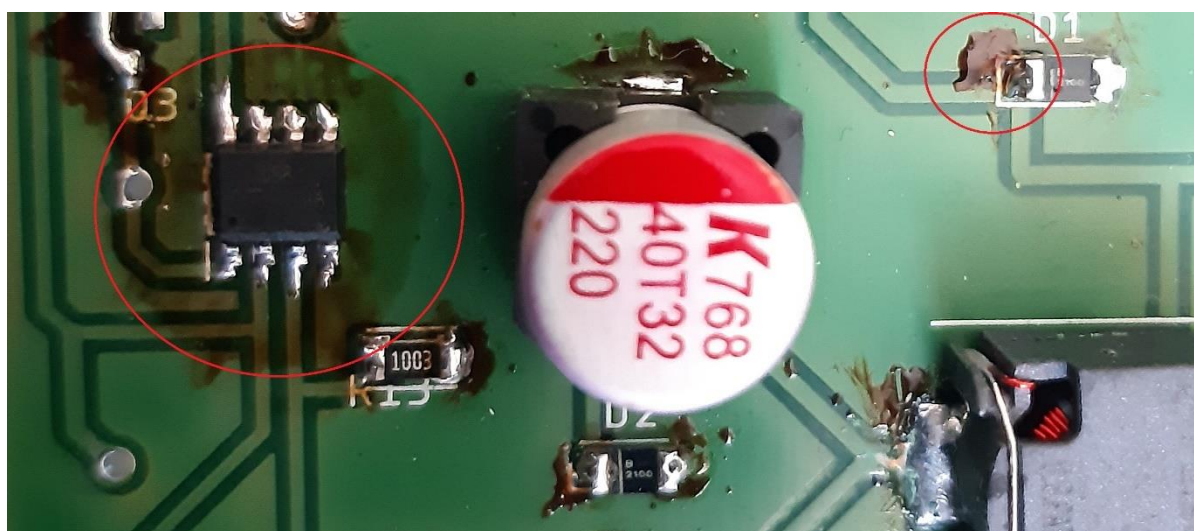
Graf 16: Průběh teploty při zkoušce vysoké operační teploty

Z grafu 16 je jasné, že podmínka 2 °C/min byla splněna, také byl překonán požadavek na provozně vysokou teplotu 85 °C. Test byl proveden při 125 °C jedná se o podnikový standard, pro bezpečnostní prvky. V zásadě je na výrobci, jakou teplotu zvolí, pokud je vyšší nežli teplota určená normou. Komora po ustálení na provozní vysoké teplotě neměla po dobu záznamu odchylku větší než $\pm 1,9$ °C.



Graf 17: Závislost dodávaného proudu na okolní teplotě pro zkoušku vysoké operační teploty

Na grafu 17 lze pozorovat velmi dobrou stabilitu proudu v širokém spektru vysokých teplot. Nestálost proudu okolo 125 °C je způsobena stylem záznamu dat, stejně jako u nízkých teplot. PID regulátor okolo požadované hodnoty provádí pouze malé úpravy za jednotku času. Záznam okolo nastavené hodnoty má více bodů na jednotku teploty.



Obrázek 26: Vizuální kontrola po testu vysokých teplot

Vizuální kontrola: Na obrázku 26 lze pozorovat vliv vysokých teplot na manuálně pájené součásti. Samotný cín pro manuální pájení obsahuje kalafunu pro ulehčení práce s pájkou. Pro vysokoteplotní aplikace však není tato metoda vhodná. Kalafuna se při testu vysoké teploty začne rozpouštět, později začne být i cítit. Na provoz zdroje to ovšem nemá vliv a případe sériové výroby se pájí vlnou bez kalafuny.

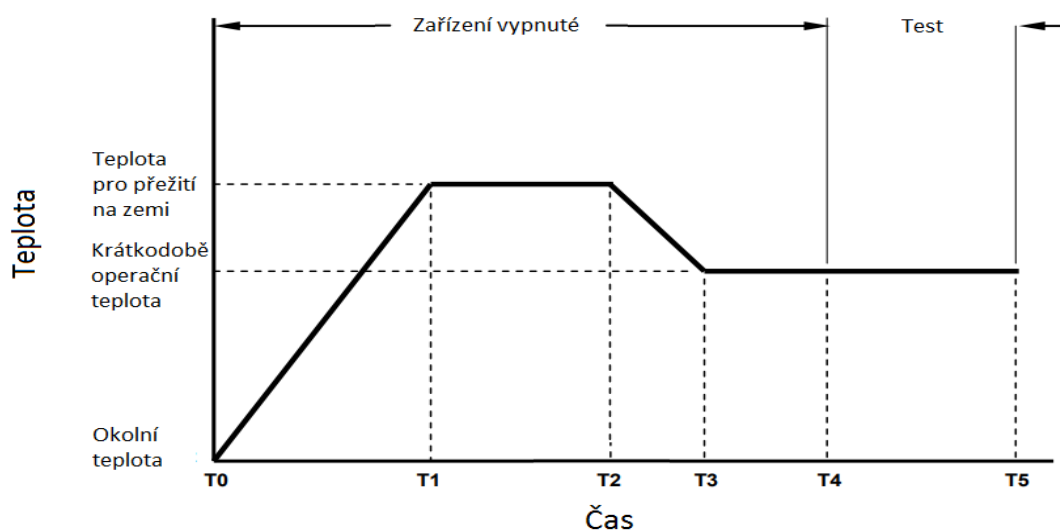
Proud po ustálení na pokojovou teplotu: 352,3mA

Závěr: Vyhovělo

4.3.1.6 Vysokoteplotní test přežití na zemi a test krátkodobě vysoké operační teploty

Tento test simuluje podmínky, kterým může být zařízení vystaveno v době, kdy je letadlo na zemi a není v provozu.

Při tomto testu je tlak roven okolí a zařízení je vypnuté. (viz. Graf 18) Podle tabulky normy RTCA DO-160g se určí vhodná vysoká teplota pro přežití na zemi. Tato teplota se udržuje po dobu alespoň tří hodin. Poté, se teplota sníží na krátkodobou provozní vysokou teplotu minimální rychlostí 2 °C/min. Jakmile teplota dosáhne požadované hodnoty, zařízení se spustí po dobu alespoň 30 minut. Po dobu celého testu je nutné udržovat teplotu vzduchu ve zkušební komoře nad požadovanou hranicí (RTCA 1975).



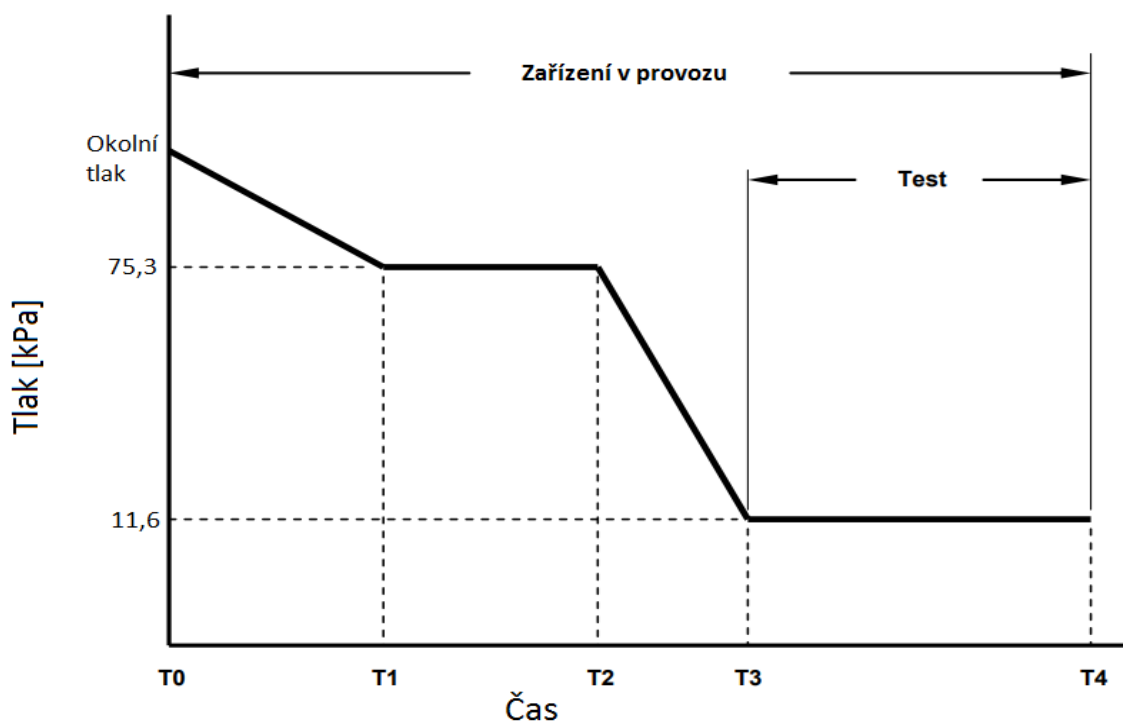
Graf 18: Průběh zkoušky krátkodobě vysoké operační teploty podle normy RTCA DO-160g

Výsledky: Test dlouhodobé vysoké operační teploty byl proveden na úrovni teplot pro přežití na zemi a zařízení fungovalo bez výhrad. Lze jej tak považovat za ekvivalentní.

Závěr: Vyhovělo

4.3.1.7 Test dekomprese

Tento test má za účel ověřit za prvé schopnost zařízení odolat rychlé změně tlaku a za druhé ověřit schopnost zařízení uchladit ztrátový výkon za sníženého tlaku. Rychlá změna tlaku pro zařízení v této kategorii je změna ze 75,3 kPa na 11,6 kPa za méně než 15 sekund. Zařízení musí poté minimálně 10 minut, nebo do ustálení teploty pracovat v rámci požadavků.



Graf 19: Průběh tlaku během zkoušky dekomprese podle normy RTCA DO-160g

Provedení: Zkouška byla provedena s pomocí vakuového zvonu a vývěvy s čerpací rychlostí 50 litrů za minutu.

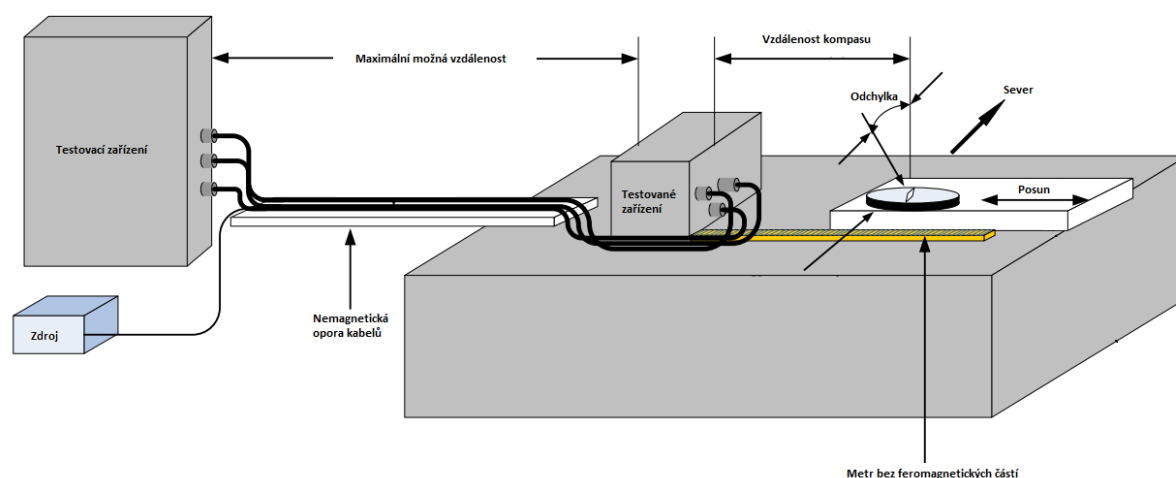
Výsledky: Nedokonalé utěsnění okolo kabelů pro napájení a kabelů senzoru znemožnilo provedení zkoušky v požadovaném průběhu, jak je vyobrazeno na grafu 19.

Závěr: Zařízení odolalo změně tlaku bez žádných vedlejších jevů, ovšem průběh zkoušky neodpovídal normě RTCA DO-160g. Zkoušku tedy bude nutné opakovat na zařízení vhodném pro tento účel.

4.3.2 Zkouška magnetických vlivů

Tento test určí magnetický účinek zařízení a je určen k ověření nejbližšího možného umístění vzhledem ke kompasům nebo snímačům kompasu. Funkce kompasu je zásadní i v době, kdy se létá s pomocí GPS. Zároveň se v okolí zařízení nemohou nacházet další přístroje ovlivnitelné magnetickým polem zařízení.

Existují určité kategorie, do kterých zařízení může spadat, Tyto kategorie později určí, kam na letadle může být dané zařízení nainstalováno tak, aby způsobilo co nejméně rušení. Kategorii určuje vzdálenost, při které se kompas vychýlí o jeden stupeň od opravdového severu (viz. Tabulka 6). Tyto hodnoty by mohly být ovlivněny způsobem měření, proto existuje standardizovaný postup, jak tuto zkoušku uskutečnit (viz. Obrázek 27)

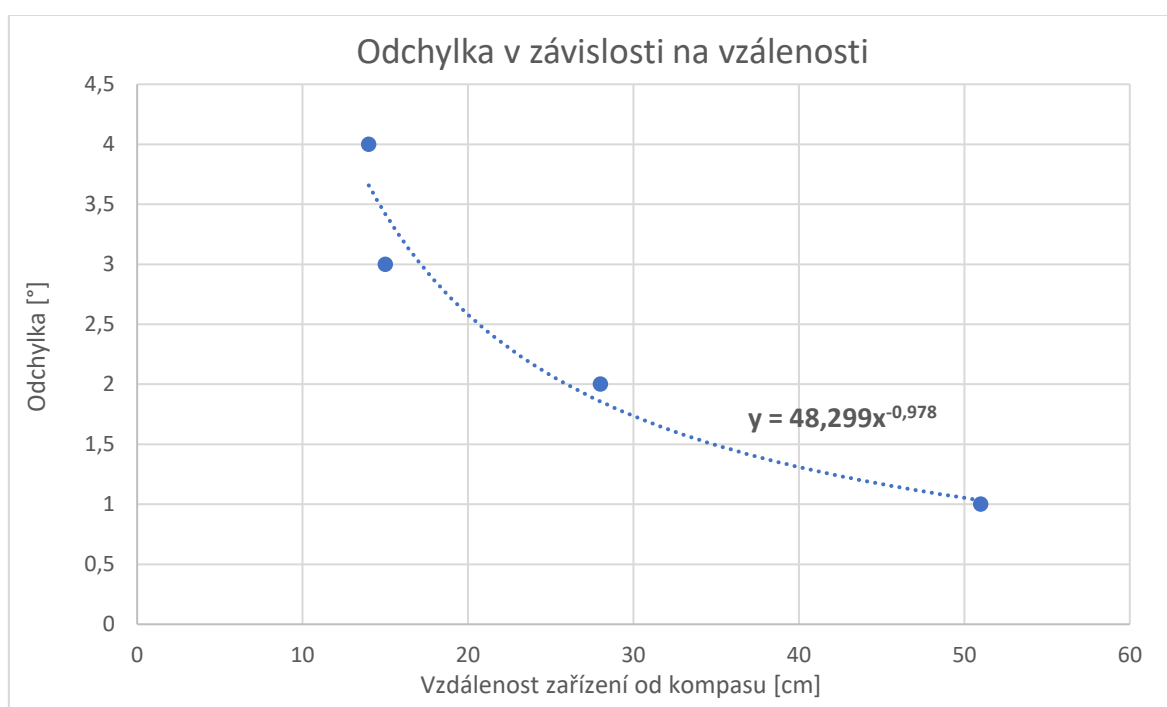


Obrázek 27: Zkušební zařízení pro test magnetických vlivů podle normy RTCA DO-160g

Kategorie zařízení	Vzdálenost D, ve které je odchylka 1° [m]
Y	$D = 0$
Z	$0 < D < 0,3$
A	$0,3 < D < 1$
B	$1 < D < 3$
C	$D > 3$

Tabulka 6: Kategorie zařízení podle magnetické emise

Provedení: Solenoid ve ventilu je hlavním zdrojem magnetického pole. Z tohoto důvodu byl zvolen jako místo, od kterého se měří vzdálenost. Test musel být proveden dvakrát. Problém při prvním měření bylo, že stůl, na kterém byl test proveden obsahoval feromagnetické šrouby. Tyto šrouby znehodnotily výsledek a test musel být opakován na stole čistě dřevěném. Bylo zaznamenáno více bodů, to umožnilo vytvořit graf 20.



Graf 20: Odchylka v závislosti na vzdálenosti při testu magnetických vlivů

Intenzita magnetického pole klesá nepřímou úměrou. To znamená, že očekávaná hodnota exponentu aproximace je -1, hodnota -0,978 značí mírnou nepřesnost měření. Zařízení spadá do kategorie A. V této kategorii je zařízení, které ve vzdálenosti $0,3\text{m} < D < 1\text{m}$ působí výchylku jednoho stupně. Naměřená hodnota 0,51 m tím pádem snadno splňuje podmínky této kategorie i při menších nepřesnostech.

Vizuální kontrola: Zařízení beze změn.

Proud po ustálení na pokojovou teplotu: 350,9mA

Závěr: Vyhovělo v kategorii A

4.3.3 Zkouška odolnosti proti elektrostatickému výboji

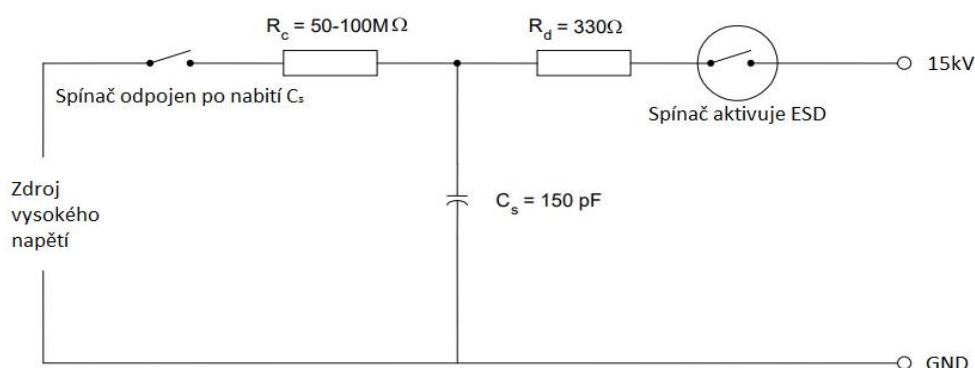
Zkouška elektrostatickým výbojem určuje schopnosti zařízení plnit svou zamýšlenou funkci bez trvalého snížení výkonu jako následek zasažení elektrostatickým výbojem. Týká se zařízení, které může být zasaženo výbojem statické elektřiny během lidského kontaktu.

Některé faktory přispívající k pravděpodobnosti ESD mohou být: nízká relativní vlhkost, teplota, použití koberců s nízkou vodivostí (umělé vlákno), vinyl sedadla a plastové konstrukce, které mohou existovat na všech místech v letadle (RTCA 1975). Tento test se provádí pro všechna zařízení a povrchy, které jsou přístupné za normálního provozu, nebo při údržbě letadla.

Odolnost vůči elektrostatickému výboji musí být taková, že zařízení ve zkoušce vydrží sérii pulzů elektrostatického výboje na testovací úrovni 15 000 voltů, nasměrovaných na konkrétní místa lidského kontaktu se zařízením (RTCA 1975).

Provedení: Vysokonapěťový DC-DC měnič, fungující na bázi rezonance, nabíjí kondenzátor (viz. Obrázek 28). Po nabití se rozepte jeden spínač a sepne druhý. To umožní vybití kondenzátoru přes odpor R_d . Ten limituje proud a samotný kondenzátor má velmi malou kapacitu.

Jediné body lidského kontaktu, kde hrozí poškození zařízení, jsou napájecí piny. Mezi napájecími vývody tam je ovšem bidirekcionální transil jako ochrana proti přepětí. Kostra samotného ventilu bude uzemněna. A nebude tak možné zařízení poškodit výbojem do této části.



Obrázek 28: Zapojení pro zkoušku odolnosti proti elektrostatickému výboji

Výsledek: Nelze přesně určit napětí při kterém byl test proveden, pouze při nabíjení. Přes to, že existují voltmetry, které mají dostatečný rozsah, žádný z nich není dokonalý. Vnitřní odpor dokonalého voltmetru je nekonečný a nemůže tak přes něj téci proud. Ovšem reálný má vnitřní odpor v řádu milionů ohmů, to znamená že se přes něj kondenzátor vybíjí a snižuje se tak jeho napětí.

Ochranný prvek, a to bidirekcionální transil, který při napětí větším nežli 39 V způsobí zkrat terminálu. Toto způsobí restart zařízení. To ovšem není vhodné, ale preferované oproti poškození.

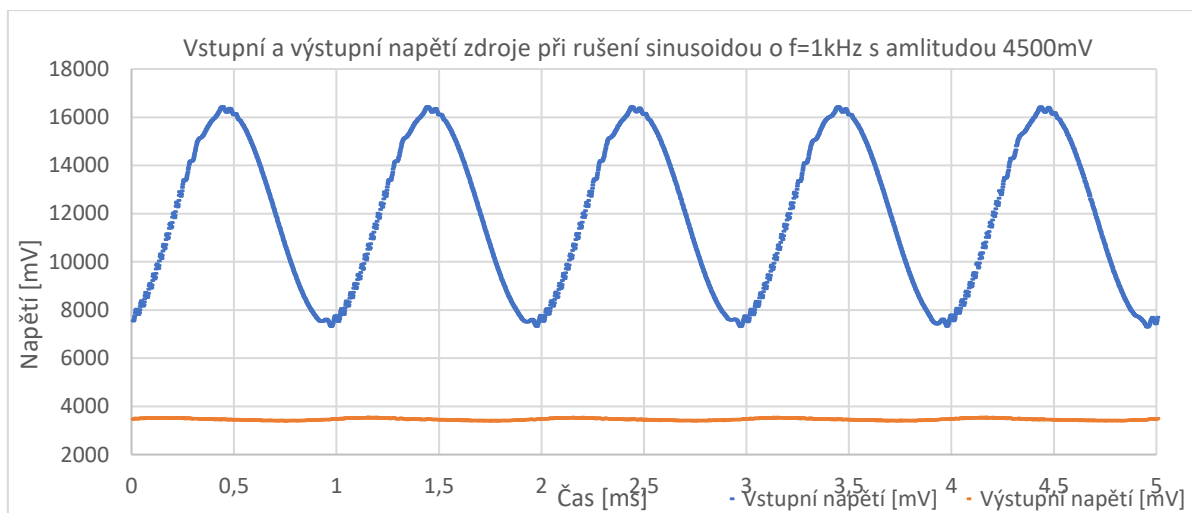
Závěr: Standardně se využívá speciální zdroj, který má nastavenou přesnou hodnotu poskytovaného napětí. Tato zkouška byla provedena s neadekvátním testovacím zařízením. Zkoušku však lze považovat za částečně úspěšnou, transil splnil svojí funkci a zkratoval terminály.

4.3.4 Zkoušky audio-frekvenčního rušení

Zkoušky audio-frekvenčního rušení mají za cíl dokázat schopnost zařízení tolerovat nestabilní napětí palubní sítě. To může být vyvoláno například spínáním BLDC motoru. Zařízení o spotřebě větší než 1 kW nesmí mít zákmit spotřeby přes 7 %, přesto může vyvolat periodické změny palubního napětí.

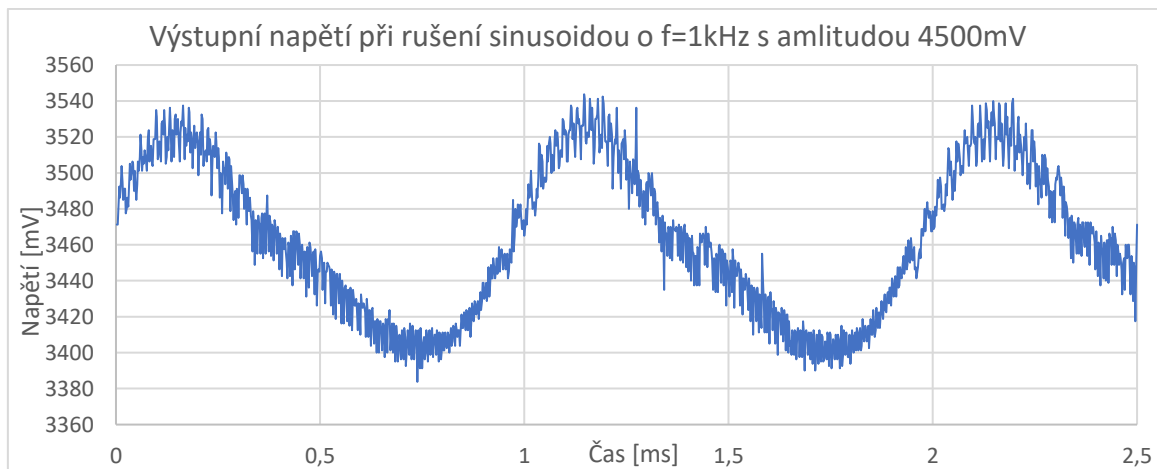
Měřicí zařízení: Osciloskop Owon XDS3202A toto měřicí zařízení je pravidelně kontrolováno a povolený limit pro chybu je 3% přesto je většinou chyba měření daleko menší.

Provedení: Dvoukanálový osciloskop byl zapojen tak, aby měřil vstupní a výstupní napětí zdroje. Záznam byl prováděn v časovém kroku závislém na frekvenci vstupního napětí tak, aby byla přesnost dostatečná. Počet získaných záznamů ovšem může ztížit čtení grafů. Jako příklad je uveden test sinusové vlny o frekvenci 1 kHz a amplitudě 4,5 V.



Graf 21: Porovnání vstupního a výstupního napětí zdroje

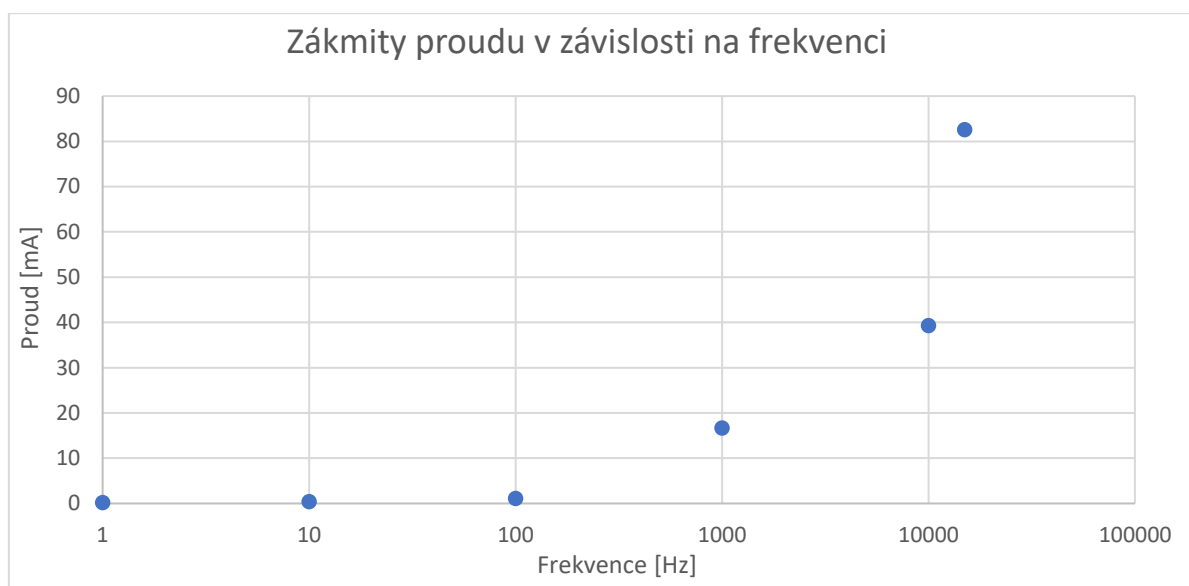
V tomto grafu se nachází obě křivky a každá je složena z 10000 záznamů, to znamená 2000 záznamů na jednu milisekundu neboli na jednu kompletní periodu při frekvenci 1kHz. Další grafy budou obsahovat pouze hodnoty výstupního napětí, tak aby bylo zřejmé, co se děje na výstupu zdroje. Na grafu 22 je přibližné výstupní napětí z grafu 21.



Graf 22: Přibližné výstupní napětí při rušení sinusoidou o frekvenci 1kHz

S pomocí grafu 22 lze díky rozumnějšímu přiblížení pozorovat stabilitu výstupního napětí. Výstup z osciloskopu byl přidán jako příloha 7.

Dále bylo napětí měřeno přes teplotně stabilní $10\ \Omega$ odpor a bylo tak možné hodnoty převést na proud podle rovnice 1. Jelikož se jedná o zdroj proudu, tyto hodnoty jsou více vypovídající. V následujícím grafu 23 jsou uvedeny hodnoty zákmitu proudu při rušení specifickou frekvencí se sinusovým průběhem.



Graf 23: Zákmity proudu v závislosti na frekvenci při rušení sinusoidou

Na omezeném rozsahu frekvencí (1 Hz - 10 kHz) se zdá, že nestabilita roste téměř lineárně. U frekvence se totiž v grafu 15 jedná o logaritmické měřítko. V tabulce 7 jsou uvedeny průměrné hodnoty proudu při rušení specifickou frekvencí se sinusovým průběhem. Průměrný proud vykazuje dobrou stabilitu i přes nárůst hodnoty zákmitů.

Frekvence [Hz]	Proud [mA]
1	351,8
10	351,8
100	350,7
1000	345,8
10000	343,3
15000	343,0
50000	340,7

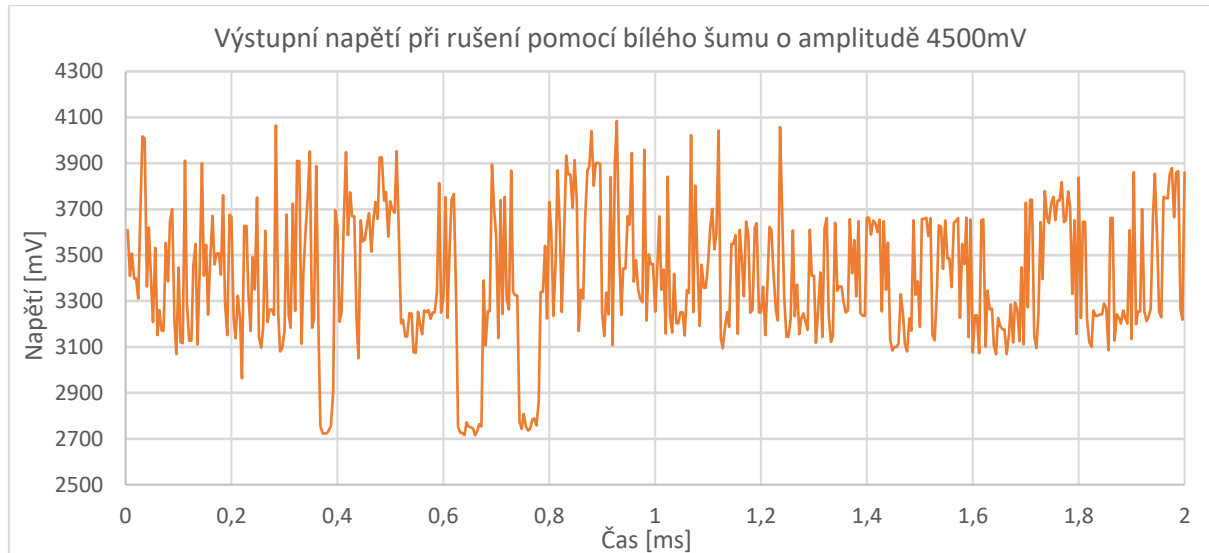
Tabulka 7: Poskytovaný proud při sinusovém rušení o amplitudě 4,5 V

Pro další průběhy rušení, a to pilové, obdélníkové a bílý šum, byla vypracována tabulka 8. Zde lze vyčíst hodnoty průměrného proudu přes zátěž při různých frekvencích.

Signál	Frekvence [Hz]	Proud [mA]
Trojúhelníkový	100	351,7
	1000	352,1
	10000	353,8
Obdélníkový	100	351,6
	1000	350,5
	10000	356,2
Bílý šum	20-20000	359,2

Tabulka 8: Poskytovaný proud pro různé průběhy rušení

Zajímavé průběhy výstupního proudu vyprodukoval hlavně bílý šum a obdélníkový průběh. V případě bílého šumu jeho náhodná povaha způsobila výkyvy proudu až téměř o 30% nominálního proudu (viz. Graf 24), jak do plusu tak do mínusu. Průměrná hodnota se ale stále drží v přijatelných mezích, díky indukčnosti cívky má obvod jakousi „setrvačnost“.



Graf 24: Výstupní napětí při rušení pomocí bílého šumu o amplitudě 4500mV

Při rušení s průběhem ve tvaru obdélníku bylo výstupní napětí přesně podle očekávání výrazně zvlněno pouze v bodech přechodu z jedné úrovně napětí na druhou. A to tak, že při nárůstu vstupního napětí lze pozorovat nárůst a zákmit na výstupním. Samozřejmě naopak při přechodu na úroveň nižší, proud na chvíli poklesne. (viz. Graf 25)



Graf 25: Výstupní napětí při rušení pomocí obdélníkového signálu o amplitudě 4500mV

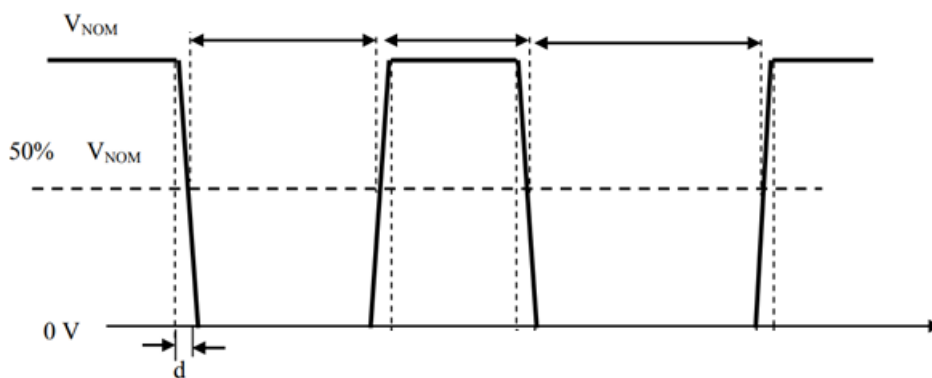
4.3.5 Zkoušky stability palubní sítě

V této části jsou definovány postupy pro ověřování dílů v případě poruch na elektrické síti letounu. Moderní letadla mívají více nezávislých sítí. Častá je například kombinace 28 V DC a 115 V AC rozvodů. Zařízení připojená k těmto sítím musí splňovat jiné požadavky například: 28 V DC síť má záložní baterii s nezanedbatelnou kapacitou. Stále častěji se ale 115 V AC sítě nahrazují takzvanými HVDC neboli vysokonapěťovými DC sítěmi. Jejich výhodou je hlavně snížení váhy kabelů.

Podle zvolené sítě a typu testované komponenty existují určité kategorie se specifickými požadavky. V tomto případě se jedná o kategorii B, která je určena pro 28 V DC zařízení zaměřené pro použití v elektrických systémech napájených motorem poháněnými alternátory/usměrňovači, nebo stejnosměrnými generátory. Zařízení kategorie B musí mít baterii s významnou kapacitou.

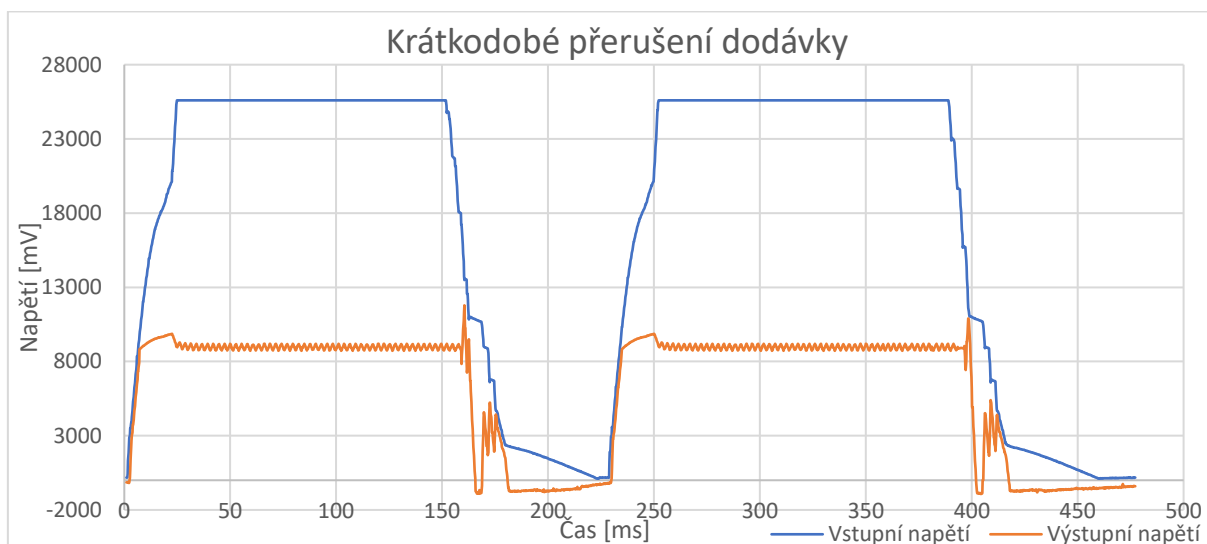
4.3.5.1 Krátkodobé přerušení dodávky

Přepnutí zdrojů energie může mít za následek přerušení napájení po dobu až 200 ms pro kategorii A, pro zařízení kategorie B 100 ms . Tato zkouška je nutná pouze pro zařízení, která obsahují digitální obvody, paměťová zařízení, zpožďovací obvody anebo mají více než jeden zdroj napájení (RTCA 1975).



Obrázek 29: Průběh zkoušky krátkodobého přerušení dodávky podle normy RTCA DO-160g

Výsledky: Jedná se o zařízení kategorie B, to znamená, že přerušení dodávky je pouze na 100ms. To ovšem přináší jiné problémy, převážně pro časovací obvody a paměti. V návrhu zdroje je zpožďovací element (monostabilní 555 integrovaný obvod), který zajišťuje po prvních přibližně 500ms zvýšení proudu na spínací úroveň. Problémem by se tak mohlo stát to, že při přerušování dodávky (viz. Obrázek 29) na takto krátkou dobu by nemuselo stačit na resetování časování. Tento problém byl vyřešen, časovací obvod se vypíná dříve nežli samotný regulátor. To lze pozorovat na grafu 26, kde se proud sníží na udržovací téměř před vypnutím i přes to, že neuplynulo 500ms od spuštění. Při dalším spuštění je zdroj znovu nastaven na spínací proud. Díky tomu ventil snadno sepne a může pokračovat ve své funkci.



Graf 26: Vstupní a výstupní napětí při testu krátkodobého přerušení dodávky proudu

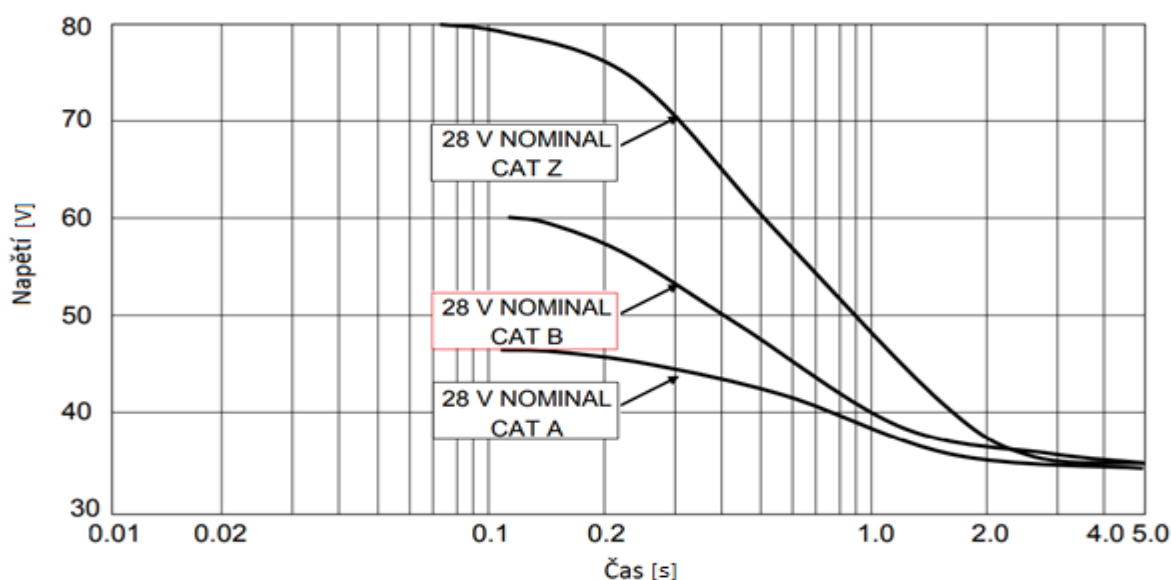
Proud po ustálení na pokojovou teplotu: 351,0 mA

Závěr: Vyhovělo v kategorii B

4.3.5.2 Napět'ová špička

Napět'ová špička je odchylka od kontrolované úrovně ustáleného stavu. Za následek ji má vlastní regulace systému elektrického napájení v reakci na výkyvy, které jsou způsobeny běžnými operacemi systému, jako je spínání zátěže a následná nápravná opatření regulátoru (Lin 2018).

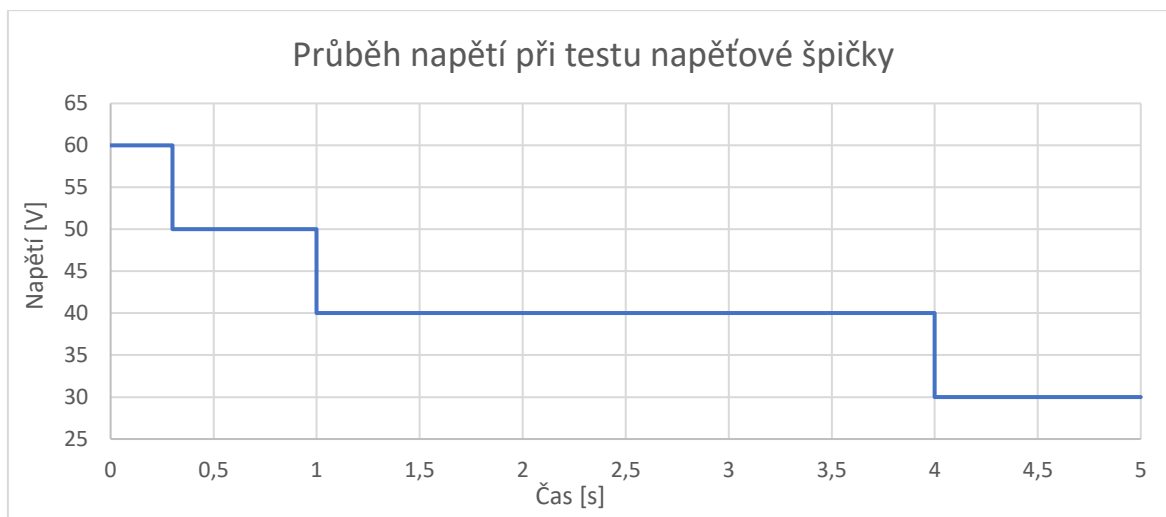
Jedná se o zařízení kategorie B. Normou požadovaný průběh napětí je na grafu 27. Maximální napětí během testu je 60 V. Ochranný prvek je nastaven na hladinu 39 V. Tato hodnota byla zvolena na základě maximálního povoleného vstupního napětí měniče LM2598, které je 40 V (Incorporated 2016).



Graf 27: Průběh napětí během zkoušky napět'ové špičky podle normy RTCA DO-160g

Provedení: Se zařízením dostupným pro tento test nebylo možné přesně replikovat požadovanou křivku napětí v čase jako na grafu 27. Problém byl vyřešen vytvořením jednotlivých kroků tak, aby vždy bylo napětí srovnatelné nebo větší než požaduje norma. (viz. Graf 28)

Tuto úpravu by bylo nutné konzultovat se zkušebním technikem zkušebního ústavu. Je povoleno překonávat zadané hodnoty, přesto není jisté, zda je průběh z grafu 28 akceptovatelný.



Graf 28: Náhradní průběh napětí při testu napětové špičky

Cílem této zkoušky je hlavně odolnost zařízení, ale v případě bezpečnostního vybavení je nutné také uvést další vlastnosti jako je v tomto případě rozepnutí ventilu po dobu přepětí. Transil, ochranný prvek, zkratuje vstup zdroje při překročení určitého napětí a neuzavře se, dokud napětí neklesne pod tuto hodnotu. Po tuto dobu zařízení neplní svojí funkci.

Proud po ustálení na pokojovou teplotu: 351,4 mA

Závěr: Vyhovělo v kategorii B s připomínkou

4.3.5.3 Napětový úbytek při startu motoru

Tento požadavek platí pro zařízení kategorie B, která jsou připojena k baterii. Při startu je možný pokles napětí až na úroveň 10 V, to může nastat pouze po dobu menší než 35 sekund (RTCA 1975).

Provedení: Zařízení napájenému jmenovitým napětím (28 V DC) se skokově sníží vstupní napětí na 10 V DC, následně se zvyšuje o 0,3 V za sekundu po dobu 35 sekund. Během tohoto testu může výkon zařízení klesnout na úroveň specifikovanou konstruktérem, to však musí být uvedeno v protokolu o provedení zkoušky.

Výsledky: Zařízení dokáže v režimu 350 mA pracovat při vstupním napětí 10 V bez omezení po neomezenou dobu.

Závěr: Vyhovělo v kategorii B

4.3.5.4 Požadavky na náběhový proud

Energeticky náročná zařízení nesmí narušovat chod ostatních zařízení. Zvláště při náběhu mohou některá zařízení až několikanásobně zvýšit proud, který potřebují. To má za následek napěťový úbytek palubní sítě. Tento úbytek nesmí ohrozit provoz letadla (RTCA 1975).

Při náhlém použití jmenovitého vstupního napětí (28 V DC) musí být spínací proud nižší než:

- 9násobek maximálního ustáleného zatížení po dobu prvních 3,0 milisekund
- 4násobek maximálního ustáleného zatížení až do 500 ms
- 2násobek maximálního ustáleného zatížení do 2 sekund a poté nominální.

Provedení: Testované zařízení po prvních přibližně 500 ms produkuje zvýšený proud tak, aby ventil spínal v určených parametrech. Je tak nutné pro tento časový úsek použít konstantu. Ta je poměrem proudu spínacího a nominálního přes daný časový úsek. Tak lze odhadnout násobek nominálního proudu.

Časový úsek [ms]	Průměr proudu [mA]	Přepočítaný průměr proudu [mA]	Násobek nominálního proudu	Povolený násobek
0-3	1212,72	487,88	4,57	9
3-500	661,25	266,02	2,49	4
500-2000	115,35	115,35	1,08	2
2000+	106,81	106,81	1	1

Tabulka 9: Zkouška náběhového proudu

Výsledky: Zařízení pracuje v rámci požadavků. (viz. Tabulka 9) To, že byl učiněn přepočet je nutné uvést do protokolu a měření je možné uznat pouze pokud zároveň vyhovělo v testu zvlnění vstupního proudu.

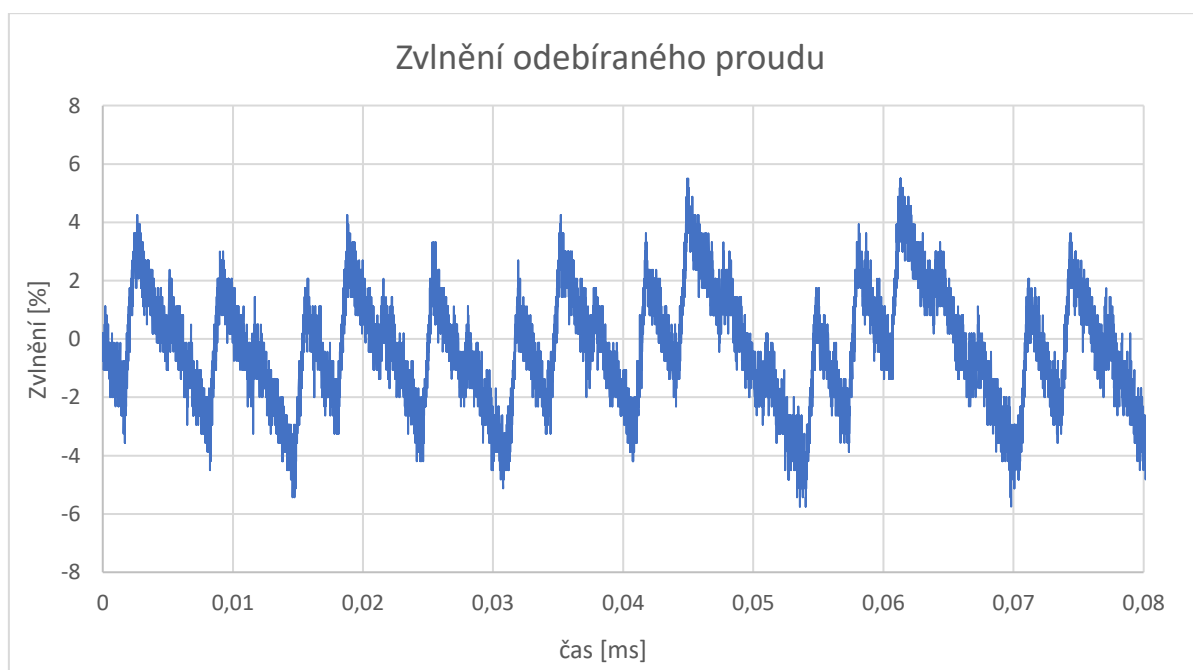
Závěr: Vyhovělo v kategorii B

4.3.5.5 Zvlnění vstupního proudu

Zvlnění proudu je cyklická variace, náhodná variace nebo obojí, oproti střední úrovni stejnosměrného proudu, který se může objevit během provozu zařízení v ustáleném stavu. Jakékoliv vybavení, které nemá stálou hodnotu zátěžového proudu potenciálně přispívá ke zvlnění stejnosměrného napětí v celé síti. (Lowe 2017)

Pro zařízení, která odebírají celkový výkon do 1 kW, špičková hodnota zvlnění proudu jednotlivého zařízení nesmí překročit 14 % ustáleného stejnosměrného zatížení. Pro zařízení stejného typu, které odebírá celkový výkon větší než 1 kW, maximální hodnota zvlnění proudu jednotlivého zařízení nesmí překročit 7 % ustáleného zatížení. (RTCA 1975)

Provedení: Mezi zdroj, který simuluje palubní síť a zdroj pro ventil, byl umístěn 1 Ω odpor. Na tomto odporu bylo snímáno napětí. U odporu platí podle rovnice 1, že napětí je přímo úměrné proudu. Zvlnění bylo změřeno a jeho zjištěna průměrná hodnota na delším časovém úseku. Část toho úseku byla vynesena do grafu 29.



Graf 29: Zvlnění odebíraného proudu z palubní sítě

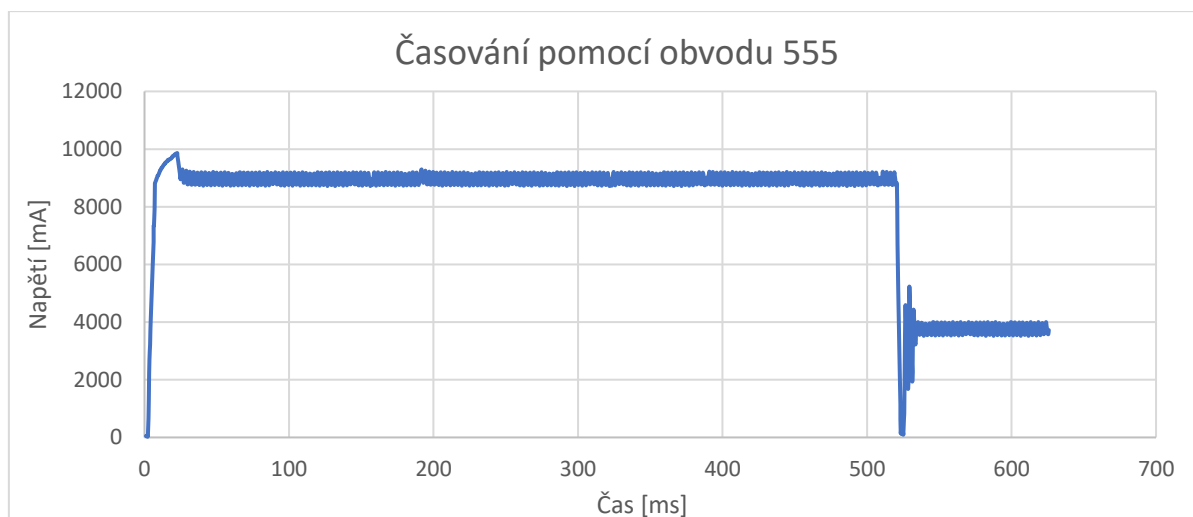
Výsledky: Testované zařízení i v nejhorším případě potřebuje pouze jednotky Wattů. Spínání ventilu na takto vysoké frekvenci nedokáže v zatížené palubní síti způsobit znatelné zvlnění. V tomto případě byl zdroj jediná zátěž na síti, tak se může zdát, že zvlnění je nezanedbatelné.

V případě připojení více zařízení je ovšem toto zvlnění téměř nezatelné. Odebíraný výkon ze sítě kolísá pouze o desetiny wattu, v nejhorším případě pouze v porovnání s vlastním odběrem je tato hodnota znatelně vysoká.

4.4 Ověření modelu časování zdroje

V kapitole 4.1.3 byla provedena simulace monostabilního zapojení obvodu 555. Tato zkouška má za cíl ověřit funkčnost tohoto obvodu. Požadovanou hodnotou je zpoždění 500 ms po dosažení proudu 850 mA. Hodnota odporů a kondenzátorů byla vypočtena pomocí rovnice 15.

Provedení: Měření bylo provedeno osciloskopem Owon XDS3202A (viz. Kapitola 4.3.4) a výsledná křivka zanesena do grafu 30.

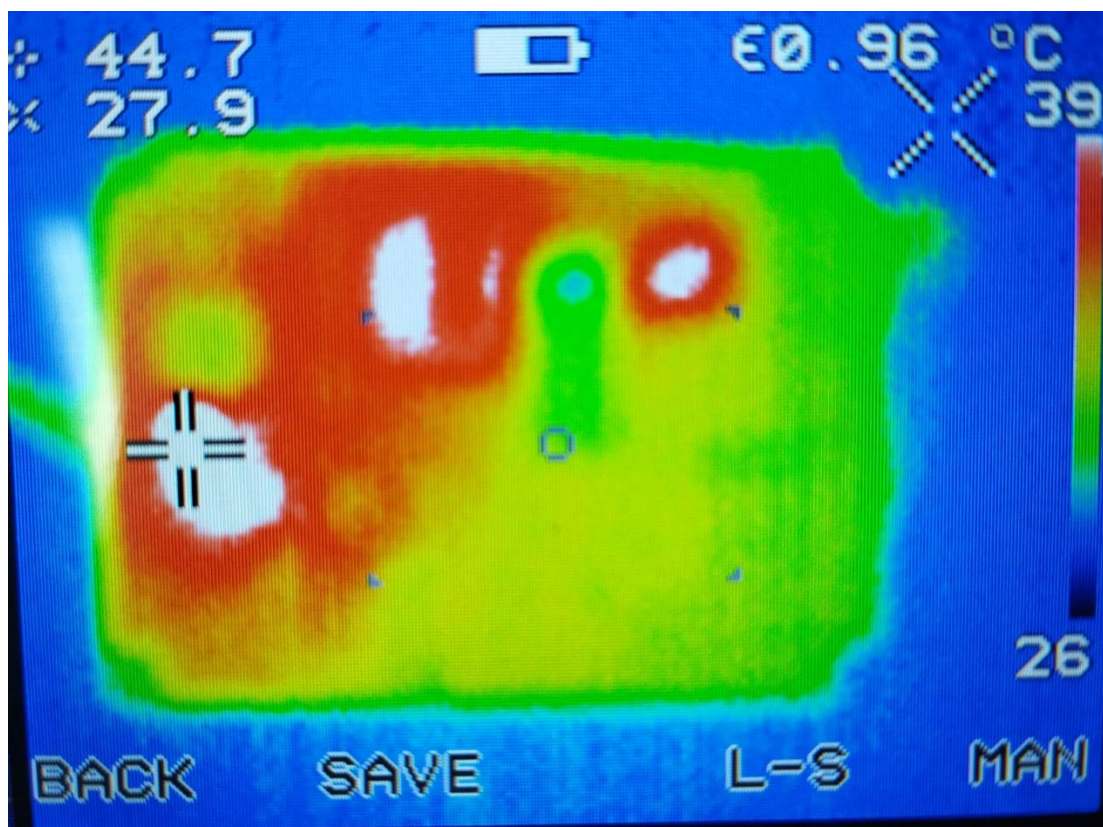


Graf 30: Záznam průběhu napětí v čase

Výsledek: Hodnota času, po který je zdroj v režimu 870 mA je 512,6 ms. To je dáno tím, že ve schématu (viz. Obrázek 24) je jako odpor R_1 zvolena hodnota 970 k Ω . V realitě je nutné spokojit se s odporem s nejbližší hodnotou v tomto případě 1 M Ω . Tato změna oproti simulaci způsobila lehké prodloužení času, po který zdroj dodává 870 mA. Ovšem tato hodnota je v rámci tolerance. Simulaci tak lze považovat za validní.

4.5 Ověření modelu zahřívání elektroniky

Ověření modelu zahřívání elektroniky bylo provedeno pomocí termokamery IRI 4010 od firmy Irisys. Termokamera není kalibrována, přesto výrobce garantuje přesnost $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obrázek 30: Výstup z termokamery

Test byl proveden v místnosti s mnoha zařízeními, proto byla vysoká okolní teplota. Podle termokamery měl stůl v místnosti $28\text{ }^{\circ}\text{C}$. Reálná teplota určená pomocí rtuťového teploměru byla na rozmezí $26,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Podle toho lze odhadnout chybu termokamery jako $+1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po odečtení této chyby byla výsledná nejvyšší teplota na desce plošných spojů $43,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ při okolní teplotě $26,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výsledek simulace byl $41\text{ }^{\circ}\text{C}$ při okolní teplotě $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. (viz. Kapitola 4.1.5)

4.6 Ověření modelu solenoidu

Poslední nutnou zkouškou je ověření sil při použití specifického zdroje a solenoidu. V kapitole 4.1.4 byla provedena simulace. Tato simulace ale obsahuje pouze sílu produkovanou solenoidem, nikoli parazitní vlivy jako tření, opor pružin a tak dále.

Z tohoto důvodu bylo provedeno měření sil solenoidu s pomocí testovacího zařízení (viz. Příloha 8) sestrojeného pro tyto účely. Jedná se o zařízení vytvořené přímo ve firmě pro tento účel. Snímání polohy šoupátka je velmi přesné, s přesností na $\pm 0,01$ mm, snímání síly probíhá s přesností 0,1 N.

	Simulace		Měření	
Proud [mA]	870	350	870	350
Síla v poloze zavřeno [N]	79,96	60,36	56,1	28,2
Síla v poloze otevřeno [N]	55,12	25,83	22,8	5,2

Tabulka 11: Porovnání simulovaných a naměřených hodnot

Porovnání hodnot simulovaných a naměřených v tabulce 11 dokazuje, že v simulaci, která má být validní, je nutné započítat co nejvíce možných vlivů. Co se týče přesnosti simulace samotné, ta není až tak důležitá. V tomto případě se jedná o odrazový můstek.

5. Diskuse

Cílem práce bylo vytvořit Zdroj proudu pro solenoidový ventil. Tento zdroj měl být modulární (viz. Obrázek 1). To má jisté výhody probrané v kapitole 1.1.1 a její podkapitole 1.1.1.1. Základní postup při vývoji byl popsán v kapitole 1.2, kde je specifikovaný postup při vývoji zařízení a jeho testování (viz. Tabulka 1).

Teoretická část se zabývá zdroji proudu, porovnáním ideálního zdroje proudu, jak je vyobrazen na obrázku 2, a rozdíly oproti reálnému zdroji proudu v kapitole 2.1.2. Dále byly popsány různé konstrukční možnosti pro zdroje proudu. Na obrázcích 3,4,7 a 8 jsou elektrická schémata a výsledky simulací na nich založených. Dále je probrána indukční zátěž a její dopad na průběh proudu a napětí (viz. Graf 1). V neposlední řadě je v kapitole 2.2.1 popsán princip fungování solenoidu a na obrázku 9 je vyobrazeno jeho rovnoměrné magnetické pole.

Další částí teoretického úvodu byla otázka časování zdroje probraná v kapitole 2.3, kde je uvedeno několik možností časování a jejich výhody a nevýhody. Na obrázcích 10 a 11 jsou vyobrazeny různé možnosti časování.

Poslední částí teorie byl software. Za prvé simulační v podkapitolách sekce 2.4 byl popsán software využitý při návrhu zdroje. Jak na elektrické simulace, tak na simulaci síly při dodáváním proudu. Na obrázcích 12,13 a 14 lze pozorovat prostředí jednotlivých programů. Dále byl popsán software pro návrh výsledného zařízení. Nejdůležitější pro tento návrh EAGLE je popsán v kapitole 2.5.1. V tomto programu probíhal návrh všech plošných spojů.

Třetí kapitola se zabývá samotným návrhem. V kapitole 3.1 jsou v tabulkách 2 a 3 popsány základní vlastnosti solenoidu a požadované vlastnosti zdroje. Ideální průběh proudu je vyobrazen v grafu 2. Specifikace stavů palubní sítě podle normy RTCA DO-160g je uvedena v tabulce 4.

Kapitola 3.2 se zabývá vývojem prototypu založeného na DC-DC měniči LM5117. Podkapitoly této sekce jsou věnovány různým prvkům návrhu. Například nastavení frekvence spínání podle vzorce 17 a určení maximálního pracovního cyklu s pomocí grafu 3. Dále byly provedeny simulace funkcí soft-start a hiccup. Výsledky simulací lze vyčíst z grafů 4 a 5.

Měnič LM5117 je sám o sobě zdrojem napětí, proto se v kapitole 3.2.6 nachází obrázky 19 a 20. Na obrázku 19 je vyobrazeno standardní zapojení a na obrázku 20 je zapojení vhodné pro zdroj proudu.

Kapitola 3.3 se zabývá nedostatkem elektrických komponent v letech 2020-2022 a odkazuje na důvody proč musel být zvolen jiný měnič jako základ prototypu. Tato nepříjemnost způsobila zpoždění při vývoji.

Naštěstí byl zvolený měnič LM2598 (viz. Obrázek 21) nejen dostupný, ale i podobný měniči LM5117. To znamená, že například časovací a zesilovací obvody mohly být s minimální úpravou využity i pro druhý prototyp.

Dále byly provedeny simulace na základě elektrických schémat na obrázcích 22 a 23. Výsledný průběh proudu byl zanesen do grafů 6 a 7. Simulace zpožďovacího obvodu na základě integrovaného obvodu 555 byla provedena v programu LTspice. Ten, na rozdíl od programu TINA, má již v základu součástku SE555. Výsledkem simulace je graf 8. Simulace sil v solenoidu byla provedena pouze orientačně pro určení, zda jsou zvolené proudy adekvátní. Výsledné hodnoty jsou zaneseny do tabulky 5. Simulace zahřívání elektroniky provedená v programu Fusion 360 ukázala, že nehrozí přehřívání za standardních podmínek (viz. Obrázek 25).

U obou prototypů byly provedeny základní zkoušky jako účinnost a doba spínání. Výsledné hodnoty účinností jsou zaneseny do grafů 9 a 10.

Ke zkouškám podle normy RTCA DO-160g postoupil pouze zdroj založený na LM2598. V tuto dobu byl dostupný pouze jeden funkční měnič LM5117 a u zkoušek hrozí možnost fatálního poškození. To by mohlo způsobit zastavení práce na projektu.

Teplotní zkoušky probíhaly s pomocí zařízení popsaného v kapitole 4.2.1.2. podle průběhů požadovaných normou (viz. Grafy 14,15,18 a 19). Hodnoty požadované normou (-40 až 85 °C) byly překonány při všech testech (-50 až 125 °C). Výsledné průběhy teplot byly zaneseny do grafů 12 a 16. Průběhy proudu v závislosti na teplotě jsou v grafech 13 a 17. Zařízení splnilo zkoušku nad očekávání. Byla zde možnost selhání způsobená bodovým

zahříváním Zenerovo diody, přesto však zařízení splnilo zkoušky bez poškození. Jedinou výhradou bylo spálené residuum po zkoušce vysoké teploty (viz. Obrázek 26). To ovšem bylo způsobeno výrobním postupem.

Zkouška dekomprese v kapitole 4.2.1.7 neprobíhala podle požadavků normy (viz. Graf 19) Proto jí nelze považovat za úspěšnou. Přesto dokázala, že zařízení zvládne dekompresi. Ovšem není ověřena schopnost chlazení při sníženém tlaku. Z tohoto důvodu bude zkouška opakována.

Zkouška magnetických vlivů byla provedena podle schématu z normy RTCA DO-160g na obrázku 27. Zařízení byla určena kategorie A na základě tabulky 6. Nad rámec normy byla provedena měření i pro odchylky větší než 1° a výsledná data byla vynesena do grafu 20.

Zkouška odolnosti proti elektrostatickému výboji podle obrázku 28 byla provedena na neadekvátním zařízení. Tato zkouška se obvykle neprovádí lokálně, ale v testovacím ústavu, kde lze ověřit, že podmínky splňovaly zadání. Přesto se podařilo zjistit, že v případě výboje do kontaktů je ochranný prvek účinný.

Zkoušky audio-frekvenčního rušení byly provedeny nad rámec normy. Standardně se ruší na nominálním napětí tedy při napětí 28 V. Zkoušky byly provedeny při napětí 12 V. Způsobilo to větší zákmity a bylo tak snazší sledovat zvlnění výstupního napětí. Graf 21 porovnává vstupní napětí s výstupním. Na grafu 22 je přiblíženo napětí výstupní. Výsledky pro další způsoby a frekvence rušení jsou zaneseny do tabulek 7 a 8. Na konec této kapitoly byly vloženy zajímavé průběhy výstupního napětí. Graf 24 při rušení bílým šumem a graf 25 při rušení pomocí obdélníkového průběhu. Tato zkouška je považována za úspěšnou, zařízení splnilo a překonalo očekávání.

Zkouška krátkodobého přerušení dodávky proběhla podle obrázku 29 bez problémů. Zařízení se za 100ms stihne resetovat a při dalším spuštění opět dodává spínací proud 870 mA (viz. Graf 26).

Zkouška napěťové špičky byla provedena s pozměněným průběhem oproti grafu 27 z normy byla provedena podle grafu 28. Přesto, že hodnoty po celou dobu testu překračují

hodnoty požadované normou není jisté, zda lze tuto zkoušku považovat za úspěšnou. Zařízení ovšem zkoušku přežilo. To značí, že byla zvolena vhodná ochrana.

Povolený napět'ový úbytek při startu (viz. Kapitola 4.2.5.3) může snížit napětí v síti až na hranici 10 V po krátkou dobu. Zařízení ovšem dokáže alespoň v režimu 350 mA pracovat při napětí 10 V bez omezení.

Pro zkoušku náběhového proudu bylo nutné použít přepočet na průměrnou hodnotu proudu v daném čase, test celkově trvá 2000 ms. Ovšem přibližně 500ms pracuje v režimu 870 mA a dále v režimu 350 mA. Výsledné hodnoty jsou v tabulce 9. Tento test lze považovat za úspěšný, protože byl splněn i následující test zvlnění odebíraného proudu.

Test zvlnění odebíraného proudu ukázal, že vstupní filtr bude potřebovat doladit, přesto je však zvlnění, jak lze pozorovat na grafu 29, v rámci požadavků normy. Zkoušku lze tedy považovat za úspěšnou.

Nakonec bylo nutné ověřit, že předpoklady poskytnuté simulacemi se alespoň přibližují realitě. Jako první bylo provedeno ověření simulace integrovaného obvodu 555 provedené v kapitole 4.1.3. Výsledná hodnota zpoždění odečtená z grafu 30 je vyšší, ale v normě. Ověření modelu zahřívání elektroniky bylo provedeno pomocí termokamery. Výstup je na obrázku 30. Termokamera se nezdála velmi přesná, přesto umožnila určit místa nejvyššího zahřívání a ty jsou téměř shodná se simulací (viz. Obrázek 25).

Poslední ověření se zabývalo silou produkovanou ventilem při použití vyvinutého zdroje. V tabulce 10 jsou uvedeny hodnoty jak z měření, tak ze simulací. Model bez započítání parazitních vlivů nebyl přesný.

6. Závěr

Cílem práce bylo navrhnout, sestavit a otestovat zdroj proudu pro solenoidový ventil. V rámci tohoto procesu jsem s pomocí produktových listů navrhnul dva různé zdroje proudu. Následně jsem provedl simulace obou návrhů v programu TINA. To mi umožnilo optimalizovat návrhy. Klíčové parametry, pro které jsem zdroje optimalizoval byly: Teplotní stabilita, proudová stabilita, modulárnost a miniaturizace.

Dále jsem v programu EAGLE vytvořil návrhy desek plošných spojů a poté jsem sestavil prototypy. Později jsem provedl základní testy, jako určení účinnosti. Pro další zkoušky jsem zvolil návrh na základě LM2598. Tento měnič pracuje na nižší frekvenci a má menší účinnost než LM5117, který byl však poslední rok a půl nedostupný. Potom, co jsem při měření osciloskopem poškodil jeden z prototypů na bázi LM5117. Nezbylo než pokračovat s LM2598.

Zkoušky ukázaly, že cíle práce jsem převážně splnil. Teplotní zkoušky prokázaly, že testovaný zdroj měl velmi dobrou teplotní stabilitu. Přesto, že výstupní proud je v rámci zadání, odebíraný proud je už méně stabilní. Stále splňuje normu, ale věřím, že úpravou vstupního filtru jej bude možné stabilizovat více. Zdroj lze použít modulárně. Zkoušky dokázaly, že jej lze bezpečně připojit přímo k palubní síti.

Cílem, který nebyl zatím splněn je požadavek na miniaturizaci. První prototyp jsem sestavil velmi malý, ale měl jsem problémy při měření. Jednotlivé dráhy na tištěném spoji byly velmi blízko. Z tohoto důvodu byl jeden prototyp poškozen zkratem. Druhý návrh byl tedy navrhnout tak, aby bylo možné provádět měření.

Nakonec jsem provedl ověření některých simulací. Simulace zpoždění a zahřívání elektroniky byly velmi přesné. Simulace síly, kterou působí ventil byla nepřesná. To jsem ovšem očekával.

Do budoucna by bylo vhodné upravit vstupní LC filtr, přesto že zvlnění odebíraného proudu splňuje požadavky normy, věřím že je zde možnost zdroj vylepšit.

Dále bych rád provedl mechanické testy, například vibrační test, případně test odolnosti proti prachu a písku. Ovšem pro tyto zkoušky musí být provedeny na zařízení založeném na finální desce plošných spojů a součástky musí být připájeny metodou, která bude využita pro finální produkt.

Seznam příloh:

Příloha 1: Schéma elektrického zapojení s měničem LM5117

Příloha 2: Návrh desky plošných spojů pro měnič LM5117

Příloha 3: Schéma elektrického zapojení s měničem LM2598

Příloha 4: Návrh desky plošných spojů pro měnič LM2598

Příloha 5: Příklad kalibračního protokolu (multimetr Fluke 287)

Příloha 6: Foto zdroje v teplotní komoře.

Příloha 7: Příklad výstupu z osciloskopu.

Příloha 8: Foto zařízení pro testování síly solenoidu.

Příloha 9: Foto prototypu s LM5117 po všech úpravách provedených během vývoje

Příloha 10: Foto prototypu s LM2598 po všech úpravách provedených během vývoje

Reference:

ALEXANDER KREJCIRIK, 1999. *Zdroje proudu*. ISBN 80-86056-84-8.

ALTIPARMAK, Sadettin Cem a Bowen XIAO, 2021. *A market assessment of additive manufacturing potential for the aerospace industry* [online]. 2021. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2021.05.072

ANALOG DEVICES, 2018. LTspice Users Manual.

DAVID MEEKER, 2015. Finite Element Method Magnetics Manual.

EWELINA WOZNIAK-SZPAKIEWICZ a SHOULIANG ZHAO, 2018. Modular construction industry growth and its impact on the built environment. *Technical Transactions* [online]. **12**. ISSN 00114561. Dostupné z: doi:10.4467/2353737xct.18.178.9666

CHAUDHARI, A.J. a R.B. WAGHULADE, 2018. Simulation of Phase Meter using TINA Software. *Momona Journal of Science* [online]. **10**(1). ISSN 2073-073X.

INCORPORATED, Texas Instruments, 2016. LM2598 SIMPLE SWITCHER Power Converter 150-kHz 1-A Step-Down Voltage Regulator, With Features.

INCORPORATED, Texas Instruments, 2018. How to Design a Simple Constant Current/Constant Voltage Buck Converter. *Texas Instruments Incorporated, Application Report, SNVA829*. (June).

LIN, Jiaming, 2018. Study on step-down DC switching power supply. In: *2017 International Conference on Computer Systems, Electronics and Control, ICCSEC 2017* [online]. Dostupné z: doi:10.1109/ICCSEC.2017.8447013

FROHN M., OBERTHÜR W., 2006 *Elektronika – polovodičové součástky a základní zapojení*. Praha: BEN - technická literatura. ISBN 80-7300-123-3.

LOWE, Doug, 2017. *Electronics All-in-One For Dummies*. ISBN 978-1-119-32079-1.

MATRIC GROUP, 2022. *ELECTRONIC COMPONENT SHORTAGES UPDATE -- 2022 AND BEYOND*.

MENG, Fei, Huiyan CHEN, Hao LIU, Bing HAN a Xingfu NIE, 2015. The optimisation of a proportional solenoid valve design for heavy vehicle active suspension system. *International*

Journal of Vehicle Design [online]. **68**(1–3). ISSN 01433369. Dostupné z: doi:10.1504/IJVD.2015.071073

PROF. ING. KAMIL VRBA a ING. PAVEL BUCHMAIER, 1999. Vlastnosti bipolárních proudových zrcadel.

RTCA, 1975. *Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment*, revize g z roku 2014.

SAM SATTEL, 2017. Linear Regulated vs. Switch Mode Power Supply.

WANG, Bo, Ping JIANG a Bo GUO, 2022. Reliability Evaluation of Aerospace Valves Based on Multi-source Information Fusion. *Binggong Xuebao/Acta Armamentarii* [online]. **43**(1). ISSN 10001093. Dostupné z: doi:10.3969/j.issn.1000-1093.2022.01.022

Převzaté obrázky:

Obrázek 5: *Zapojení diferenciálního zesilovače*. Převzato z článku firmy Maxim Integrated o operačních zesilovačích.

Obrázek 6: *Zapojení neinvertujícího zesilovače*. Převzato z článku firmy Maxim Integrated o operačních zesilovačích.

Obrázek 9: *Rovnoměrné magnetické pole solenoidu*. Převzato od uživatele Geek3, který svoje dílo zveřejnil.

Obrázek 17: *Nastavení minimálního napětí pro provoz LM5117*. Převzato z produktového listu LM5117.

Obrázek 18: *Schematické znázornění funkce HICCUP*. Převzato z produktového listu LM5117.

Obrázek 19: *Standartní zapojení zpětné vazby*. Upravená verze obrázku z produktového listu LM5117.

Obrázek 21: *Typické zapojení měniče LM2598*. Převzato z produktového listu LM2598.

Obrázek 27: *Zkušební zařízení pro test magnetických vlivů podle normy RTCA DO-160g*. Přeložená verze obrázku z normy RTCA DO-160g.

Obrázek 28: *Zapojení pro zkoušku odolnosti proti elektrostatickému výboji*. Přeložená verze obrázku z normy RTCA DO-160g.

Obrázek 29: *Průběh zkoušky krátkodobého přerušení dodávky podle normy RTCA DO-160g*. Přeložená verze obrázku z normy RTCA DO-160g.

Převzaté grafy:

Graf 3: *Závislost maximálního pracovního cyklu na frekvenci.* Převzato z normy RTCA DO-160g.

Graf 11: *Průběh zkoušky dlouhodobé nízké operační teploty podle RTCA DO-160g.* Přeložená verze grafu z normy RTCA DO-160g.

Graf 14: *Průběh zkoušky dlouhodobé nízké operační teploty podle RTCA DO-160g.* Přeložená verze grafu z normy RTCA DO-160g.

Graf 15: *Průběh zkoušky dlouhodobé vysoké operační teploty podle RTCA DO-160g.* Přeložená verze grafu z normy RTCA DO-160g.

Graf 18: *Průběh zkoušky krátkodobě vysoké operační teploty podle normy RTCA DO-160g.* Přeložená verze grafu z normy RTCA DO-160g.

Graf 19: *Průběh tlaku během zkoušky dekomprese podle normy RTCA DO-160g.* Přeložená verze grafu z normy RTCA DO-160g.

Graf 27: *Průběh napětí během zkoušky napěťové špičky podle normy RTCA DO-160g.* Přeložená verze grafu z normy RTCA DO-160g.