



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY**

**A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY**

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## **NÁVRH ČÍSLICOVĚ ŘÍZENÉHO SPÍNANÉHO NAPÁJECÍHO ZDROJE PRO SYSTÉM POZIČNÍCH SVĚTEL LETADLA S LED TECHNOLOGIÍ**

DESIGN OF DIGITALLY CONTROLLED SWITCHING POWER SUPPLY FOR AIRCRAFT POSITION LIGHT  
SYSTEM WITH LED TECHNOLOGY

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Lukáš Mlčoch**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**prof. Ing. Jan Leuchter, Ph.D.**

**BRNO 2024**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

**Student:** Lukáš Mičoch

**ID:** 240862

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2023/24

**NÁZEV TÉMATU:**

## Návrh číslicově řízeného spínaného napájecího zdroje pro systém pozičních světel letadla s LED technologií

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Cílem práce je obvodový návrh spínaného proudového zdroje pro napájení systému pozičních světel letadla s výkonovými LED. Je třeba navrhnout obvodová řešení proudového zdroje, který bude umět připojení k proměnlivému stejnosměrnému zdroji napětí pro systém pozičních světel letadla.

1. Prostudovat dostupnou literaturu týkající se LED, spínaných napájecích zdrojů a použití světlotekniky na palubě letadla;
2. Navrhněte koncepci napájení LED využívající komerčně dostupné budiče LED napájené z DC palubní sítě;
3. Proveďte ověřovací měření a zhodnoťte dosažené výsledky s ohledem na požadavky leteckých norem.
4. Navrhněte možné další změny topologie napájecího zdroje.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

MOHAN, Ned. Electric power systems: a first course. Hoboken, N.J.: John Wiley, c2012. ISBN 9781118074794.

LENK, Ron a Carol LENK. Practical lighting design with LEDs. Piscataway, NJ: IEEE Press, [2011], ©2011. ISBN 9780470612798.

EISMIN, Thomas K. Aircraft electricity and electronics. Sixth edition. New York: McGraw-Hill Education, [2014]. ISBN 007179915X.

**Termín zadání:** 5.2.2024

**Termín odevzdání:** 30.5.2024

**Vedoucí práce:** prof. Ing. Jan Leuchter, Ph.D.

**doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

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

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se v úvodu uvádí problematiku pozičních světel, a především pak jejich způsoby napájení. Pak je proveden krátký rozbor spínaných zdrojů. Kde bude čtenář seznámen s režimy fungování zdrojů (CCM a DCM). Pak je krátce uvedeno pár základních topologií, ze kterých následně tři budou vybrány pro návrh a další zpracování. Nakonec je proveden návrh řešení k předloženému problému v podobě dvou spínaných zdrojů s různými topologiemi. Po návrhu proběhlo řešení, kde byly navrženy jednotlivá schémata a obvody, které byly sestaveny a provedeno na nich základní měření pro ověření funkčnosti.

## **Klíčová slova**

SEPIC, BUCK, MPLAB, PIC, spínané zdroje, napájení LED

## **Abstract**

In the beginning, this bachelor thesis introduces the issues of position lights, and above all, their power supply methods. Then a short analysis of switching sources is made. Where the reader will be introduced to the operating modes of resources (CCM and DCM). Then a few basic topologies are briefly presented, from which three will be selected for design and further processing. Finally, a proposal for a solution to the presented problem is made in the form of two switching sources with different topologies. After the design, a solution took place, where individual schemes and circuits were designed, which were assembled, and basic measurements were carried out on them to verify functionality.

## **Keywords**

SEPIC, BUCK, MPLAB, PIC, switching power supplies, LED power supply

## **Bibliografická citace**

MLČOCH, Lukáš. *Návrh číslicově řízeného spínaného napájecího zdroje pro systém pozičních světel letadla s LED technologií*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/160217>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Jan Leuchter.

# Prohlášení autora o původnosti díla

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| <b>Jméno a příjmení studenta:</b> | <i>Mlčoch Lukáš</i>  |
| <b>VUT ID studenta:</b>           | 240862   |
| <b>Typ práce:</b>                 | <i>Bakalářská práce</i>  |
| <b>Akademický rok:</b>            | 2023/2024  |
| <b>Téma závěrečné práce:</b>      | Návrh číslicově řízeného spínaného napájecího zdroje pro systém pozičních světel letadla s LED technologií |

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 30. května 2024

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Janu Leuchterovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 30. května 2024

-----  
podpis autora

# Obsah

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. TEORETICKÝ ROZBOR.....</b>                                     | <b>12</b> |
| 1.1 ÚVOD DO OSVĚTLENÍ LETADEL.....                                   | 12        |
| 1.1.1 Často používané technologie .....                              | 12        |
| 1.1.2 Různé typy světel.....   | 14        |
| 1.1.3 Připojení do elektrické sítě letadla .....                     | 16        |
| 1.2 MĚNIČE .....   | 17        |
| 1.2.1 Spínané zdroje.....  | 18        |
| 1.2.2 Topologie spínaných zdrojů.....                                | 19        |
| 1.2.3 Shrnutí základních vlastností topologií a volba topologií..... | 24        |
| <b>2. ANALÝZA PARAMETRŮ POTŘEBNÝCH K NÁVRHU.....</b>                 | <b>25</b> |
| 2.1 VYBRANÁ SVĚTLA.....  | 25        |
| 2.2 NORMA KE ZDROJŮM.....  | 26        |
| 2.3 CÍLOVÁ ELEKTRICKÁ SÍŤ .....                                      | 27        |
| <b>3. NÁVRH.....</b>   | <b>29</b> |
| 3.1 KONCEPČNÍ NÁVRH NAPÁJENÍ SYSTÉMU POZIČNÍCH SVĚTEL LETADLA .....  | 29        |
| 3.2 NÁVRH ZDROJOVÉ ČÁSTI NAPÁJENÍ POZIČNÍHO SVĚTLA .....             | 30        |
| 3.2.1 Návrh zdroje s topologií BUCK.....                             | 30        |
| 3.2.2 Návrh zdroje s topologií SEPIC.....                            | 33        |
| 3.2.3 Návrh číslicové části zdrojů.....                              | 36        |
| 3.2.4 Návrh zpětné vazby .....                                       | 37        |
| 3.3 NÁVRH CENTRÁLNÍ JEDNOTKY .....                                   | 38        |
| <b>4. REALIZACE .....</b>  | <b>39</b> |
| 4.1 PŘEPĚŤOVÁ OCHRANA.....   | 39        |
| 4.2 REALIZACE ZDROJE S TOPOLOGIÍ BUCK.....                           | 41        |
| 4.3 REALIZACE ZDROJE S TOPOLOGIÍ SEPIC .....                         | 42        |
| 4.4 REALIZACE CENTRÁLNÍ JEDNOTKY.....                                | 42        |
| 4.5 VYTVOŘENÍ PROGRAMŮ .....   | 43        |
| 4.5.1 Program pro centrální jednotku.....                            | 43        |
| 4.5.2 Program pro číslicové části zdrojů .....                       | 44        |
| 4.6 EXPERIMENTÁLNÍ POTVRZENÍ VLASTNOSTÍ MĚNIČŮ .....                 | 45        |
| 4.6.1 Průběhy zdroje BUCK .....                                      | 45        |
| 4.6.2 Průběhy zdroje SEPIC .....                                     | 48        |
| <b>5. ZÁVĚR.....</b>   | <b>50</b> |

# SEZNAM OBRÁZKŮ

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | Typické rozmístění venkovních světel [2] .....  | 14 |
| 1.2  | Ozařovací úhly pozičních světel [2] .....   | 15 |
| 1.3  | Zjednodušené zapojení nových světel v boeing 737 [6].....                               | 16 |
| 1.4  | Diagram rozložení elektrické sítě Cessny 172 .....                                      | 17 |
| 1.5  | Schématické zapojení silové části BOOST spínaného zdroje [8].....                       | 19 |
| 1.6  | Závislost proudu procházejícího induktorem na spínacím signálu (BOOST) .....            | 19 |
| 1.7  | Schématické zapojení silové části BUCK spínaného zdroje [8].....                        | 20 |
| 1.8  | Závislost proudu procházejícího induktorem na spínacím signálu (BUCK) [8] .....         | 20 |
| 1.9  | Schématické zapojení silové části neinvertujícího BUCK/BOOST spínaného zdroje [8] ..... | 21 |
| 1.10 | Schématické zapojení silové části SEPIC spínaného zdroje [8].....                       | 21 |
| 1.11 | Závislost proudu procházejícího induktorem na spínacím signálu (SEPIC) .....            | 22 |
| 1.12 | Schématické zapojení silové části FLYBACK spínaného zdroje [8].....                     | 22 |
| 1.13 | Schématické zapojení silové části FORWARD měniče .....                                  | 23 |
| 1.14 | Schématické zapojení silové části PUSH-PULL měniče [8].....                             | 23 |
| 2.1  | Světlo MiniStrobeNG [13] .....  | 25 |
| 2.2  | Světlo PL14VNG [12].....  | 25 |
| 2.3  | Schématické zobrazení elektrické sítě Cessny 172 .....                                  | 28 |
| 3.1  | Blokové schéma koncepce systému .....   | 29 |
| 3.2  | Ilustrace návrhu uživatelského rozhraní .....   | 29 |
| 3.3  | Navržené blokové schéma zdroje .....  | 30 |
| 3.4  | Schéma použité pro simulaci.....  | 32 |
| 3.5  | Ukázka průběhu řídicích signálů.....  | 32 |
| 3.5  | Výstupní napětí z obvodu na obrázku 3.3 .....   | 33 |
| 3.6  | Schéma k simulaci pro zjištění hodnoty oddělovacího kapacitoru .....                    | 34 |
| 3.8  | Průběh proudu na oddělovacím kondenzátoru .....   | 34 |
| 3.9  | Průběh napětí na oddělovacím kondenzátoru .....   | 35 |
| 3.10 | Schéma k simulaci pro zjištění hodnoty indukance cívek .....                            | 35 |
| 3.11 | Průběh proudu na cívce L1 .....   | 36 |
| 3.12 | Převzaté schéma pro zapojení THVD1420 [21].....   | 36 |
| 3.13 | Schéma zpětné vazby převzaté z části [22] .....   | 37 |
| 3.13 | Blokový diagram centrální jednotky .....  | 38 |
| 4.1  | Schéma přepětové ochrany z PNP tranzistorů [23] .....                                   | 39 |
| 4.2  | Vstupní a výstupní napětí PNP ochrany .....   | 39 |
| 4.3  | Schéma celé přepětové ochrany.....  | 40 |
| 4.4  | Průběh napětí na přepětové ochraně .....  | 40 |
| 4.5  | 3D model zdroje s topologií BUCK .....  | 41 |
| 4.6  | 3D model zdroje se SEPIC topologií.....   | 42 |
| 4.7  | Sestavená centrální jednotka .....  | 43 |
| 4.8  | Blokový diagram programu pro centrální jednotku .....                                   | 43 |
| 4.9  | Blokový diagram programu pro zdroje .....   | 44 |
| 4.10 | Průběh vstupního a výstupního napětí BUCKU.....   | 45 |
| 4.11 | Přiblížený VF šum na vstupu i výstupu zdroje BUCK.....                                  | 45 |
| 4.12 | Detailní pohled na výstupní napětí zdroje BUCK .....                                    | 46 |
| 4.13 | Průběh PWM signálu vystupujících z mikroprocesoru. ....                                 | 46 |
| 4.13 | Průběh PWM signálu vystupujících z mikroprocesoru. ....                                 | 47 |
| 4.13 | Průběh PWM signálu vystupujících z mikroprocesoru. ....                                 | 47 |



|   |    |
|---|----|
| 4.16 Průběh PWM signálu z mikroprocesoru a na bráně tranzistoru ..... | 48 |
| 4.17 Závislost výstupního napětí na vstupním .....                    | 48 |
| 4.18 Detail výstupního napětí SEPIC .....                             | 49 |

## SEZNAM TABULEK

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.1 | Shrnutí vlastnosti jednotlivých topologií [11] .....  | 24 |
| 2.1 | Napájecí parametry pro vybraná světla [12],[13] ..... | 25 |
| 4.1 | Naměřené hodnoty, při nastaveném proudu 50 mA .....   | 49 |
| 4.2 | Naměřené hodnoty, při nastaveném proudu 150 mA .....  | 49 |

# ÚVOD

V této bakalářské práci je nejprve řešena problematika světel využívaných v letectví. Jsou zde uvedeny jednotlivé typy světel a často používané technologie. Následně je proveden krátký rozbor teorie spínaných zdrojů a uvedeno malé množství vybraných topologií. Nakonec první kapitoly jsou tyto topologie shrnuty formou tabulky, obsahující jejich základní vlastnosti, a krátkého textu. Na základě toho jsou pak zvoleny dvě, se kterými je dále pokračováno.

Dále se bakalářská práce zabývá analýzou potřebných parametrů, jako jsou požadované vstupní a výstupní napětí a jejich vlastnosti. Do toho zasahují zvolená světla, elektrická síť, do které by zdroje mohly být montovány a také norma, podle které by zdroje měly být navrhnuty.

Cílem této bakalářské práce je navrhnout číslicově řízený spínaný proudový zdroj pro napájení zvolených světel z elektrické sítě menšího letadla s proměnlivým napětím. Toho bylo dosaženo navržením systému tří zdrojů, a centrální jednotky, která je řídí. To dovoluje nastavení výstupních hodnot zdrojů, a také sledování jejich stavů. Jedná se o především o modelový návrh a hlavním smyslem je navrhnout funkční systém, proto budou vybírány komerčně dostupné součástky, které nutně nemusí splňovat normy pro letectví.

Výše zmíněné cíle byly dosaženy rozdělením řešení na dvě části. Centrální jednotku, která obsahuje uživatelské rozhraní a schopnost komunikovat s jednotlivými zdroji a samotné zdroje, které jsou rozděleny na silovou část, která se skládá z konkrétní zvolené topologie a číslicovou, která se skládá z komunikačního rozhraní pro připojení na sběrnici RS485 a mikroprocesoru, který bude monitorovat výstupní veličiny a podle nich regulovat výstup zdroje a zároveň komunikovat s centrální jednotkou. V tomto systému bude mít každé světlo mít svůj vlastní zdroj, řízený centrální jednotkou, ale schopný samostatné funkce.

Nakonec byly jednotlivé zdroje realizovány a jejich vlastnosti potvrzeny experimentálním měřením. Během ožívování obvodů byly u zdrojů provedeny jisté změny, protože se původní návrh projevil jako nedostatečný. Realizace proběhla v domácích podmínkách, a po sestavení zdrojů byly vytvořeny programy, pro zdroje a centrální jednotku. Program pro zdroje je prakticky stejný, liší se pouze ve spínací frekvenci, která jde změnit na jednom řádku. Po naprogramování bylo pak provedeno měření, bylo zobrazeno několik průběhů, změřena efektivita a pro vybrané paragrafy byly provedeny testy pro soulad. V závěru jsou pak výsledky tohoto měření zhodnoceny.

# 1. TEORETICKÝ ROZBOR

Nezanedbatelnou součástí konstrukce dnešní letadel je osvětlení. Podle umístění se účel světel liší, některá jsou využívána při běžném provozu nebo údržbě, jiná kvůli bezpečnosti pro posádku letadla, na kterém se nachází, nebo i ostatních. Obecně je lze rozdělit do několika kategorií, osvětlení kokpitu, osvětlení kabiny pro pasažéry a osvětlení exteriéru. Podle účelu, který má dané světlo vykonávat se bude lišit jeho konstrukce z pohledu odolnosti, výkonu a osvětlovacího úhlu. Všechna tato světla jsou napájené z elektrické sítě letadla. [2] Vlastnosti elektrické napájecí sítě jsou stanoveny v normě ČSN 2282 [1], která určuje vlastnosti soustavy dodávající elektrickou energii do zařízení na palubě letadel. Norma povoluje dva typy sítí, stejnosměrnou, která se velmi často nachází na menších letadlech jako je třeba Cessna 172, a střídavou, která je typická pro větší letadla jako je třeba Boeing 737. Koncová zařízení jako jsou světla jsou často stavěna a připravena na přímé připojení na konkrétní elektrickou síť, ale existují i světla která vyžadují úpravu této formy energie na určitou hodnotu. K tomuto účelu jsou pak využívány elektrické zdroje, které se připojí na elektrickou síť letadla a na výstupu, kde se připojují světla, už je pracovní napětí světel. Vlastnosti některých takovýchto zdrojů jsou pak stanoveny evropskou normou TSO-C71 pro statické zdroje. [3]

Vzhledem k tomu, že pro úspěšný návrh obvodových řešení spínaných zdrojů je nutné krátké seznámení se teorií zdrojů, ale i krátké seznámení s problematikou osvětlení letadel, bude teoretický rozbor rozdělen na dvě hlavní části, seznámení s problematikou osvětlení a krátkým úvodem do spínaných zdrojů a jejich topologií.

## 1.1 Úvod do osvětlení letadel

Osvětlení nelze u návrhu letadel zanedbat, a to ať už kvůli některým světlům, která jsou povinnou výbavou letadel, nebo příkonu elektrické energie, které mohou dohromady odebírat. Historicky se k osvětlování používalo několik technologií, které byly postupně nahrazovány lepšími. Předmětem této práce návrh spínaných proudových zdrojů pro poziční světla, tak zde budou rozebrány trochu více.

### 1.1.1 Často používané technologie

K osvětlení letadel byly využívány různé technologie s různými principy. Každá technologie má své místo v konkrétní oblasti osvětlení. I když v dnešní době se přechází skoro zcela na osvětlení pomocí LED světel.

**Inkandescentní** světla, nebo žárovky přeměňují elektrickou energii na světelnou pomocí odporového drátu, který se skládá z wolframu a který je umístěn v ochranné atmosféře. Při přiložení napětí na elektrody dochází k průchodu elektronů přes drát, ten tomuto však odporuje a generuje tak teplo, čímž se drát značně zahřívá, zde je právě velmi důležitá teplota tavení wolframu (až 3659 K). Po zahřátí na určitou teplotu začne drát

emitovat záření, které je jen z části ve viditelném spektru. Nevýhodou těchto světél je relativně křehká skleněná konstrukce a velmi nízká efektivita, velké množství dodané energie je spotřebováno na samotné rozežhání, a i po rozežhání je značná část energie emitována ve formě záření mimo viditelnou část spektra. Efektivita takovýchto světél se pohybuje přibližně mezi 10 % až 20 % [4]. Jako výhoda by se dala požadovat jednoduchost použití a konstrukce. Světlo se skládá pouze ze skleněné baňky, kontaktů, odporového drátu a ochranné atmosféry. Použití je také velmi jednoduché, lze je jednoduše použít v obou typech elektrických sítích, rozhodujícím faktorem je pouze přizpůsobení odporového drátu na použité napětí, aby nedošlo k jeho roztavení. [2]

**Elektro-luminiscence** je efekt který vzniká při průchodu elektronů přes polovodičový přechod PN nebo aplikace silného elektrického pole na fosfor. Energie je elektronům předávána z externího zdroje a při průchodu ji opět vydávají jako světelnou energii v určitém rozsahu vlnových délek. Vlnová délka výstupního záření může být ovlivněna pomocí volby vhodného materiálu a může se zcela pohybovat ve viditelném spektru, tato světla se nazývají LED. Jejich efektivita se pohybuje mezi 40 % a 50 %. Jejich konstrukce také nesdílí křehkost skleněného obalu žárovek a mohou být navrženy pro široké spektrum aplikací. Nevýhodou pak je, že vyžadují stejnosměrné napájení, a relativně nízké napájecí napětí, vyžadují tedy měnič pro přizpůsobení napájecího napětí. [4], [2] odstavec 12.1

**Fluorescentní lampy** jsou zařízení skládající se z uzavřené sklenice vyplněné plynem skládaného z rtuťových par a inertních plynů jako argon nebo neon, a z vnitřní strany pokryté fosforem. Využívají vysokého napětí k ionizaci plynu uvnitř, tím se tvoří ionizovaný plyn a tvoří se plazma. Uvolnění energie způsobuje excitaci fotonů ve fosforové vrstvě, což produkuje světlo ve viditelném spektru. Jejich efektivita je okolo 8 % [5] a sdílí stejnou křehkost jako žárovky, i když mají nižší efektivitu než žárovky, mají zase značně delší životnost. Nevýhodou jsou pak zase toxické plyny, které jsou vypuštěny při rozbití zářivky. [2] odstavec 12.1

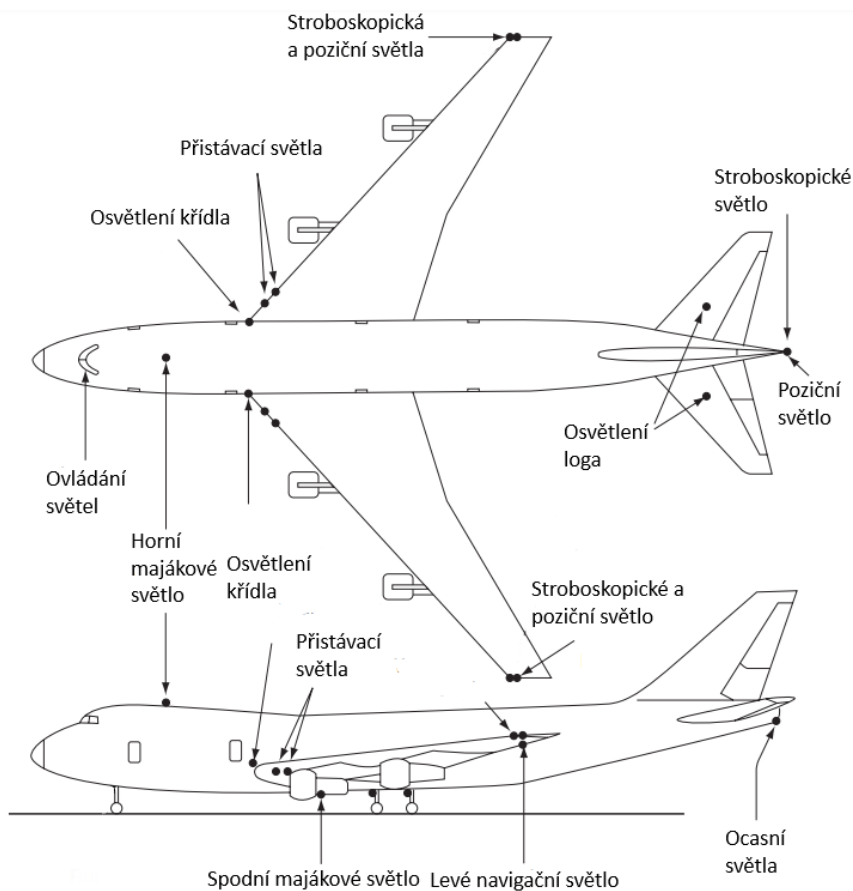
**Stroboskopická světla** se typicky skládají z křemenné trubice, vyplněné xenonem. Jsou napájeny vysokým napětím, až 400 V DC. Trubice může být vytvarována do jakéhokoliv tvaru, který zrovna potřeba. Xenon je inertní a chemicky stabilní plyn, při poškození pláště není nebezpečný. Emitace světla je započata ionizací plynu aplikací vysokého napětí na elektrody. Ionizace způsobí snížení odporu plynu a dovolí průchod krátkého pulsu až několika tisíc ampér a procházející elektrony předají energii atomům plynu, které tak přesunou na vyšší energetickou úroveň, ze které ale okamžitě klesnou, při tomto přechodu zpět do nižší úrovně dojde k uvolnění čímž dochází k excitaci fotonů. Výsledkem je velmi intenzivní bílý záblesk. [2] odstavec 12.1

### 1.1.2 Různé typy světel

Rozlišujeme několik typů světel podle jejich účelu a místa kde jsou instalována. Místo využití určuje mechanické a povětrnostní podmínky, které musí světům odolávat. Pro rozdělení světel můžou být použity tři základní skupiny, osvětlení kabiny pro pasažéry, osvětlení kokpitu a venkovní světla. Osvětlení kabiny a kokpitu jsou si velmi podobné a budou shrnuty do jednoho odstavce, světla pro osvětlení exteriéru se oproti těmto dvěma už značně liší, a hlavně obsahují poziční světla, pro která se navrhuje zdroje.

**Osvětlení kabiny pro pasažéry** je skupina světel, která osvětlují prostor určený pro pohyb pasažérů. Rozsáhlost instalace záleží na velikosti letadla. Může se pohybovat od pár žárovek umístěných na stropě letadla až po světla integrovaná do interiéru. Na dlouhých letech mají LED světla přeprogramované úrovně intenzity pro různé fáze letu a časové zóny. Kombinace LED s různými vlnovými délkami může docílit i jemnějšího světla, které je pohodlnější pro pasažéry. Dříve byly ovládány individuálně pomocí mechanických spínačů, dnes jsou ovládány centrálního řízení umožněného přes společnou bus. [2] odstavec 12.3

**Světla pro osvětlení exteriéru** jsou umístěna na exteriéru letadla. Typické rozmístění těchto světel je na obrázku . Jsou ovládána pomocí přepínačů umístěných v kokpitu. Jejich účely jsou od estetiky až po bezpečnost.

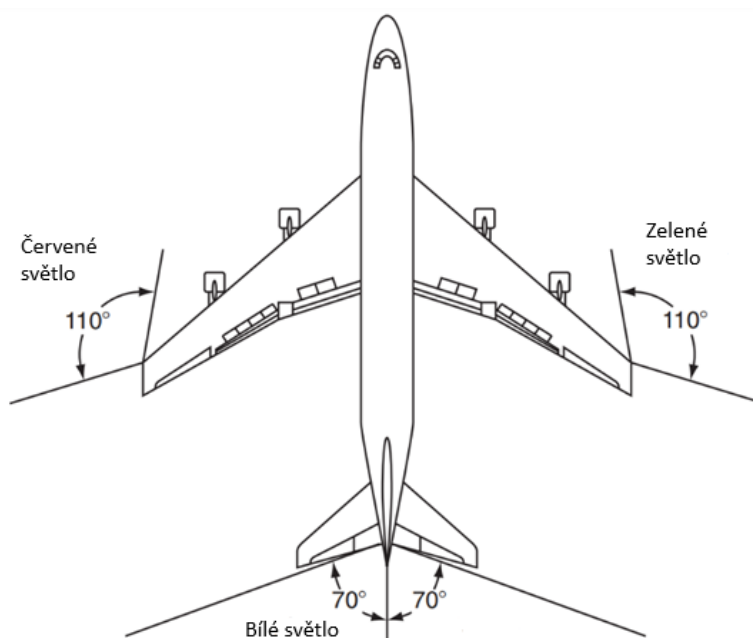


Obrázek 1.1 Typické rozmístění venkovních světel [2]

Osvětlení loga ozařují loga na směrovce, toto je především pro reklamní účely leteckých společností, ale v hustých provozech jsou využita i pro dodatečnou identifikaci.

Osvětlení křídel je nutné pro inspekci ledu, který na nich vzniká. Typicky jsou to světla s velmi nízkým ozařovacím úhlem o výkonu 50 W až 250 W. Jsou vnořeny do trupu letadla a staticky namířeny na konkrétní místo na křídlech.

Přistávací světla bývají umístěna na krajích křídel, buď na špičce nebo poblíž trupu, kde se křídla připojují k letadlu. Mají nastavený pevný úhel, opět mají relativně malý úhel ozařování. Výkon těchto světel se pohybuje v rozsahu 600 W až 1000 W. Velký výkon znamená, že se často nedají udělat dostatečně kompaktní, aby šly vnořit přímo do křídla, proto jsou často vysunovací.



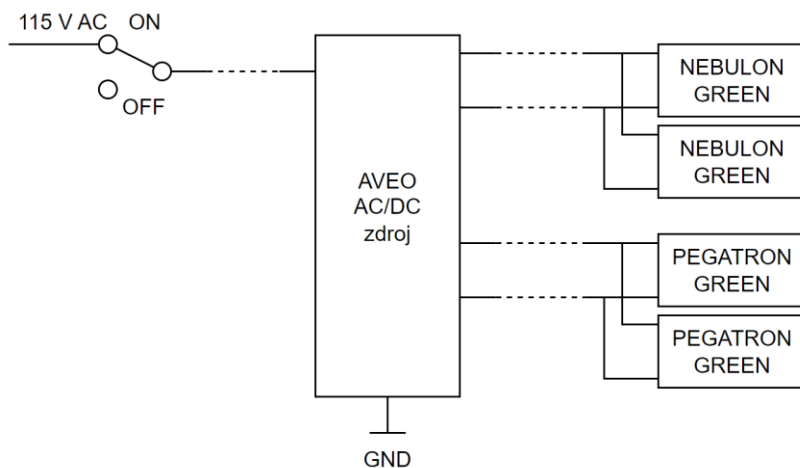
Obrázek 1.2 Ozařovací úhly pozičních světel [2]

**Poziční světla** se skládají ze tří světel. Dvě jsou umístěna na špičkách křídel, jedno na pravém, druhé na levém a třetí se nachází na ocasu letadla. Zadní světlo je bílé a má ozařovací úhel 140° a je namířeno dozadu, po ose letadla. Světla na křídlech mají osvětlovací úhel 110° a jedno míří doprava a druhé doleva. Světlo umístěné na pravém křídle je zelené a levé světlo je červené. Tato kombinace, dovoluje základní identifikaci směru, v jakém směru se letadlo pohybuje okolním letadlům. Je to jedno z mála světel, které patří do povinné výbavy a při nočních letech musí být vždy zapnuté, při denních nemusí, ale často bývají zapnutá i tehdy. Pro ilustraci jsou ozařovací úhly zobrazeny na obrázku 1.2

### 1.1.3 Připojení do elektrické sítě letadla

Jak již bylo zmíněno na začátku této kapitoly, v letectví se momentálně používají dvě hlavní rozlišení elektrické sítě, DC a AC.

AC síť se využívá ve větších letadlech, kde vzdálenost přenosu už je značná a je vhodnější využívat k přenosu střídavé napětí. Napětí na této síti je třífázové, nominální napětí je na ní vůči zemi  $115\text{ V} \pm 3\text{ V}$  a fáze vůči fázi je  $200\text{ V}$ . Frekvence za normálních podmínek je  $400\text{ V} \pm 10\text{ V}$ , a úplně to nejhorší co lze očekávat je  $360\text{ Hz}$  až  $440\text{ Hz}$ . Limitní stavy napětí na síti pak může být  $98\text{ V}$  až  $138\text{ V}$ . [1] (tabulka 2) Zapojení do této sítě, lze názorně ukázat na manuálu k úpravě pozičních světel na Boeing 737, od firmy Aveo Engineering. Na obrázku 1.3 je zjednodušené schéma z manuálu, které zobrazuje elektrickou síť pro napájení pozičních světel po výměně starých žárovkových světel za nové LED.



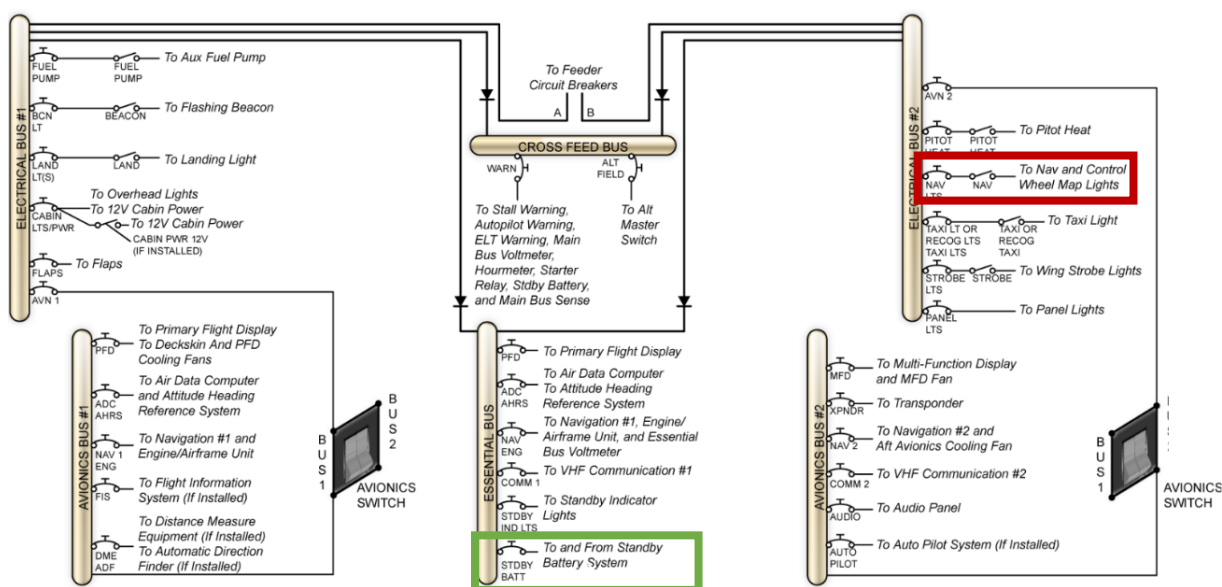
Obrázek 1.3 Zjednodušené zapojení nových světel v boeing 737 [6]

Ve schématu je zobrazeno řešení jen pro jedno křídlo, druhé křídlo by vyžadovalo totožnou sestavu, ale umístěnou na druhé straně letadla. Spínač pro ovládání světel je umístěn v kokpitu, ten ovládá přepínač, který je v letadle realizován pomocí relé, a přepíná tak mezi stavy zapnuto a vypnuto, zdroj, který je pak umístěn ve křídle transformuje palubní napětí na napětí, které mohou využívat světla.

DC síť se nachází na menších letadlech, kde vzdálenosti přenosu energie jsou relativně krátké a z pohledu ztrát skoro až zanedbatelné. Nominální napětí na této síti je  $28\text{ V}$ , za normálních podmínek, lze očekávat rozkmit  $24\text{ V}$  až  $29\text{ V}$ , s absolutními maximy  $21\text{ V}$  až  $32\text{ V}$ . Na této síti se může při s startu objevit napětí až  $60\text{ V}$  během jistých přechodových událostí, ale to pouze na maximálně jednu sekundu, s tím, že napětí celou dobu pomalu klesá na nominální hodnotu. Zde je i dodatečná podmínka pro zařízení, která by měla fungovat při bateriovém provozu, ta stanovuje, že taková zařízení by měla být



schopná provozu až do 16 V. [1] (tabulka 3). Příkladem takové sítě je třeba napájecí síť Cessny 172. Na obrázku 1.4 je viditelné rozložení DC napájecí elektrické sítě.



Obrázek 1.4 Diagram rozložení elektrické sítě Cessny 172 [6]

Na diagramu je elektrická síť rozdělena do několika podsítí, *ESSENTIAL BUS*, *AVIONICS BUS#1* a *AVIONICS BUS#2*. Každá napájí malé množství zařízení a světel která jsou zde zobrazena. *AVIONICS BUS#1* a *AVIONICS BUS#2* lze zapnout pomocí přepínače *BUS1* a *BUS2*. *CROSS FEED BUS* je pak společná část sítě, skrz kterou by při poruše jedné *BUS#* může, pokud je sepnut vhodný přepínač, být napájena druhou *BUS#*. *ESSENTIAL BUS* je od tohoto všeho oddělena a v zeleném rámečku je zvýrazněn přepínač pro připojení baterie, která by napájela pouze tuto podsíť. V červeném rámečku je zobrazený přepínač pro ovládání pozičních světel, z diagramu je tedy jasné, že při nouzovém režimu, kdy vypadl z provozu hlavní zdroj energie, ať už motor, regulátor nebo jiný prvek potřebný pro generaci elektrické energie, nejsou tato světla napájena, a zdroj, který je napájí tak nemusí splňovat podmínku funkce do 16 V, ale pouze do 24 V. [7]

## 1.2 Měniče

Každé elektrické zařízení vyžaduje pro svou funkci zdroj elektrické energie, tímto zdrojem je v případě letadel palubní elektrická síť. Přenos vyšších proudů, ale znamená vyšší úbytek na vedení, čímž rostou i ztráty na tomto vedení. Proto se distribuční sítě dělají na vyšších napětích, jako třeba 28V DC, nebo 115 V AC. To ale pak znamená, že zařízení připojená na tuto síť musí být buď přímo schopné provozu při těchto podmínkách, nebo vyžaduje měnič napětí, který palubní napětí transformuje na pracovní napětí spotřebiče. Samostatné zdroje dokáží pracovat pouze s DC napětím, pro AC síť je

nejprve nutné napětí usměrnit. [2]

Tento problém byl dříve řešen pomocí žárovek, které při správném naddimenzování nevyžadovaly prakticky žádné úpravy napětí. Žárovky mají ale velmi nízkou efektivitu, a jsou i křehké, což může znamenat vznik komplikací při provozu. Dnes jsou tyto světla nahrazována LED světly, která jsou sice značně efektivnější a mohou být i odolnější jak mechanicky, tak i vůči povětrnostním podmínkám, to ovšem za cenu potřeby změny napětí. Jednotlivé diody vyžadují napětí okolo jednotek voltů, a jsou i značně citlivější na pokles napětí, protože nefungují na principu žhavení odporového drátu, který při malém poklesu napětí zůstává krátce rozžhaven a může tak do jisté míry odolávat nestabilitě sítě bez většího poklesu jasů. Diody při poklesu napětí prakticky okamžitě ztrácí svůj jas. Pro LED osvětlení je tedy třeba kvalitních zdrojů, které udrží napětí na konkrétním pracovním napětí. K tomuto by mohly být využity lineární regulátory, které dodávají statické napětí, to ovšem dělali tak, že přebytečné napětí vydávají jako ztrátové teplo, čímž opět trpěli na efektivitu, ale také vyžadovaly větší chladiče. [2]

### 1.2.1 Spínané zdroje

Spínané zdroje se dneska hojně používají jak ve spotřební elektronice, tak i v průmyslové. Obecně se skládají ze spínacího prvku, kterým často bývá MOSFET, a kapacitního prvku, vhodná kombinace diody a cívky. Jejich řízení je uskutečněno pomocí PWM signálu, který je generovaný integrovaným čipem, který může být navržen pro řízení konkrétní topologie, nebo to může být i mikroprocesor, který zároveň může zobrazovat informace o stavu zdroje, nebo je nějakým jiným způsobem předávat dál. Účelové integrované čipy navržené pro řízení zdrojů mají velkou výhodu v tom, že oproti mikroprocesorům nevyžadují druhý zdroj, který by ho napájel. Mikroprocesory totiž pracují většinou v rozsahu 3,3 V až 5 V, což znamená, že než dojde k samotnému řízení silové části zdroje, musí být zajištěno napájecí napětí pro mikroprocesor pomocí externího zdroje. To pak zase dovoluje ale poměrně jednoduchý soft start. Přepínač, který ovládá daný spotřebič nemusí nutně být konstruován tak, aby vydržel jeho plnou zátěž, ale pouze tak, aby spolehlivě sepnul nízkou napěťovou část, a mikroprocesor pak spustí zbytek zdroje. Řízení pak může být realizováno i pomocí společné sběrnice, na které se mikroprocesor může nacházet. [2]

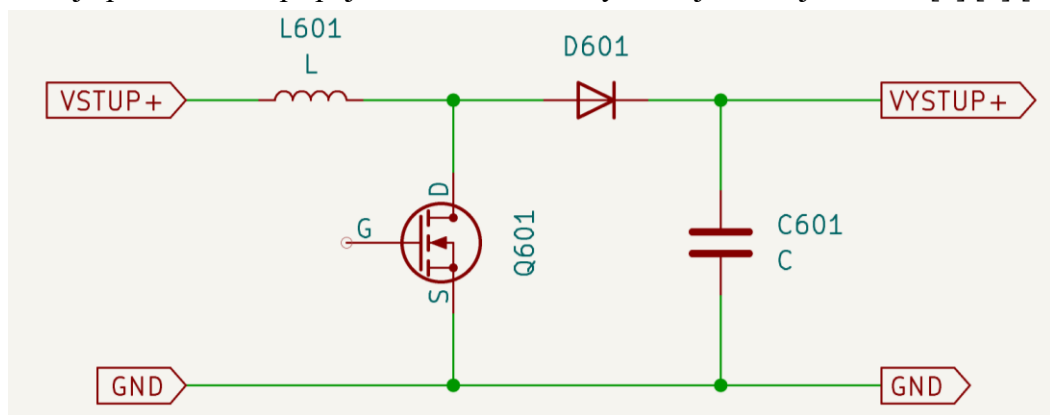
Obecný princip spínaných zdrojů spočívá v kontrolovaném otevírání a zavírání tranzistoru, to dovoluje průchod cívkou, která tak tvoří magnetické pole. Při zavření tranzistoru dojde k rychlému kolapsu vzniknutého magnetického pole, na cívce se tak může indukovat vyšší napětí, kterým je následně nabyt výstupní kondenzátor. Zpětný proud pak blokuje dioda, která propouští proud pouze ve směru do zátěže. Kondenzátor pro funkci není teoreticky ani nutný, ale bez něj by bylo výstupní napětí značně zvlněné a v obvodu zajišťuje stabilitu. [2]

**CCM režim a DCM** jsou režimy provozu zdrojů. CCM (Continuous Conduction Mode) je režim, ve kterém dochází k otevření tranzistoru, vzniku magnetického pole

okolo cívky, uzavření tranzistoru a následnému vybití magnetického pole zpět do cívky. Tranzistor se otevírá ještě v době, kdy se magnetické pole vybíjí do obvodu, ale je opačné polarity, a výkon, který je nově dodáván do obvodu musí překonat ten co ještě zbývá v obvodu. Tím se sice zvyšují ztráty, ale výhodou je značně stabilnější výstupní napětí. DCM (Discontinuous Conduction Mode) je režim, ve kterém dochází k nabíjení induktoru a následnému úplnému vybití magnetického pole, to zaručí vyšší efektivitu, ale na výstupu dojde k velkému poklesu výstupního napětí, vhodným filtrem lze ale tento pokles vyhladit. Nevýhodou je pak i množství dodané energie, při velké zátěži se už výstupní kondenzátor při nastavené střídě nemusí stíhat dobíjet a výstupní napětí tak může být značně nestabilní, proto se u větších zátěží objevuje velmi zřídka. [2]

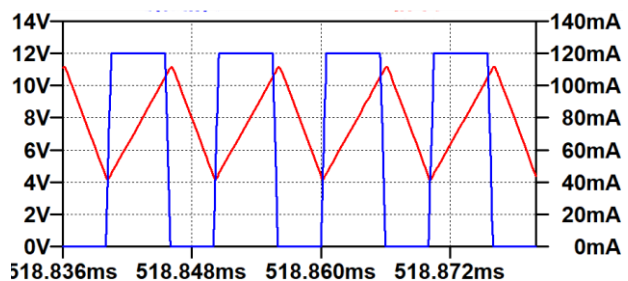
### 1.2.2 Topologie spínaných zdrojů

**BOOST** měniče jsou jedny z nejjednodušších měničů, základní topologie se skládá pouze z diody, cívky, kondenzátoru a tranzistoru. Při sepnutí tranzistoru do něj protéká skrz cívku proud, který na ní tvoří magnetické pole. Po uzavření zůstává jediná cesta k zemi, a to je skrz diodu do zátěže. Po uzavření tranzistoru ale také dochází k velmi rychlému kolapsu magnetického pole, které tak na cívce indukuje vyšší napětí a proud, který pak teče do zátěže, spolu s tím dodávaného ze zdroje. Pomocí těchto zdrojů lze velmi jednoduše sestavit step-up měniče. V některých aplikacích může být nevýhodou, že zátěž je permanentně připojena do obvodu i když zdroj není nijak řízen. [8] [9] [10]



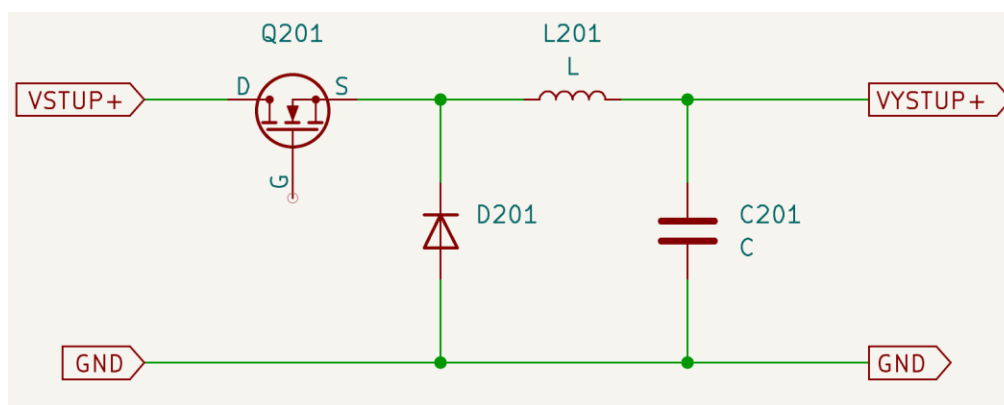
Obrázek 1.5 Schématické zapojení silové části BOOST spínaného zdroje [8]

Na obrázku 1.6 je viditelný průběh proudu procházejícího cívku v závislosti na řídicím PWM signálu. Z průběhu je viditelný značný nárůst proudu po dobu otevřeného průchodu tranzistoru. (červená je proud, modrá je napětí)  
 $L = 1 \text{ mH}$ ;  $f = 100 \text{ kHz}$ ;  $D = 0,5$ ;  
 $R = 1 \text{ k}\Omega$



Obrázek 1.6 Závislost proudu procházejícího induktorem na spínacím signálu (BOOST)

**BUCK** měniče se od předchozího typu měniče moc neliší v množství součástek, z tohoto ohledu jsou stejné, také se skládá z cívky, induktoru, diody a tranzistoru. Princip zůstává podobný, stejně tak zůstává podobná i závislost vstupního proudu na PWM. Rozdíl nastává ve využití induktoru. V předchozí topologii je energie magnetického pole vtlačena do zátěže, a výstupního kondenzátoru. Zde, je celý obvod včetně zátěže odpojen od vstupního napájení při uzavření tranzistoru, do zátěže tedy teče pouze energie uložená v cívce a kondenzátoru. Zde pro regulaci napětí pomáhá indukčnost cívky, která vzdoruje měnícímu se proudu, a zajišťuje tak pomalejší nárůst napětí na výstupu. [8] [9] [10]



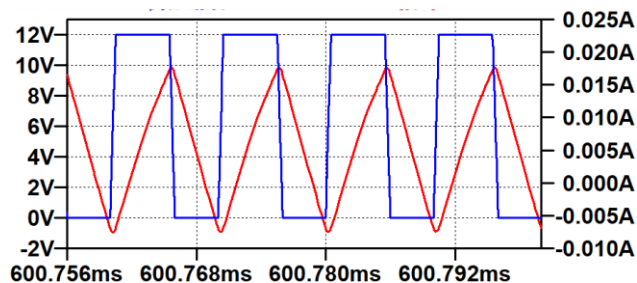
Obrázek 1.7 Schématické zapojení silové části BUCK spínaného zdroje [8]

Na obrázku 1.8 je viditelný průběh proudu procházejícího cívkou v závislosti na řídicím PWM signálu. Z průběhu je viditelný značný nárůst proudu po dobu otevřeného průchodu tranzistoru a také zpětný proud cívkou, který vzniká po uzavření tranzistoru.

(červená je proud, modrá je napětí)

$L = 1 \text{ mH}$ ;  $f = 100 \text{ kHz}$ ;  $D = 0,5$  ;

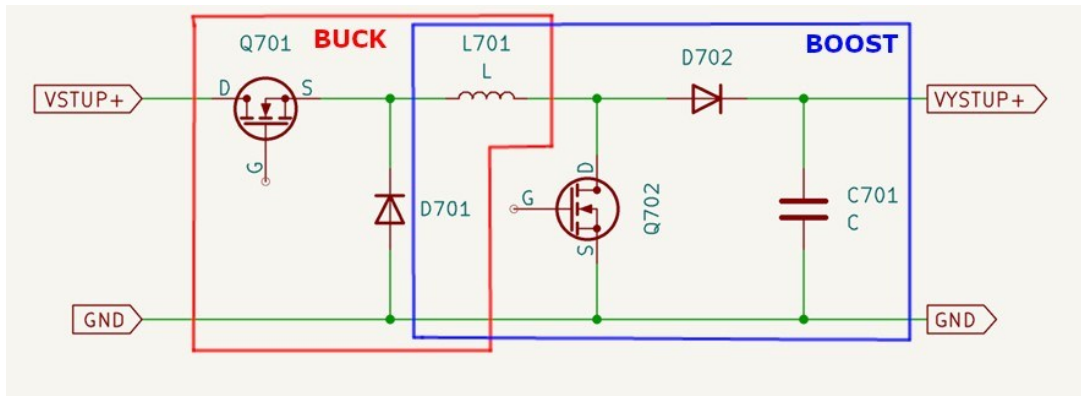
$R = 1 \text{ k}\Omega$



Obrázek 1.8 Závislost proudu procházejícího induktorem na spínacím signálu (BUCK) [8]

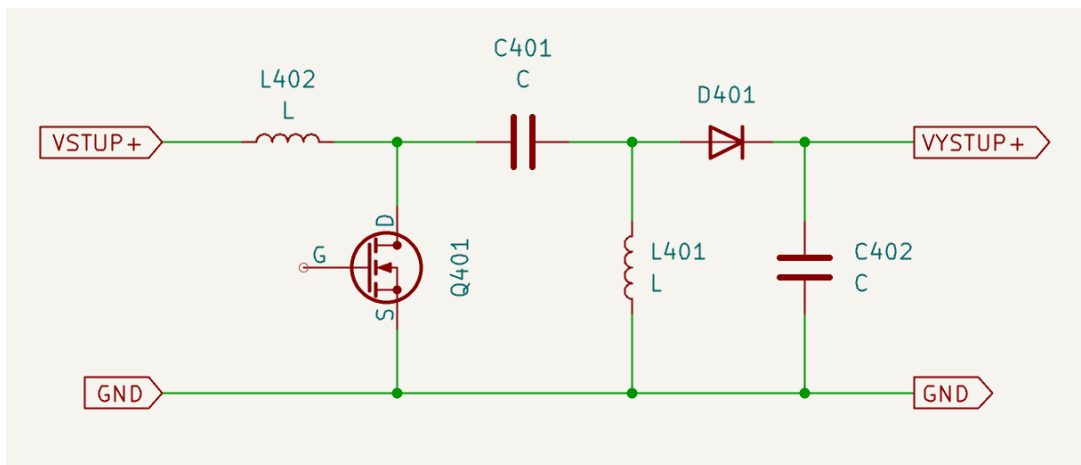
**BUCK/BOOST** měniče jsou vytvořeny sériovou kombinací předchozích dvou měničů. Na obrázku 1.9 jsou tyto části vyznačeny. Princip obou částí zůstává stejný, a mezi funkcí zvyšování napětí a snižování se volí pomocí spínacích tranzistorů. Pokud je tranzistor v části BUCK permanentně otevřený, tvoří zkrat mezi vstupem a cívkou a zdroj je v režimu zvyšování napětí, pokud je tedy BOOST tranzistor nějak řízen.

V případě že je BOOST tranzistor zcela uzavřen a je přiveden PWM signál na tranzistor v části BUCK, zdroj snižuje napětí. [8] [9] [10]



Obrázek 1.9 Schématické zapojení silové části neinvertujícího BUCK/BOOST spínaného zdroje [8]

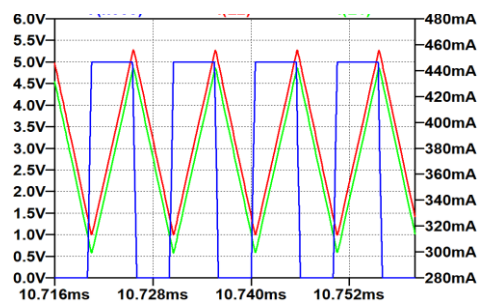
**SEPIC** měniče jsou v podstatě BOOST a invertující BUCK/BOOST v sérii. Řízení tedy zůstává stejné jako v případě BOOST topologie, ale může napětí, jak zvyšovat, tak i snižovat pouze volbou jiné střídy na jednom tranzistoru. Výhodou této topologie je stabilita výstupního napětí, ale jen na menších zátěžích. Kapacita oddělovacího kondenzátoru musí být poměrně vysoká pro úspěšný přenos proudu a také je další nevýhodou relativně vysoká spotřeba, i když není na výstup připojena zátěž. (pokud není tranzistor vypnutý) [8] [9] [10]



Obrázek 1.10 Schématické zapojení silové části SEPIC spínaného zdroje [8]

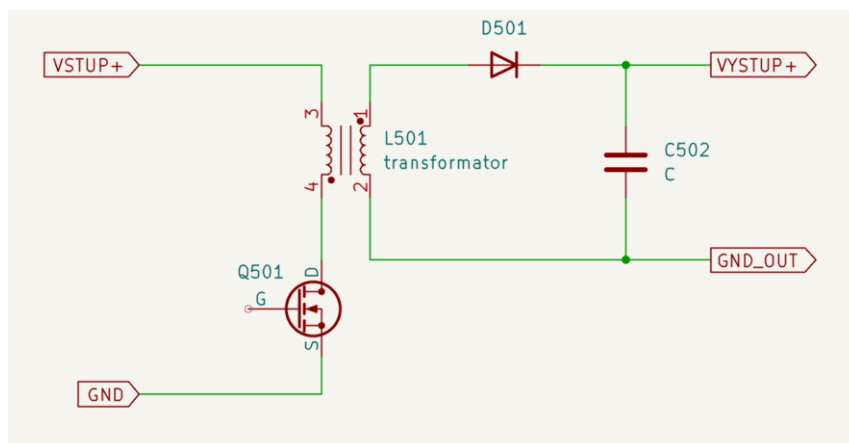
Na obrázku 1.6 jsou viditelné průběhy proudů na cívkách (červená L402, zelená L401) v závislosti na vstupním PWM signálu (modrá). Průběhy jsou v podstatě stejné jako na samostatných topologiích.

$L = 1 \text{ mH}$ ;  $f = 100 \text{ kHz}$ ;  $C401 = 100 \text{ }\mu\text{F}$ ;  $D = 0,5$ ;  $R = 1 \text{ k}\Omega$



Obrázek 1.11 Závislost proudu procházejícího induktorem na spínacím signálu (SEPIC)

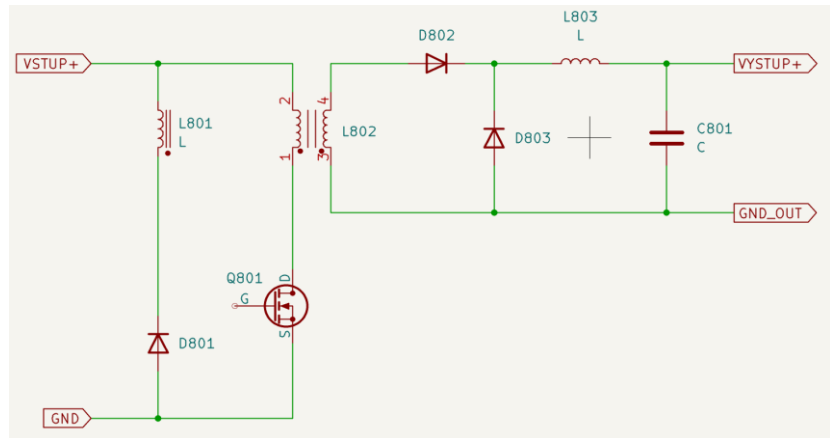
**FLYBACK** měniče jsou principiálně velmi podobné zdrojům s topologií BOOST, hlavní změnou je induktor, který je zde nahrazen transformátorem. Díky tomu se tento zdroj řadí mezi izolované a pomocí poměru závitů mezi primárem a sekundárem lze dosáhnout velmi vysokých napětí.



Obrázek 1.12 Schématické zapojení silové části FLYBACK spínaného zdroje [8]

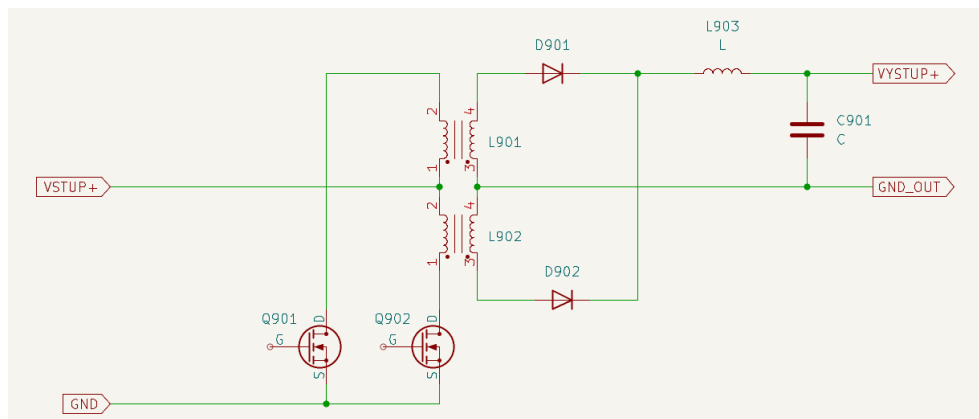
Případně nastavit pomocí PWM signálu na hradlo spínacího prvku. Využití transformátoru dovoluje na výstupu mít více různých napětí. Využití je tedy často v aplikacích, kde jsou třeba vysoká napětí, ale nevýhodou jsou pak vysoké špičkové proudy. [8] [9] [10]

**FORWARD** měnič, podobně jako FLYBACK je modifikace BOOST topologie, tak FORWARD topologie je modifikací BUCK zdroje. Patří mezi izolované zdroje a co se efektivity týče je velmi blízko předchozí topologii. Hlavní změny ve vlastnostech jsou pak v extra induktoru, který způsobuje nižší zvlnění na výstupu a hlavně pak dovoluje značně vyšší proudy oproti FLYBACK, nevýhodou ale pak je, že už díky tomuto induktoru není tak vhodný pro vyšší výstupní napětí. [8]



Obrázek 1.13 Schématické zapojení silové části FORWARD měniče [9] [10]

**PUSH-PULL** měniče fungují velmi podobně jako Forward zdroje, ale liší se tím, že v obvodu je využit transformátor s dvojitým vinutím na obou stranách. Forward měniče se část periody nabíjí a zbytek periody se vybíjí, ale díky dvojitému vnutí se v Push-Pull měniči se v první části periody nabíjí jedna cívka a druhá vybíjí, v druhé části periody si prohodí role. Tím se dosáhne stabilnějšího výstupního proudu a zároveň menšího vlivu na napájecí síť. Zároveň je i tvořeno mírnější EM rušení, jsou efektivnější ve vysoko výkonových aplikacích. [8] [9] [10]



Obrázek 1.14 Schématické zapojení silové části PUSH-PULL měniče [8]

### 1.2.3 Shrnutí základních vlastností topologií a volba topologií

V tabulce 1.1 jsou uvedeny základní vlastnosti a hodnoty, k výše uvedeným zdrojům. Jsou zde hodnoty typických výkonů, kde jsou topologie využívány, vztah výstupního napětí vůči vstupnímu a jiné vlastnosti, které jsou hlavním přínosem těchto topologií.

Tabulka 1.1 Shrnutí vlastnosti jednotlivých topologií [11]

| Topologie  | Typické výkony | Médium pro ukládání energie:            | Vstupní vs výstupní napětí   | vlastnosti                             |
|------------|----------------|---|------------------------------|--|
| BOOST      | 0 až 1000      | cívka                                   | $0 \leq U_{out} \leq U_{in}$ | Jednoduchá                             |
| BUCK       | 0 až 5000      | cívka                                   | $U_{in} \leq U_{out}$        | Jednoduchá                             |
| BUCK/BOOST | 0 až 150       | cívka                                   | $0 \leq U_{out}$             | Jednoduchá, obousměrný                 |
| SEPIC      | x              | Kondenzátor a dvě cívky                 | $0 \leq U_{out}$             | Stabilnější výstup, obousměrný         |
| CUK        | x              | Kondenzátor a dvě cívky                 | $U_{out} \leq 0$             | Sepic, ale s opačným výstupním napětím |
| FLYBACK    | 0 až 250       | Transformátor (cívky se stejným jádrem) | $0 \leq U_{out}$             | Izolovaný BUCK/BOOST                   |
| FORWARD    | 100 až 200     | Cívka                                   | $0 \leq U_{out}$             | Velké proudy                           |
| PUSH-PULL  | 100 až 1000    | Cívka                                   | $0 \leq U_{out}$             | Efektivnější forward                   |

Na základě těchto hodnoty a informací uvedených výše, byly z těchto topologií vybrány dvě, pro další návrh a realizaci. Z uvedených topologií se zcela nehodí CUK, kvůli invertovanému výstupnímu napětí, takže byl hned ze začátku z výběru vyřazen. Topologie Forward a push-pull, jsou ideální na vyšší výkony, ale zde se takových výkonů nedosahuje a jejich konstrukce vyžaduje transformátory, které mohou být relativně velké, vzhledem k výkonům, které jsou zde očekávané, na základě tohoto byly také vyřazeny. BOOST se zde nehodí kvůli tomu, že je třeba snižovat napětí, což neumí. BUCK/BOOST by byl pouze v režimu BUCK a byla by využívána pouze BUCK část obvodu. FLYBACK topologie, je v podstatě izolovaná verze BUCK/BOOST (invertujícího), a opět by zde byla vhodná ale vyžaduje využití transformátoru v obvodu, proto nebude využita. SEPIC byl zvolen pro pokračování kvůli své vyšší stabilitě a jednoduššímu řízení než BUCK. BUCK byl zvolen kvůli své jednoduchosti, a pouze snižuje napětí, což je zde třeba, nevýhodou je potřeba budiče při využití NMOS tranzistoru, ale malé množství součástek by tuto nevýhodu mohlo vyrovnat.



## 2. ANALÝZA PARAMETRŮ POTŘEBNÝCH K NÁVRHU

Pro začátek je nutné zanalyzovat parametry, které po zdroji budou požadovány. Vstupní parametry závisí na elektrické síti, ke které bude zdroj připojen a také norma, která se na zdroje vztahuje, Výstupní parametry pak zase záleží na světlech, pro které jsou zdroje určeny a také na výše zmíněné normě. Teprve po stanovení těchto hodnot lze určit vhodnou topologii a začít samotný návrh.

### 2.1 Vybraná světla

Pro účely této práce byly vybrána světla, ke kterým budou zdroje navrženy, ale díky číslicovému řízení, tyto hodnoty lze změnit a použít i pro jiná. Vybraná světla jsou volně komerčně dostupná z e-shopu Trend-Elektro a určena k instalaci na menší letadla jako třeba Cessna 172. Ke světlům distributor neuvádí mnoho informací, ale udává povolený rozsah vstupního napětí a pracovní proud. Vybraná světla jsou MiniStrobeNG a PL14VNG.

MiniStrobeNG je určeno k instalaci na směrovku a prodává se v červené a bílé verzi, zde bude využita pouze bílá verze, jakožto zadní poziční světlo. Světlo se skládá ze dvou obvodů diod, polohového a stroboskopického. Zdroje jsou navrženy pouze pro polohovou část, stroboskopická by musela být napájena zvlášť. Parametry napájecího napětí jsou uvedeny v tabulce 2.1 a níže je i na obrázku je světlo zobrazeno. [13]

PL14VNG je určeno k instalaci na křídla, je dostupné v zelené a červené verzi. Stejně jako předchozí světlo se skládá ze dvou obvodů, stroboskopického a polohového, zdroje budou opět navrženy pouze pro polohovou část. Hodnoty napájecího napětí a proudu jsou uvedeny v tabulce 2.1 a na světlo je zobrazeno na obrázku 2.2. [12]

Tabulka 2.1 Napájecí parametry pro vybraná světla [12],[13]

|                       | MiniStrobeNG | PL14VNG |
|-----------------------|--------------|---------|
| Napájecí napětí (min) | 11 V         | 11 V    |
| Napájecí napětí (max) | 15 V         | 15 V    |
| Vstupní proud při 12V | 50 mA        | 150 mA  |



Obrázek 2.1 Světlo MiniStrobeNG [13]



Obrázek 2.2 Světlo PL14VNG [12]

## 2.2 Norma ke zdrojům

Po krátkém průzkumu na internetu byl nalezen norma ETSO-C71 [14] . Tato norma popisuje minimální požadavky na statické napájecí letecké DC-DC zdroje použité pro napájení navigačních nebo komunikačních zařízení. Dodržení normy je důležité pro zaručení provozu zařízení během normálních podmínek, se kterými se lze setkat během letu.

### Obecné standardy (1.0)

(1.1) zařízení nebude sestaveno z takových komponentů, které mají takové vlastnosti, že při testování přes v celém spektrum testů specifikovaných v této normě by došlo k překročení výrobcem stanovených limitních hodnot.

(1.2) Konstrukce vybavení musí být taková, aby při průběhu specifikovaných testů nedošlo k trvalému poškození, nebo jinému ovlivnění spolehlivosti zařízení.

### Minimální výkony při standardních podmínkách testů (2.0)

#### (2.1) Nominální výstupní proud a napětí

Nominální výstupní napětí a proud nesmí klesnout pod ty stanovené výrobcem. Dále, zařízení bude schopno dodávat alespoň 10 % více výkonu, než stanovuje výrobce po dobu alespoň dvou hodin, bez jakýkoliv dlouhodobých efektů na vybavení.

#### (2.2) Regulace

Regulace při normálních podmínkách nesmí přesáhnout 12 %. Pro účely tohoto standardu je regulace definována jako:

$$\text{odchylka} = \frac{U_{20\%} - U_{100\%}}{U_{100\%}} \cdot 100\% , \quad (2.1)$$

#### (2.3) Zvlnění

Zvlnění výstupního stejnosměrného napětí při maximální zátěži nesmí přesáhnout 0,1 %, při zatížení výstupu kondenzátorem 2 mF a zvlnění vstupního napětí je rovno 2 V, špička-špička při frekvenci 400 Hz. Pro vybavení navržené pro napájení 13,75 V, toto zvlnění nepřesáhne 1 V, špička-špička.

#### (2.4) Přepětí

Na vybavení nedojde k permanentnímu poškození žádných tranzistorů nebo jiných komponentů, když zdroj dodává plný výkon a na napájecích vzorkách je přepětí 50 %, nad nominální napájecí napětí po dobu alespoň pěti minut.

#### (2.5) Stav zkratu

Nedojde k žádnému poškození měniče nebo jeho komponentů výsledkem zkratu jednotlivých výstupů po dobu alespoň jedné minuty. Během pěti minut po odstranění zkratu bude zdroj schopný dodávat plný výkon po dobu alespoň osmi hodin bez jakékoliv ztráty poškození.

### (2.7) Odolnost dielektrika

Vybavení musí bez jakýchkoli známek poškození vydržet aplikaci sinusového napětí mezi výstupní svorky všech transformátoru a jejich kostry po dobu pěti sekund. Střídavá hodnota napětí bude, buď pětkrát větší než maximální pracovní napětí přes vynutí nebo 500 V, podle toho, které je větší.

### **Minimální výkon při enviromentálních testech (3.0)**

#### (3.1) Test nízké teploty

Když je zařízení testováno při nízkých teplotách bude použito napájecí napětí nižší o 10 % hodnoty použité při standardních podmínkách. Výstupní napětí se nebude lišit o více než 12,5 % od hodnoty získané při standardních podmínkách. Dále musí být splněn paragraf 2.3 standardu.

#### (3.2) Výškový test

Když zařízení prochází výškovým testem, podmínky paragrafu 2.1, 2.2 a 2.3 této normy musí být splněny.

#### (3.3) Test vlhkosti

Po začátku testu vlhkosti a alespoň 15 minutách, od doby kdy bylo připojeno napájecí napětí musí být splněny podmínky paragrafů 2.1, 2.2 a 2.3.

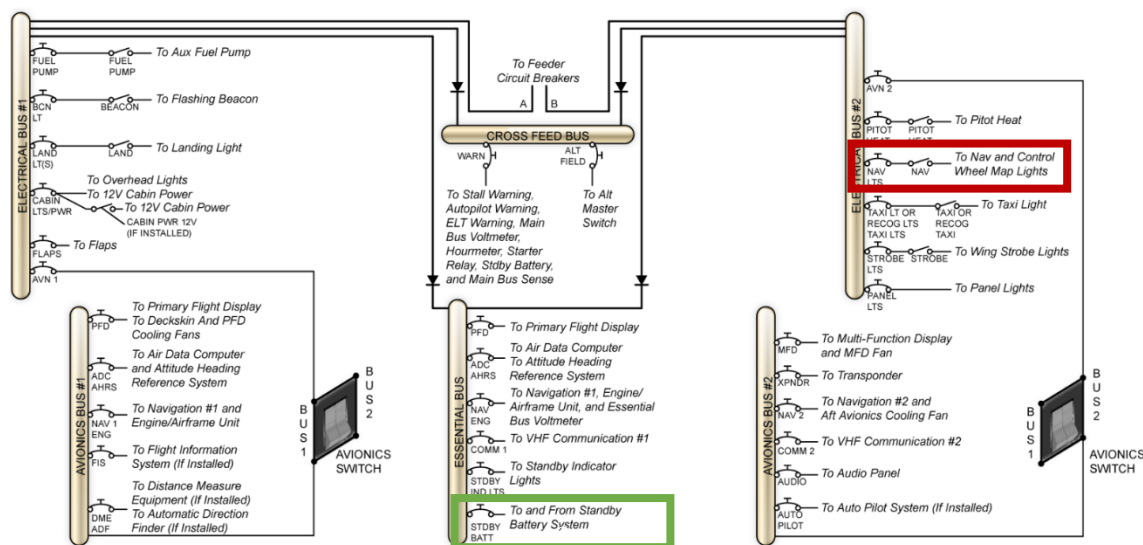
#### (3.8) Test nízkého napětí

Když je napájecí napětí na hodnotě 80 % standardního testu, musí zařízení stále fungovat. Dále, při pomalé redukci z 80 % napájecího napětí na 50 %, nesmí dojít k takové situaci, že bude ovlivněna spolehlivost zařízení. Při snižování z 50 % na 0 % napájecího napětí, nesmí vybavení jevit náznaky kouře nebo ohně.

## **2.3 Cílová elektrická síť**

V tuhle chvíli už jsou známé výstupní hodnoty jako výstupní proud a napětí, a také podmínky, za kterých by měl zdroj fungovat. Zbývá už jen zjistit vstupní napájení, pro které bude zdroj navržen. Pro tyto účely, bylo zvoleno letadlo, které bude použito jako model pro návrh. Byla zvolena Cessna 182.

K tomuto konkrétnímu letadlu byl nalezen údržbový manuál [7], který pojednává o elektrické síti letadla. Na obrázku 2.3 je uvedeno schématické zobrazení elektrické sítě Cessny 182. V červeném obdélníku, je vyznačen spínač pro přepínání stavu pozičních světel. V zeleném pak přepínač pro záložní napájení. Poziční světla jsou napájena z „Electrical bus 2“ a při zapnutí záložní baterie, tato bus není napájena. Napájena je pouze „Essential bus“. Z toho je tedy zřejmé, že napájecí zdroj pro tato světla stačí navrhnout pouze pro rozsah napětí, která se na síti objeví jen při normálním stavu.



Obrázek 2.3 Schématické zobrazení elektrické sítě Cessny 172

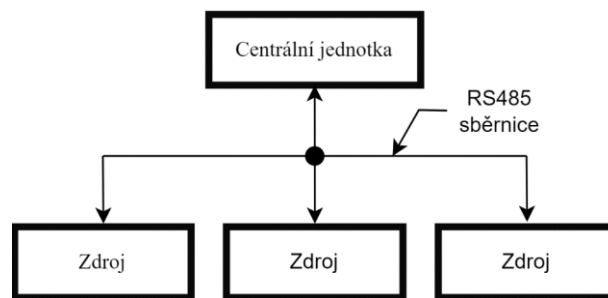
V již zmíněného manuálu [7], je uvedeno maximální napětí, při kterém je alternátor letadla odpojen, a dojde tak i k odpojení světel,  $31,75 \pm 0,5$  V. To samé, se stane, pokud se na síti objeví  $24,5 \pm 0,35$  V. Nominální hodnota napětí je pak 28,5 V. Tím vzniká napěťový rozsah 24,15 V až 32,25 V.

### 3. NÁVRH

Teď, když už jsou známy všechny parametry, které budou po zdroji požadovány může začít návrh. Cílem je navrhnout číslicově řízený proudový zdroj. To bude dosaženo pomocí systému skládajícího se ze tří zdrojů, a jedné centrální jednotky.

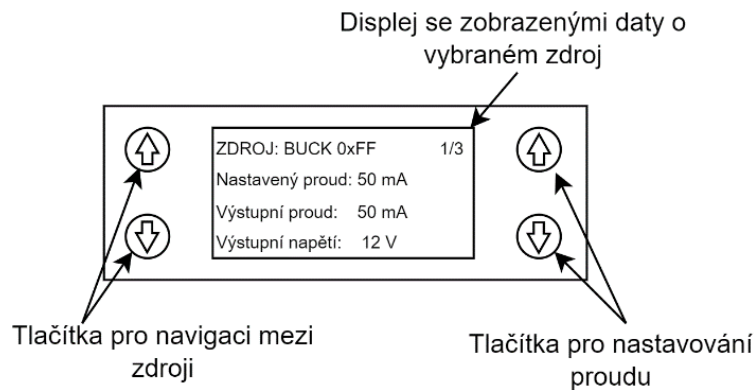
#### 3.1 Konceptní návrh napájení systému pozičních světel letadla

Při použití jednoho zdroje, by při odpojení jednoho světla mohlo dojít k poškození těch ostatních, protože by se zdroj pokoušel dorovnat výstupní proud na cílovou hodnotu. Z toho důvodu, místo jednoho zdroje, budou použity tři. Každý zdroj bude řízený jedním mikrořadičem, který bude adresovatelný centrální jednotkou a půjde tak z každého zdroje vyčítat výstupní proudů. Dále budou obvody řízeny pomocí zpětné vazby, která se bude skládat z měření výstupního proudu a měření výstupního napětí, aby při stavu nepřipojené zátěže nedošlo k tomu, že se na výstupu objeví příliš vysoké napětí.



Obrázek 3.1 Blokové schéma koncepce systému

Centrální jednotka, se pak bude skládat z jednoho mikrořadiče, displeje a čtyř tlačítek, pomocí kterých půjde jednotlivé zdroje ovládat. Centrální jednotka bude se zdroji komunikovat pomocí sběrnice RS485, aby bylo možné případně umístění zdrojů přímo k jednotlivým světlům, pro nižší ztráty na vedení, ale zároveň bylo zdroje možné řídit.



Obrázek 3.2 Ilustrace návrhu uživatelského rozhraní

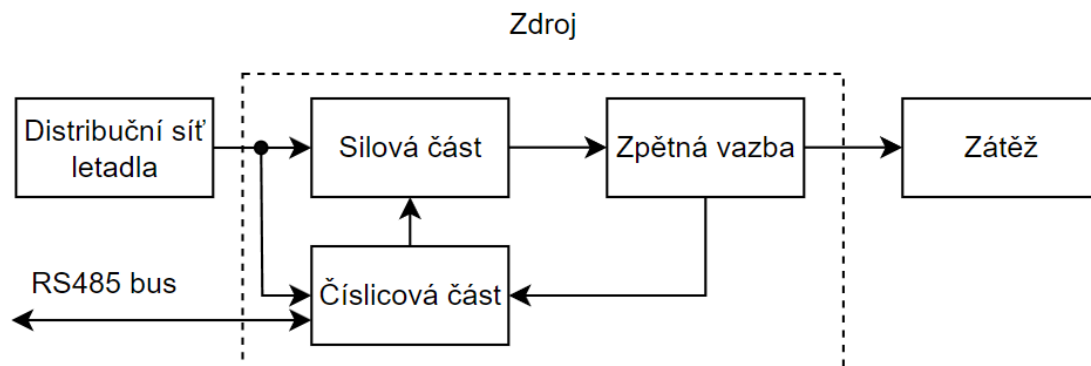
## 3.2 Návrh zdrojové části napájení pozičního světla

Z topologií, které byly zmíněny v teoretickém úvodu se zde dají aplikovat snad všechny, ale pro návrh byly vybrány 2, buck a sepic. Buck byl zvolen především pro svoji jednoduchost, i když kvůli umístění zařazení NMOS tranzistoru před zátěž bude pro spínání nutno využít driver, ale jinak je to nejjednodušší topologie. Sepic je naopak jedna z těch komplexnějších, ale zase by měla doručit vyšší efektivitu a hlavně menší zvlnění na výstupu.

V návrhu bude brán důraz především na velikost, aby deska byla jednovrstvá.

Pro řízení zdrojů byl zvolen procesor PIC16F18325. Především kvůli internímu oscilátoru, který může jít na hodnotu až 32MHz, funkci PPS, která dovolí přeměřovat periferie na libovolné piny, vestavěnému UART rozhraní a funkci CWG, Complimentary Wave Generator, který je důležitý pro spínání tranzistorů pro BUCK. Pro oba zdroje byla zvolena spínací frekvenci 250 kHz, od ní se pak budou odvíjet především velikosti cívek.

Oba zdroje lze rozdělit na tři části, silovou část, číslicovou část a zpětnou vazbu. Silová část, je konkrétní pro každou topologii, v případě BUCK topologie obsahuje i budiče potřebné pro spínání tranzistorů. Napětí a proud, přetransformované v silové části následně prochází zpětnou vazbou do zátěže, ze zpětné vazby jsou mikroprocesorem v číslicové části vyčteny hodnoty proudu a napětí, mikroprocesor pak upraví střidu podle potřeby. Součástí číslicové části je i RS485 převodník a spínaný zdroj na 5 V. Na obrázku je zobrazeno blokové schéma, zobrazující toto rozložení funkcí.



Obrázek 3.3 Navržené blokové schéma zdroje

### 3.2.1 Návrh zdroje s topologií BUCK

Buck topologie, jak již bylo zmíněno je velmi jednoduchá skládá se jen z kapacitoru, cívky, diody a mosfetu. Mosfet může být PMOS nebo NMOS.

Prvním krokem je volba tranzistoru. Nejdůležitější hodnotou pro tuto volbu je rdson, měla by být co nejnižší. PMOS tranzistor by byl zde jednodušší, protože by se obešel s jednodušším budičem, ale oproti podobným NMOS by měl větší rdson. Proto zde bude použit NMOS. Výsledný zvolený tranzistor bude výsledkem kompromisu mezi rdson, cenou, velikostí a v dnešní době i dostupností. Zde byl zvolen IRLR2905, který má rdson

13,5 mΩ [15], v kompaktním pouzdře DPAK. K němu byl zvolen budič, IR2101S, s tím, že jako „low side“ tranzistor bude využit stejný tranzistor, který byl již zvolen.

Dalším krokem je zvolení cívky. V kapitole 2.1 byly zvoleny světla, na které budou zdroje namodelovány. To znamená výstupní napětí okolo 12 V a výstupní proudy, 150 mA a 50 mA. Proud 200 mA bude považován jako maximální, a 50 mA bude minimální. Frekvence byla na začátku kapitoly stanovena na 250 kHz. Výsledná minimální hodnota cívky je pak spočítána pomocí rovnice:

$$L_{MIN} = \frac{U_{in} - U_{out}}{\frac{f_{sw}}{U_{out}} \cdot 2 \cdot I_{RIP}} = \frac{28,5 - 12}{\frac{250000}{12} \cdot 2 \cdot 0,05} = 277 \mu H. \quad (3.1)$$

Tím je už známa minimální hodnota. Pro reálnou součástku byla zvolena hodnota 330 μH, 500 mA. [15]

Dalším krokem je zjištění hodnoty výstupního kondenzátoru. Na výstupu zdroje tvoří cívka a kondenzátor LC filtr. Pro odstranění šumu je nutné nastavit frekvenci pod tu, která byla zvolena jako spínací. V praxi se doporučuje tuto hodnotu nastavit co nejnižší, ale s klesající mezní frekvencí roste velikost kondenzátoru. Proto volím mezní frekvenci 1 kHz a z rovnice:

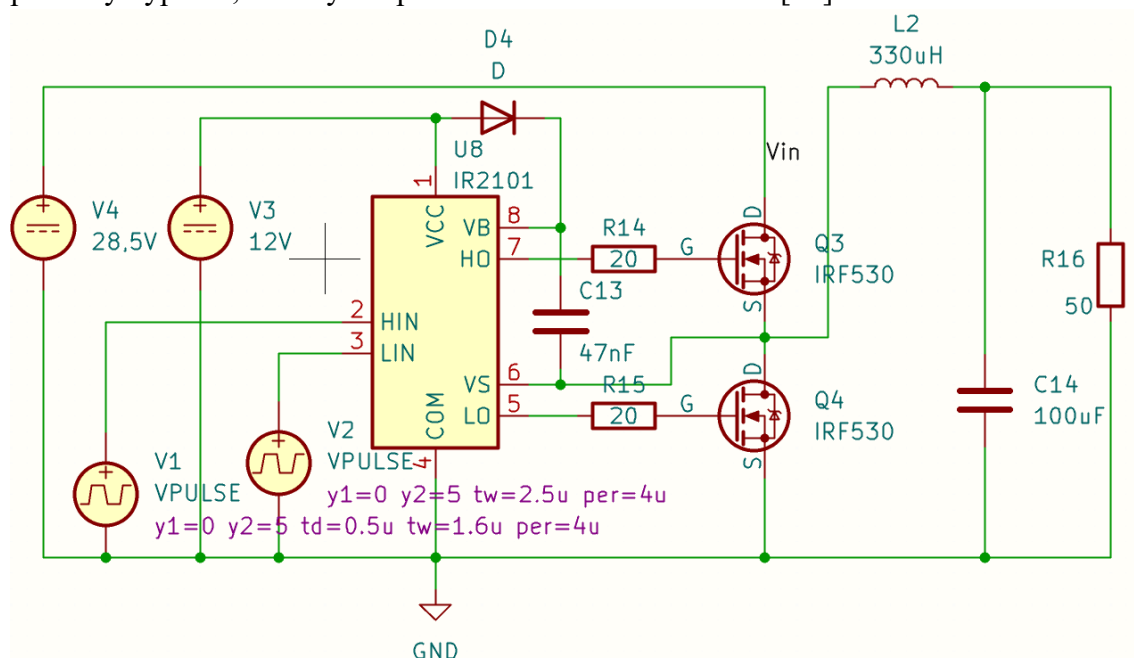
$$C_{MIN} = \frac{\left(\frac{1}{2\pi \cdot f}\right)^2}{L} = \frac{\left(\frac{1}{2\pi \cdot 1000}\right)^2}{0,00033} = 76,75 \mu F \quad (3.2)$$

vychází hodnota 76,75 μF a proto volím kondenzátor 100 μF.

V tuhle chvíli už jsou známy všechny hodnoty silové části buck zdroje, a může být provedena jednoduchá simulace silové části. Simulace byla provedena v programu LTspice. Všechny součástky až na IR2101, pro kterou byl získán model z oficiálních stránek výrobce [16], jsou součástí knihovny modelů pro LTspice. Přesný model tranzistoru nalezen nebyl, ale v knihovně se nachází tranzistor IRF530, který má rdsón 160 mΩ. Značně víc, než má zvolený tranzistor, a simulace tak nebude zcela přesná. Vyšší hodnota rdsón zhorší vlastnosti zdroje, ale alespoň simulace bude provedena s jistou rezervou.

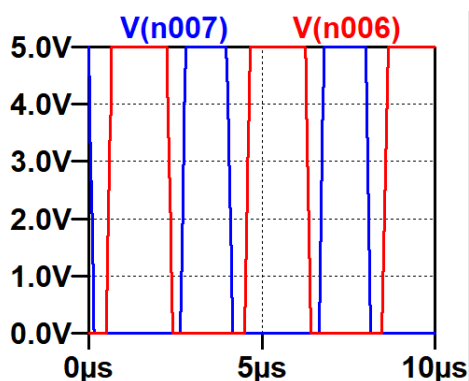
Napájecí napětí bylo zvoleno 28,5 V, stanovené nominální napětí v kapitole 2.3. Zvolený čip vyžaduje napájení v rozsahu 10 až 20 V [17], k tomu je vyžadovaný druhý zdroj, v simulaci V4. Odporů R3 a R4 pak mají funkci snížení nabíjecích proudů hradel, bez nich by budič vyžadoval příliš vysoký proud a mohlo by dojít k jeho poškození. Hodnota těchto odporů je nastavena odhadem na 20 Ω, ale až bude obvod sestaven dojde k do nastavení na hodnotu, kde bude budič odebírat co nejnižší proud, ale zároveň to postačí ke spínání tranzistorů na požadované frekvenci. Kondenzátor C1 je součástí „bootstrap“ obvodu, který uvnitř budiče vytvoří dostatečné napětí k sepnutí M1. Jeho

hodnota musí být dostatečně malá, aby napětí stihlo stoupnout na potřebnou hodnotu, ale musí být dostatečně vysoká, aby byl kondenzátor schopný nashromáždit a dodat dostatečné množství energie k sepnutí M1. Tato hodnota byla stanovena pomocí simulací, a následně experimentálně potvrzena na 22 nF. Výpočty cívky i kondenzátoru jsou převzaty výpočtů, dodanými společností Texas Instruments [18].



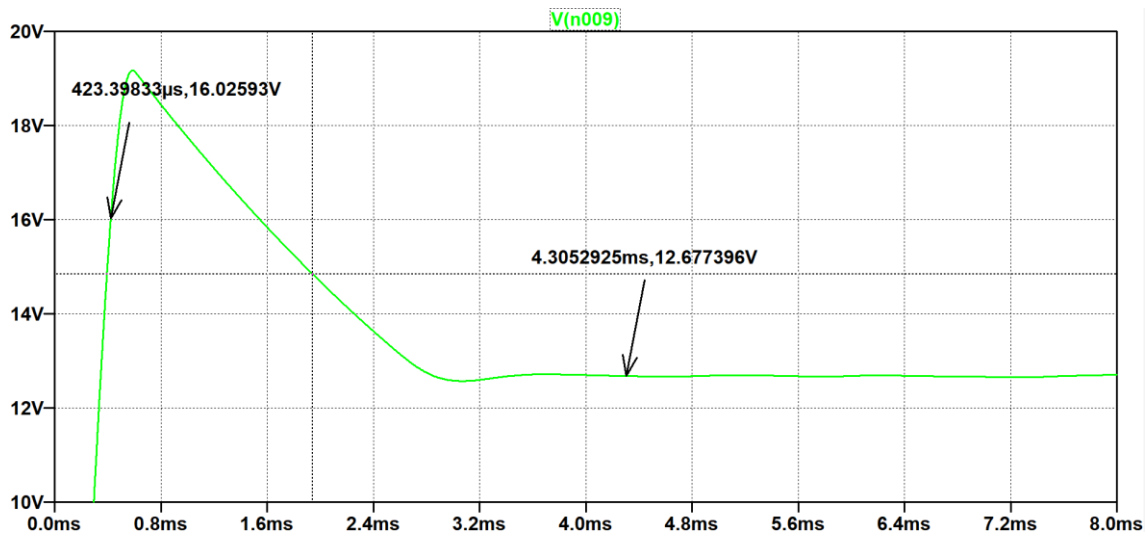
Obrázek 3.4 Schéma použité pro simulaci

Ve schématu na obrázku 3.4 zdroje V1 a V2 nahrazují výstupy mikroprocesoru. Frekvence pulsů je nastavena na 250 kHz a je nutné, aby se nepotkali, vyžadují mezeru mezi sebou. To je nastaveno časovým offsetem 0,5 uS pro signál V(n006), který pak řídí tranzistor M1, výsledné signály jsou viditelné na obrázku 3.5.



Obrázek 3.5 Ukázka průběhu řídicích signálů.





Obrázek 3.6 Výstupní napětí z obvodu na obrázku 3.4

Na obrázku 3.6, je uveden průběh výstupního napětí na odporu R1, který je zde náhradou za světlo PL14VNG. V průběhu jsou vyznačeny dva body, jeden značí čas, kdy došlo k překročení maximálního napětí doporučeného distributorem a druhý bod značí přibližný čas ustálení. Na čas ustálení má nejvyšší vliv výstupní kondenzátor, a nižší hodnota by mohla způsobit vyšší výstupní šum.

### 3.2.2 Návrh zdroje s topologií SEPIC

SEPIC topologie se skládá ze dvou cívek, které mají stejnou hodnotu, dvou kapacitorů, jednoho na výstupu a druhého, který obvod rozděluje na dvě části, diody a tranzistoru. Pro poměření oproti bucku, bude zdroj navrhnut na podobný rozměr jako buck.

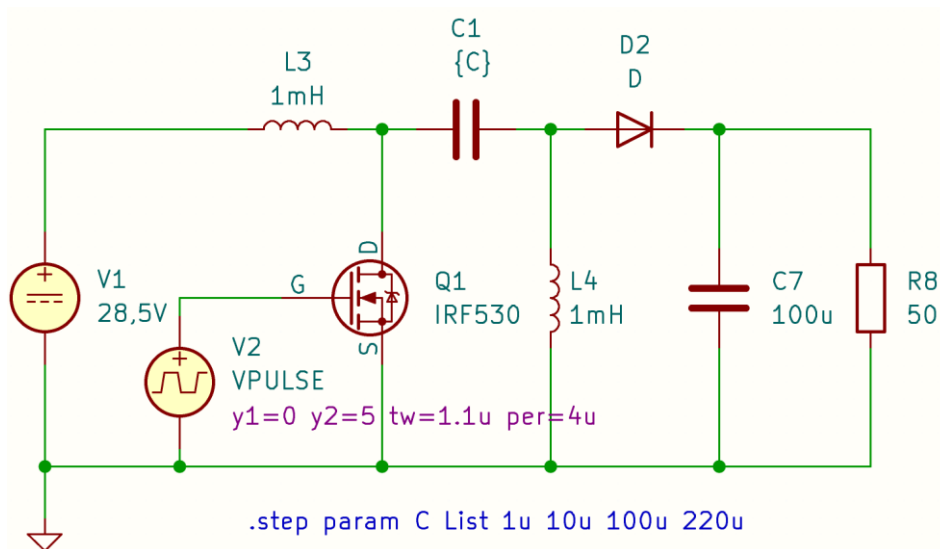
Prvním krokem je opět volba tranzistoru, tento zdroj bude obsahovat jen jeden, a může tak být o něco větší než u bucku. Zde byl zvolen FDB86563, s rds(on) 1,6 mΩ v pouzdře D2PAK. Při  $U_{gs}$  5 V se rds(on) pohybuje okolo 5 mΩ a není tak nutné obvod doplnit budičem.

Dále je nutné zjistit hodnotu cívky. K tomu je znova třeba spínací frekvence, vstupní a výstupní napětí, a požadovaný rozkmit proudu (IRIP). Napětí frekvence už jsou zvolené, zbývá jen IRIP. Ten bude prozatím zvolen na 0,2 A a následně v kombinaci s výsledky simulací zvolí řádná hodnota L. Orientační hodnota tedy vychází z rovnice:

$$L_{MIN} = U_{in} \cdot \frac{U_{OUT}}{f \cdot (U_{in} + U_{in}) \cdot I_{RIP}} = 28,5 \cdot \frac{12}{250000 \cdot (28,5 + 12) \cdot 0,2} = 168 \mu H. \quad (3.3)$$

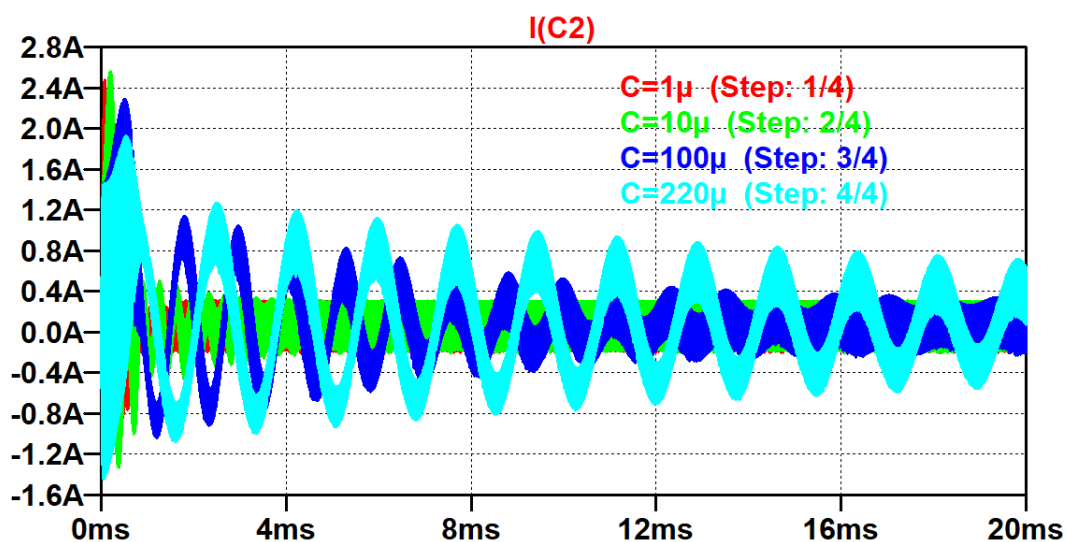
Specifikem zdrojů s topologií SEPIC je oddělovací kondenzátor. Ohledně jeho hodnoty na internetu bylo nalezeno doporučení [19](par. 6), že kondenzátor má být

přizpůsobený střídavým proudům, které skrz něj budou protékat, ale ohledně konkrétní hodnoty nebo vzorce nebyl nalezen. Vzhledem k tomu, že toto je poslední hodnota ze součástek, bude hodnota zvolena na základě simulace, kde budou poměřeny hodnoty 1  $\mu\text{F}$ , 10  $\mu\text{F}$ , 100  $\mu\text{F}$  a 220  $\mu\text{F}$ . [19]

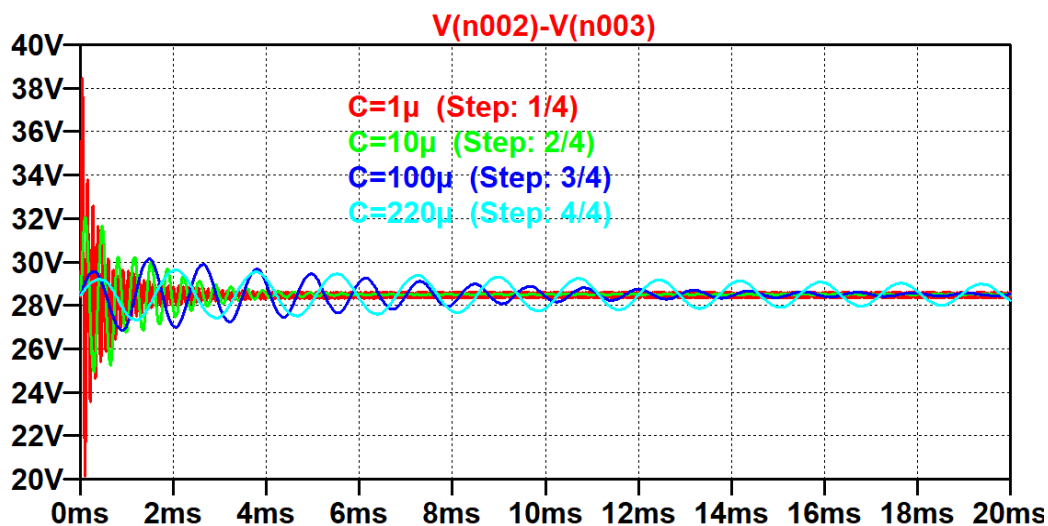


Obrázek 3.7 Schéma k simulaci pro zjištění hodnoty oddělovacího kapacitoru

Ve schématu v obrázku 3.7 je C1 dělicí kondenzátor, pro který se hledá hodnota. Pro hodnoty cívek je použita zjištěná hodnota z rovnice (3.3). Frekvence nastavena na 250 kHz a střída na přibližně 27,5 % (V1). Napájecí napětí je již stanovených 28,5 V (V2).



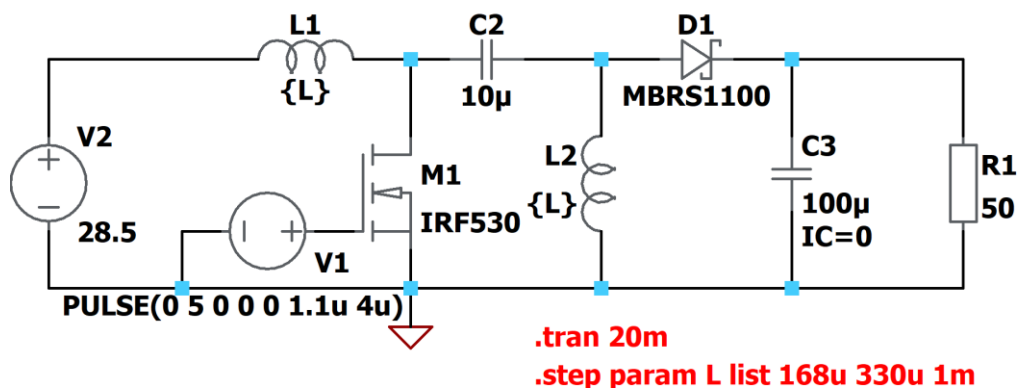
Obrázek 3.8 Průběh proudu na oddělovacím kondenzátoru



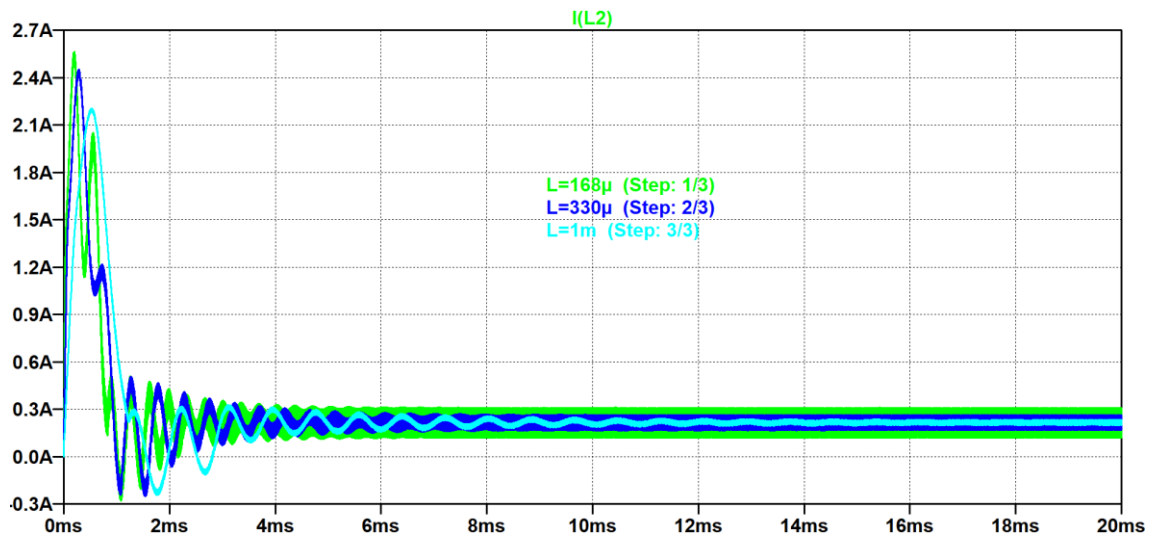
Obrázek 3.9 Průběh napětí na oddělovacím kondenzátoru

Na obrázcích 3.8 a 3.9 jsou viditelné průběhy na oddělovacím kondenzátoru. U každé testované hodnoty dojde eventuelně k ustálení průběhu na nominální hodnotu okolo které proud i napětí kmitá podobně při všech hodnotách, ale při vyšších hodnotách by delší doba ustálení mohla způsobit problémy při kompenzaci. Stejně jako u zdroje s topologií BUCK, tyto počáteční překmity vyřešit pomocí pomalejšího startu, kde střída nenabude nastavené hodnoty hned po startu programu, ale pomalu bude růst. Tím by se nejspíše vyřeší velké překmity jak velkých, tak i velkých hodnot, ale vzhledem k tomu, že v simulacích má změna této kapacity na výstup minimální vliv (mimo náběh), tak bude zvolena hodnota 10  $\mu\text{F}$ , která nemá oproti ostatním příliš vysoké napěťové překmity a doba ustálení je podobná kondenzátoru s hodnotou 1  $\mu\text{F}$  (2. nejkratší). Z průběhu je i viditelné, že pro kondenzátor postačí elektrická pevnost 50 V.

Ted' už zbývá jen stanovení hodnoty cívek L. Pro ni bude vyžit obvod ze schématu v obrázku 3.10, je stejný jako obvod 3.7, liší se jen v krokované hodnotě.



Obrázek 3.10 Schéma k simulaci pro zjištění hodnoty indukčnosti cívek

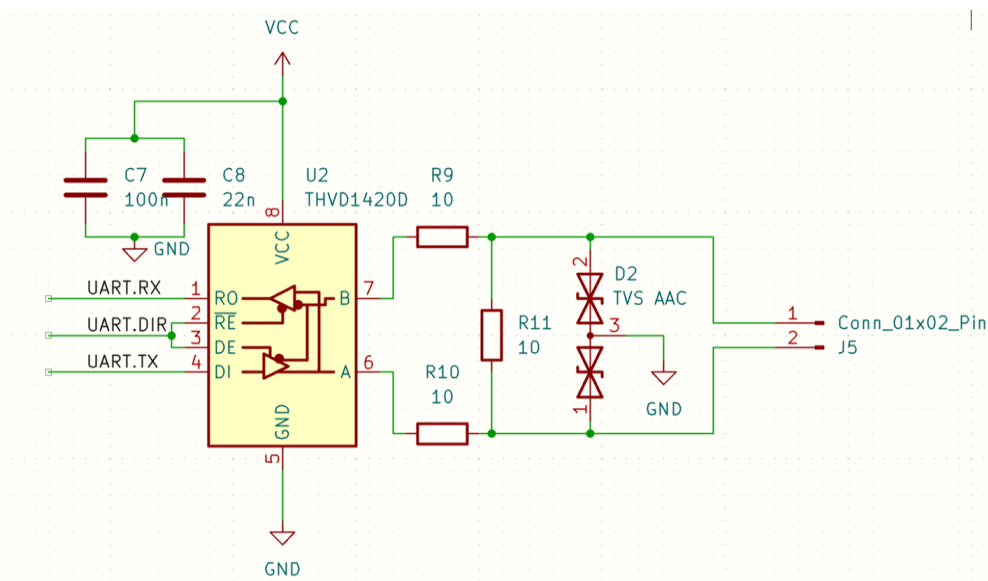


Obrázek 3.11 Průběh proudu na cívce L1

V obrázku 3.11 je uveden průběh proudu na L1. Co se týče vlivu na výstupní napětí, tak všech případech bylo dosaženo cílové hodnoty napětí a proudu. Hlavním rozdílem tedy je rozkmit v ustáleném stavu a při náběhu. V těchto dvou případech nejlépe vyšla indukčnost 1 mH, a to za relativně nízkou cenu co se týče velikosti. Měla by schopná udržet proud alespoň přibližně 300 mA.

### 3.2.3 Návrh číslicové části zdrojů

Číslicová část zdrojů se skládá z již zvoleného mikroprocesoru, rozhraní RS485. Tyto součástky jsou napájeny 5 V, a vyžadují tak samostatný zdroj, k tomuto účelu byl zvolen pololu-2843 [20]. Jako rozhraní rs485 byl THVD1420, v pouzdře SO-8. Výrobce spolu v datasheetu udává i doporučené zapojení včetně součástek [20].



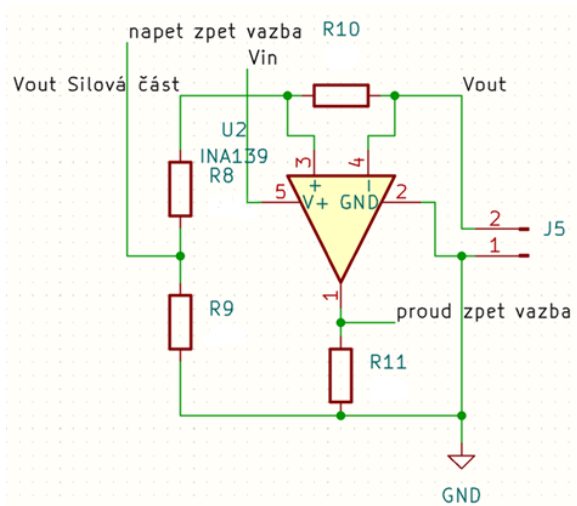
Obrázek 3.12 Převzaté schéma pro zapojení THVD1420 [21]

V číslicové části zdrojů pak už zbývá jen mikroprocesor. Ten vyžaduje ještě připojení k programátoru. Ten byl zvolen na začátku kapitoly zdrojů, pro určení spínací frekvence. Připojení k programátoru bude realizováno pomocí pěti pinového konektoru.

### 3.2.4 Návrh zpětné vazby

U zdrojů už chybí jen zpětná vazba.

Na obrázku 3.13 je schéma zpětné vazby, která se skládá z děliče napětí, který bude především pro zajištění, aby nedošlo k překročení napětí na světlech, a zesilovače INA139 [21], který bude zesilovat úbytek napětí na velmi malém rezistoru, 150 mΩ. Oba výstupy těchto zpětných vazeb budou analogové a přivedeny na příslušný pin mikroprocesoru.



Obrázek 3.13 Schéma zpětné vazby převzaté z části [21]

Napěťová zpětná vazba se skládá z napěťového děliče. Hodnota odporu R8 byla zvolena na 220 kΩ. Dělič bude spočítán na vstupní hodnotu napětí 32 V, a výstupním 4,5 V. Změřená hodnota napětí by se tedy při pracovních 12 V měla pohybovat okolo 1,6 V. Napětí na odporu R9 bude využito pro zpětnou vazbu a hodnota tohoto odporu je získána z rovnice:

$$U_{out} = \frac{I_{R10} \cdot R_{10} \cdot R_{11}}{1000} \quad (3.4)$$

$$R_9 = \frac{U_{out} \cdot R_8}{U_{in} - U_{out}} = \frac{4 \cdot 220000}{32 - 4} = 31625 \Omega. \quad (3.5)$$

Odporů pro napěťovou vazbu budou voleny z E24, 220 kΩ je v řadě a pro R9 byla zvolena hodnota 33 kΩ.

V proudové zpětné vazbě figurují odpory R10 a R11. Odpor R10 protéká proud do zátěže a napětí na něm je zesilovačem zesilováno podle funkce:

Proud na výkonnějším světle je 150 mA, maximální proud bude předpokládán na 250 mA. Hodnota odporu R10 by měla být co nejnižší, byla zvolena na 150 mΩ. To znamená, že odpor R11 lze získat z rovnice:

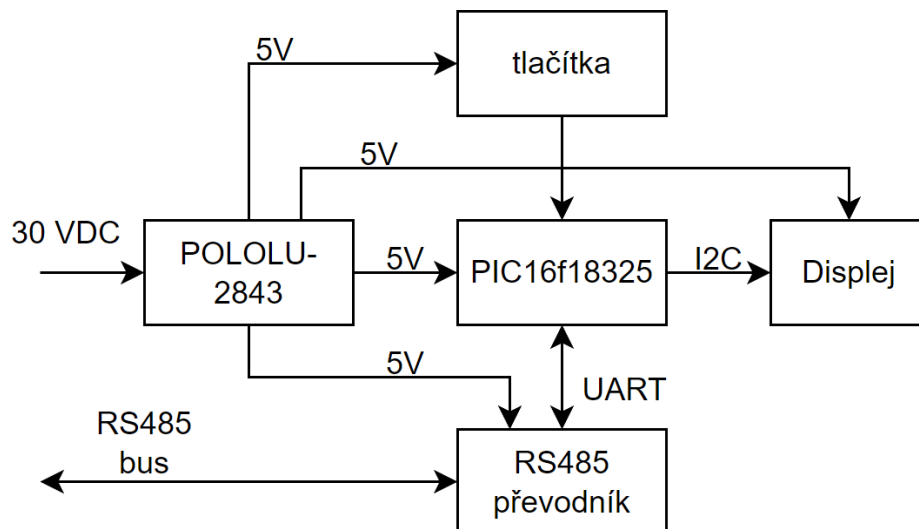
$$R_{11} = \frac{1000 \cdot U_{OUT}}{I_{R10} \cdot R_{10}} = \frac{1000 \cdot 4,5}{0,25 \cdot 0,15} = 120 \text{ k}\Omega. \quad (3.6)$$

Hodnota R11 je i přímo v řadě E24, stejně jako hodnota R10.

### 3.3 Návrh centrální jednotky

Centrální jednotka je složena z: uživatelského rozhraní, komunikačního rozhraní a mikroprocesoru, který bude tyto části řídit. Komunikační rozhraní bude mít stejné složení jako to, použité pro zdroje v podkapitole 3.2.3 a tady nebude dále zmiňována. Opět bude cílem zachovat co nejmenší velikost desky plošných spojů a ideálně využít pouze jednu vrstvu. Všechny součástky použité zde budou určeny pro napájení 5 V, a lze tak využít zdroj pololu-2843 s regulátorem D24V5F5, který byl už využit v podkapitole 3.2.3 .

Uživatelské rozhraní je zobrazeno v podkapitole koncepčního návrhu 3.1, na obrázku 3.2 . Skládá se z displeje pro zobrazování informací o zvoleném zdroji a čtyř tlačítek pro ovládání. Displej byl zvolen 0,91“ palcový monochromatický OLED displej, který je ovládán pomocí sběrnice I2C, s rozlišením 128x32 pixelů. Byl zvolen především kvůli své kompaktní velikosti a jednoduchosti ovládání. Jako tlačítka budou použité mikrospínače s rozměry 6x6 mm.



Obrázek 3.14 Blokový diagram centrální jednotky

V centru této jednotky bude mikroprocesor PIC16f15225. Ten bude obsluhovat sběrnici I2C pro displej, UART pro komunikaci s jednotlivými zdroji přes rs485 a tlačítka. Do zdrojů bude odesílat pouze nastavenou hodnotu, přijímat pak bude naměřený proud ze zdroje a ten bude zobrazovat na displeji. Nebude si ukládat nastavené hodnoty, ty budou uloženy v jednotlivých zdrojích, které tak budou moct fungovat i bez této jednotky. Na obrázku 3.14 je blokové schéma, výše popsané centrální jednotky.

## 4. REALIZACE

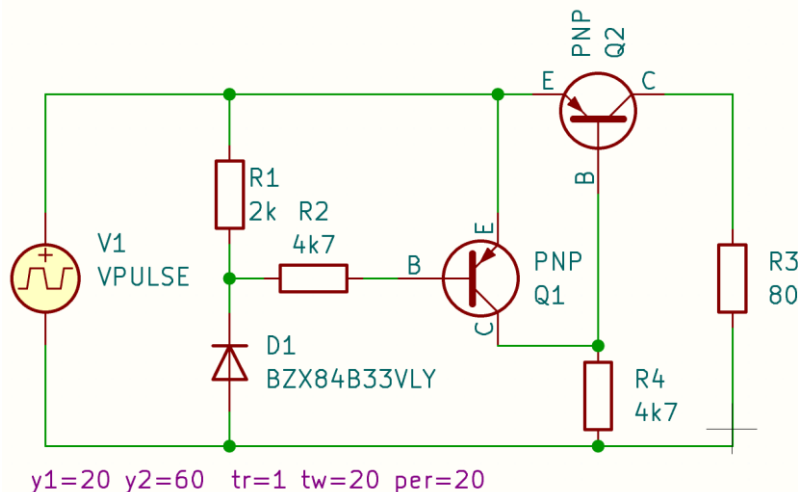
Jednotlivé obvody jsou syntézou bloků navržených v předchozí kapitole. Některé součástky ještě nebyly určeny, ty jsou v této kapitole doplněny. Kompletní schéma jednotlivých obvodů byly vytvořeny v programu Kicad, kde byly následně vytvořeny i desky plošných spojů. Které byly pak v domácích podmínkách vyvolány a osazeny. Jednotlivá schémata a obvody jsou v příloze Příloha A -.

### 4.1 Přepět'ová ochrana

Momentálně ještě chybí přepět'ová ochrana, aby zdroj mohl splnit paragraf 2.4 normy ETSS-C71, ta nebude řešena přímo na DPS, protože by desky značně zvětšila a ve finálním řešení by byla společná pro všechny moduly, také se zde nenachází žádné programy nebo jiné komplexní problémy.

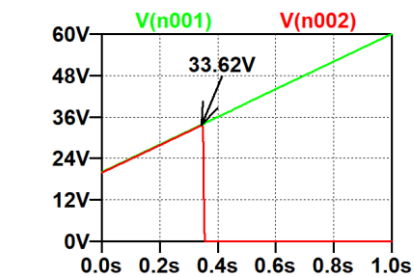
Pro splnění normy je požadováno, aby zdroj vydržel přepět'í 50%, v tomto případě přibližně 44 V po dobu alespoň pěti minut. Při tomto přepět'í by měl zdroj být schopen stále dodávat maximální výkon.

Navržená ochrana se skládá z kombinace dvou obvodů, z klasického regulátoru sestaveného pomocí zenerovy diody a přepět'ové ochrany, která se skládá z PNP tranzistorů.

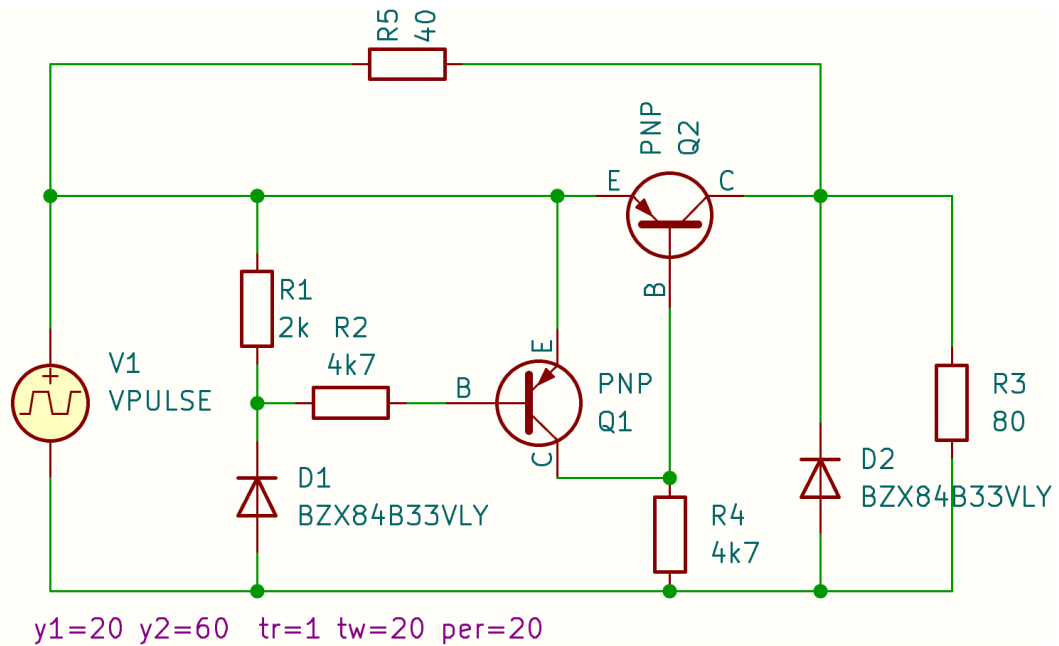


Obrázek 4.1 Schéma přepět'ové ochrany z PNP tranzistorů [21]

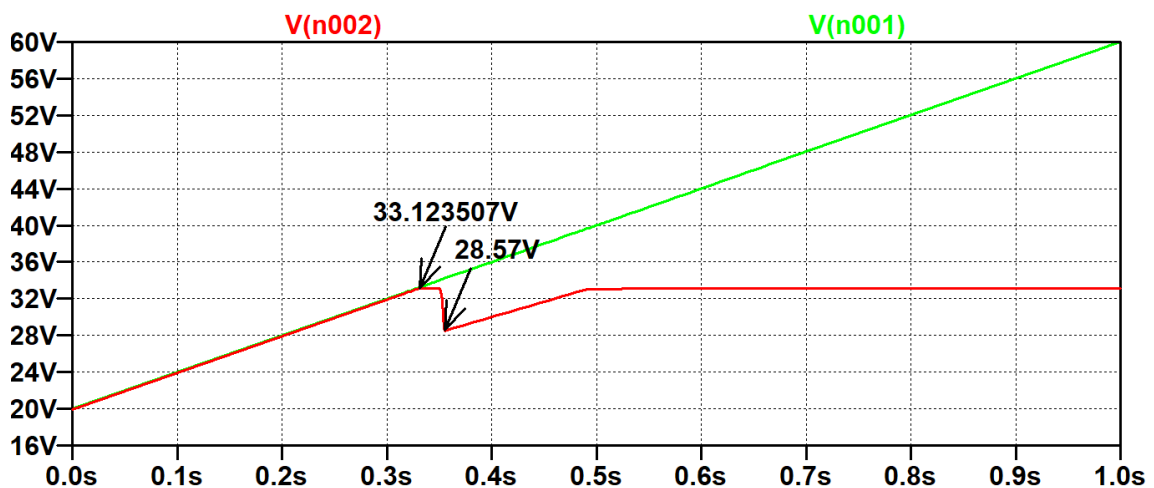
Obvod přepět'ové ochrany je zobrazen na obrázku 4.1 [22] a jeho hlavní výhodou je, že při normálním stavu jsou na něm téměř nulové ztráty, ale jakmile dojde k přepět'í a zavření tranzistoru Q2, tak je obvod odpojený od napájení a nemůže tak fungovat. Vizte obrázek 4.2



Obrázek 4.2 Vstupní a výstupní napětí PNP ochrany



Obrázek 4.3 Schéma celé přepět'ové ochrany



Obrázek 4.4 Průběh napětí na přepět'ové ochraně

V obrázku 4.3 je zobrazeno kompletní schéma navržené ochrany. V obvodu jsou použity zenerovy diody s prahovým napětím 33 V, tranzistory zde nejsou tak důležité. V obrázku 4.4 je pak uveden průběh napětí na ochraně, kde V(n002) je výstupní napětí a V(n001) je vstupní. Je zřejmé, že v bodě 33,123 V, dochází k omezení napětí diodou D4, a poklesu na hodnotu 28,57 V. V bodě 33,62, jak je zřetelné v obrázku 4.2 se tranzistor Q4 zcela uzavírá a proud teče skrze R11, který tak vytvoří velké ztráty, ale zachová funkčnost obvodu. Podle simulací by musel být dimenzovaný alespoň na 6 W.



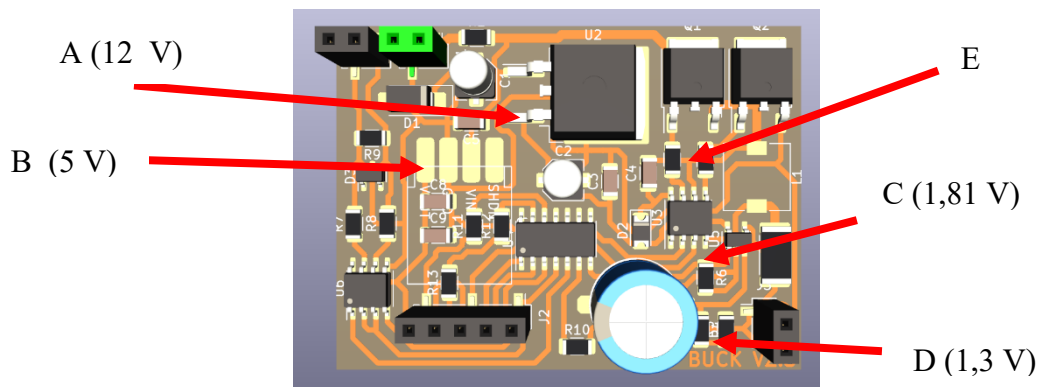
## 4.2 Realizace zdroje s topologií BUCK

Pro topologii BUCK byly téměř všechny součástky určeny. Chybí jen zdroj pro napájení budiče NMOS tranzistorů. Tento budič má napájecí napětí v rozsahu 10 až 20 V a pouze spíná NMOS tranzistory, které potřebují proud jen pro nabití hradel, po nabití už vyžadují téměř nulový proud. Průměrná zátěž na tento zdroj bude relativně nízká. Proto je zde zvolen lineární zdroj 7812, který po připojení napájecího napětí nastaví pevnou hodnotu 12 V.

Další hodnota, které nebyla ještě určena pak je hodnota odporů R2 a R3. Ta byla zjištěna po sestavení experimentální hodnotou. Při prvotní hodnotě 20  $\Omega$ , byly tranzistory spolehlivě spínány, ale překvapivě nabíjení hradel bylo příliš velkou zátěží pro regulátor 7812 a vykazoval značné ztráty, zahříval se. Při zvýšení hodnoty na 500  $\Omega$ , zůstal regulátor chladný na dotek, ale vysoké ztráty pak vykazovaly spínací tranzistory. Střední hodnota byla tedy experimentálně zjištěna na 135  $\Omega$ , kde je dosaženo jistého vyvážení ztrát na tranzistorech a regulátoru. Byla dosažena pomocí dvou rezistorů s hodnotou 270  $\Omega$  v paralelním zapojení.

Vstupní proud při zátěži 200 mA a 12 V se pohyboval okolo 120 mA a pojistka na vstup tak byla zvolena na proud 250 mA, BSMD-0,25A.

Sestavený zdroj je viditelný na obrázku 4.5, celé schéma je pak součástí přílohy A.3



Obrázek 4.5 3D model zdroje s topologií BUCK

Pro ověření základní funkčnosti byly v bodech A až D změřena napětí. V bodě B je výstup 5 V zdroje a nacházela se zde hodnota 5,1 V. V bodě A je výstup 12 V regulátoru, napětí zde bylo přesně 5 V. V bodě C bylo při výstupním proudu 100 mA naměřeno napětí 1,81 V, což přibližně odpovídá teoretické hodnotě 1,8 V. Jako předposlední byl změřen bod D, při výstupním napětí 10 V, naměřená hodnota byla 1,3 V, což přesně odpovídá teoretické hodnotě 1,3 V. Nakonec bylo pomocí osciloskopu změřen průběh napětí v bodě E pro ověření funkčnosti procesoru a budiče. Naměřený průběh odpovídal očekávání.

### 4.3 Realizace zdroje s topologií SEPIC

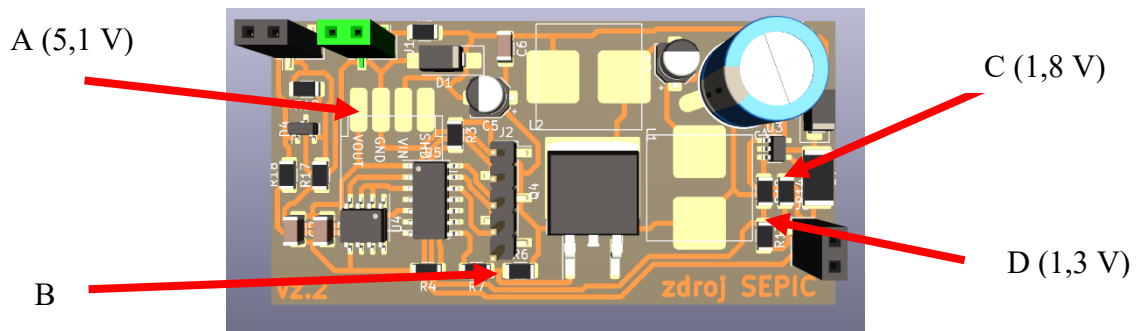
Pro sepic žádné hodnoty nechyběly, a byl tak sestaven přesně podle navržených bloků.

Po sestavení ale vznikl problém, že zvolený tranzistor měl příliš vysoký potřebný náboj hradla k sepnutí, byl nahrazen tranzistorem, který má tuto hodnotu nižší, byl použit ten co byl už použit pro spínání BUCK zdroje. Bylo nutné také upravit odpory. Pro odpor omezující proud nabíjení hradla byl nahrazen stejnou hodnotou stejnou jako u BUCK zdroje, tedy  $135 \Omega$ , a vybíjecí rezistor byl nahrazen hodnotou  $1 \text{ k}\Omega$ . Musel být brán ohled na maximální možný proud z brány mikroprocesoru.

Při testování vznikl i další problém, kde zvolený kondenzátor nepropouštěl dostatek proudu na výstup. Jeho hodnota byla zvýšena na  $100 \mu\text{F}$ , při které už přenášel dostatečně.

Sestrojený obvod měl při nižší zátěži relativně nízký vstupní proud, ale při navýšení výstupního proudu prudce rostl, pojistka zde byla zvolená stejná jako u BUCKU.

Sestavený zdroj je viditelný na obrázku 4.6, celé schéma je pak součástí přílohy A.2



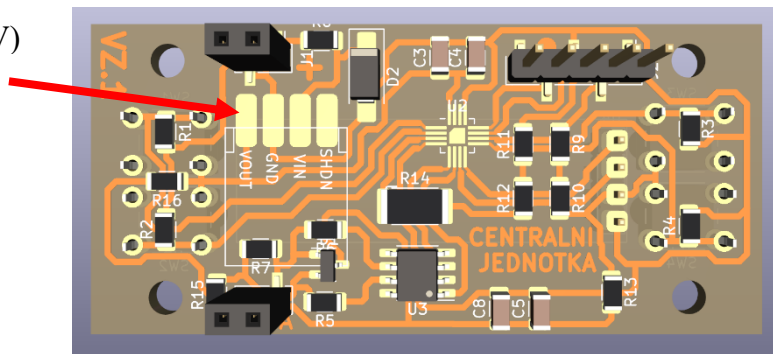
Obrázek 4.6 3D model zdroje se SEPIC topologií

Po sestavení bylo opět provedeno základní měření pro ověření funkce jednotlivých součástek. V bodě A bylo změřeno výstupní napětí  $5 \text{ V}$  zdroj, a hodnota  $5,1 \text{ V}$  byla změřena. V bodě C při proudu  $100 \text{ mA}$  bylo změřeno napětí  $1,8$ , což přesně odpovídá teoretické hodnotě. V bodě D pak proběhlo změření funkčnosti napěťové zpětné vazby, při výstupním napětí  $10 \text{ V}$ . Změřená hodnota  $1,3 \text{ V}$  odpovídala vypočtené hodnotě. V bodě B se pak nacházel očekávaný průběh PWM.

### 4.4 Realizace centrální jednotky

Sestavení centrální jednotky proběhlo bez větších problémů, byla sestavena s procesorem PIC16F15225, v pouzdře QFN16 a s výše zvoleným displejem, který byl jednoduchým programkem otestován. Zde se vstupní proud pohyboval okolo  $10 \text{ mA}$ . Vzhledem k tomu, že se v tomto obvodu nenacházel žádný aktivní prvek, který by mohl způsobit neočekávané výkyvy jen procesor, displej, převodník a tlačítka tak pojistka byla zde nahrazena nulovým odporem. A.1

A (5,1 V)



Obrázek 4.7 Sestavená centrální jednotka

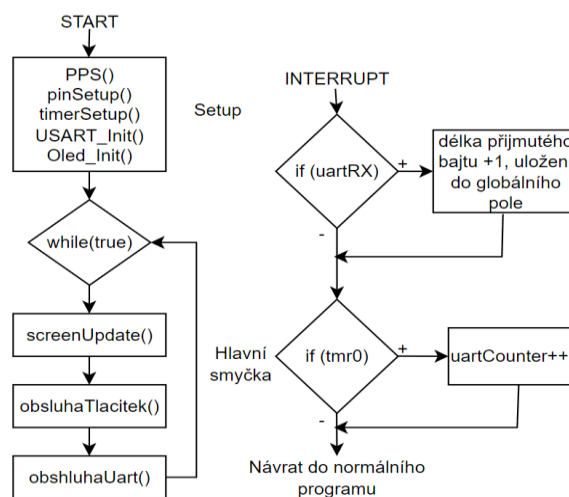
Na centrální jednotce se nachází pouze napájecí napětí, a napětí 5 V zdroje, to bylo změřeno v bodě A, jako 5,1 V. Funkce tlačítek a displeje byla ověřena pomocí jednoduchého programu, který reagoval zobrazením pixelů na displeji při stisku tlačítek.

## 4.5 Vytvoření programů

Všechny programy a knihovny byly vytvořeny v prostředí MPLAB, všechny části kódu byly vytvořeny účelově pro tuto práci, až na dvě výjimky, knihovny pro ovládání displeje, byl převzat z [24] a knihovna pro ovládání I2C sběrnice ten byl inspirován z lekcí ze cvičení předmětu NRP [23]. Program pro zdroje je se mezi topologiemi prakticky neliší až na detaily. Ostatní informace ohledně registrů a podobně jsou z příslušných technických listů, pro pic16F15225 a pro pic16f18325.

### 4.5.1 Program pro centrální jednotku

Program centrální jednotky se dá rozložit do několika základních bloků, SETUP, screenUpdate, obsluhaTlacitek a obsluhaUART. Poslední tři bloky, jsou uzavřeny v permanentní while smyčce, která se pořád opakuje. SETUP blok, se skládá z funkcí, které nastavují PPS, periferie a časovač potřebný pro jednotlivé funkce. Mimo hlavní smyčku, dojde za určitých podmínek k vyvolání přerušení, kde program, pokud byl přijat nějaký bajt přidává bajt do pole, a přičítá k délce zprávy. Pokud bylo přerušení vyvoláno časovačem 0, je přičtena 1 k proměnné, která ovládá vypršení komunikace, a také odesílání pingů do jednotlivých zdrojů.



Obrázek 4.8 Blokový diagram programu pro centrální jednotku

**ScreenUpdate** funkce, se skládá z jedné podmínky, která pokud má proměnná „updateNeeded“ hodnotu 1, odesílá nová data do displeje, pokud je hodnota proměnné 0, funkce nic nedělá, a program skrz ni pouze prochází.

**ObsluhaTlacitek** vyčítá jednotlivé stavy pinů, který byly připojeny k tlačítkům. Pokud je alespoň jedno tlačítko detekováno jako ve zmáčknutém stavu, je proměnná updateNeeded nastavena do jedné, a na základě zmáčknutého tlačítka se upraví nějaká z globálních proměnných.

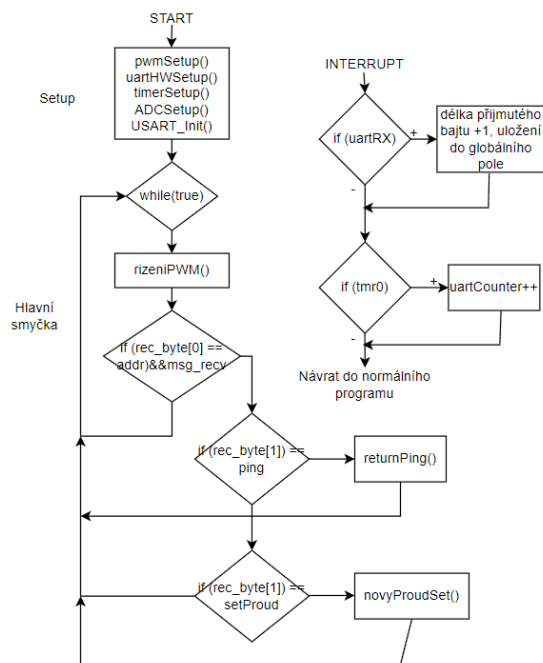
**ObsluhaUart** se skládá ze dvou podmínek. První podmínka, čeká na nastavení proměnné „msg\_recv“ do stavu 1. Pokud k tomuto dojde, znamená to, že byla detekována ukončovací hodnota zprávy (255), dojde ke krátké kontrole příchozích dat, délka by měla odpovídat čtyřem bajtům a první bajt by měl být shodný s adresou zdroje, do kterého byl odeslán ping, pokud tomu je tak jsou zobrazované hodnoty aktualizovány hodnotami v příchozí zprávě. Druhá podmínka této funkce odesílá pingy, v závislosti na hodnotě proměnné uartCounter, která je přičítaná v interruptu. Pokud byla již zpráva odeslána, a proměnná přesáhla hodnotu „pingPerioda“, tak je spojení předpokládáné jako ztracené. Po chvíli je znova odeslán ping, a proces se opakuje.

#### 4.5.2 Program pro číslicové části zdrojů

Program pro zdroje je, co se týče principu stejný, jediné místo, kde se liší, jsou spínací frekvence. Program začíná skupinou inicializačních funkcí jednotlivých periférií a následně vstupuje do smyčky, kde je už jen funkce rizeniPWM a jednoduchá podmínka.

Ve funkci rizeniPWM dochází k načítání hodnot z analogových vstupů zpětné vazby a následného přenastavení střídý PWM. Mezi jednotlivými měřeními, je pauza 100 us, která je třeba pro nabití vzorkovacího kondenzátoru, a také je měření vstupů prokládáno připojováním kondenzátor na vestavěnou zem, pro rychlejší vynulování AD převodníku.

Podmínka se zde kontroluje stav bajtu rec\_byte[0], který obsahuje adresu, na kterou je zpráva cílena. Pokud je shodná s adresou nastavenou v programu, zkontroluje zdali byla detekována přijatá zpráva a následně buď vrací ping, nebo ukládá novou hodnotu přímo do paměti EEPROM, a následně odesílá ping s nově nastavenou hodnotou.



Obrázek 4.9 Blokový diagram programu pro zdroje

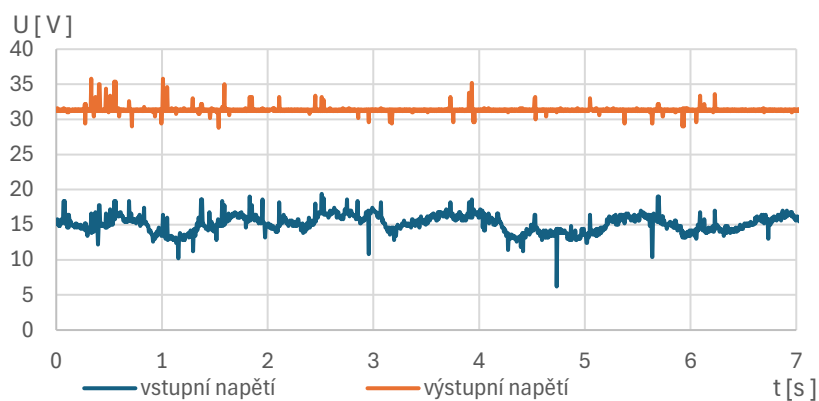
Součástí programu je i přerušení, který dělá prakticky to samé jako u centrální jednotky, obsluhuje příchozí bajty přes UART a počítá uartCounter, který při přesažení délky čekání vynuluje počítadlo příchozích bajtů.

## 4.6 Experimentální potvrzení vlastností měničů

Pro potvrzení funkcí jednotlivých zdrojů byly změřeno několik průběhů v různých bodech obvodu. Výsledkem byly průběhy zobrazené níže.

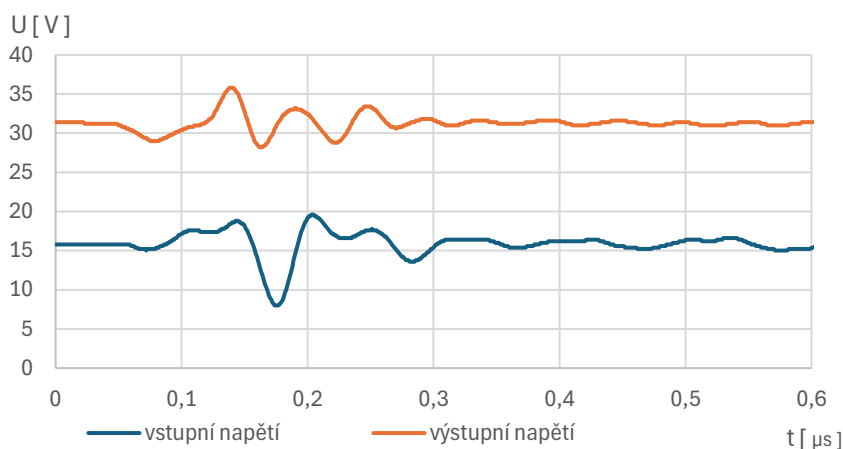
### 4.6.1 Průběhy zdroje BUCK

První průběh změřený pro zdroj BUCK je viditelný v grafu na obrázku 4.10. Je zde zřejmé značné zvlnění oproti vstupnímu napětí, ale také značný vysoko frekvenční šum. Tento šum je zobrazen v detailu v grafu na obrázku 4.11. Detailnější pohled na výstupní napětí je v grafu na obrázku 4.12.



Obrázek 4.10 Průběh vstupního a výstupního napětí BUCKU

Vysokofrekvenční šum kmitá okolo střední hodnoty, v tomto případě 15 V v rozsahu 7 až 20 V, s frekvencí 250 kHz, což je spínací frekvence zdroje a projevuje se i na vstupním napětí.



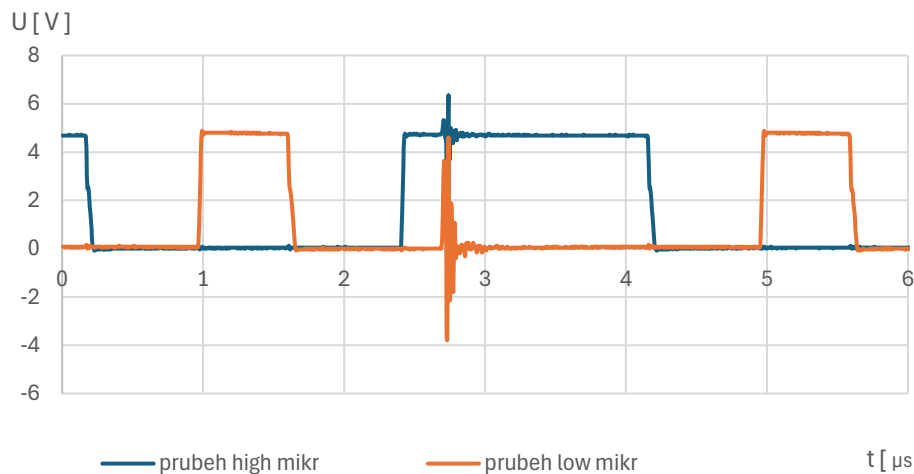
Obrázek 4.11 Přibližný VF šum na vstupu i výstupu zdroje BUCK



Obrázek 4.12 Detailní pohled na výstupní napětí zdroje BUCK

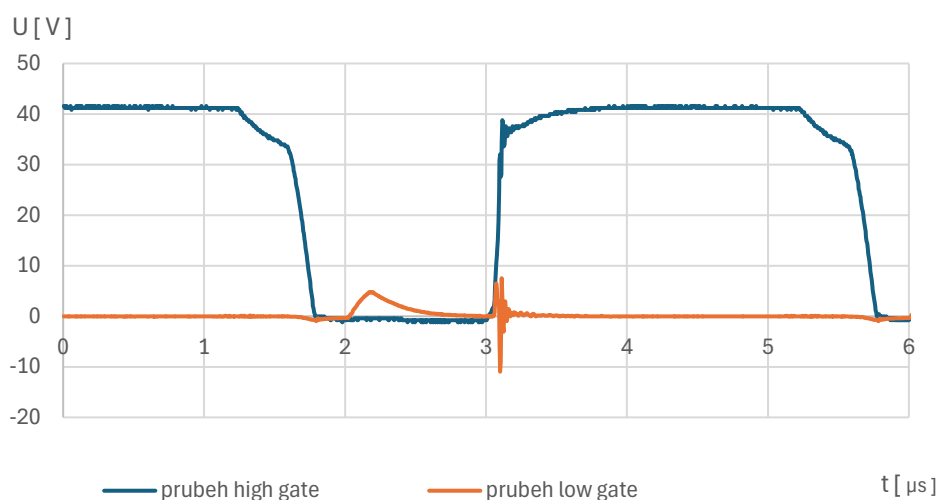
V detailnějším zobrazení je jasně zřetelný jak značný VF šum, tak i značné zvlnění výstupu. Pokud bude VF šum pominut, tak vidíme, že výstup osciluje přibližně okolo 15 V, mezi hodnotou 13 V a 17 V.

Dalšími důležitými průběhy jsou řídicí signály PWM, a to jak přímo za výstupem z mikroprocesoru, tak na výstupu budiče. Na obrázku 4.13 jsou zobrazeny průběhy řídicího signálu PWM přímo na výstupu mikroprocesoru.



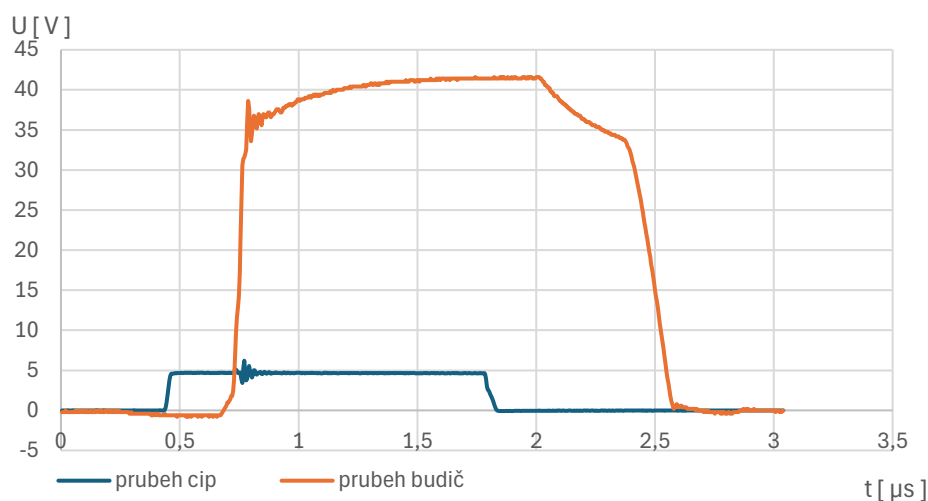
Obrázek 4.13 Průběh PWM signálu vystupujících z mikroprocesoru.

Na průběhy signálů jsou podle očekávání, až na úsek mezi 2 a 3 mikrosekundou průběhu, kde se objevuje značný překmit, pro „high side“ signál je relativně malý, přibližně od 3,5 V až po 6,5 V, oproti překmitu „low side“ signálu, ten dosahuje hodnot -4 V až 4,5 V. Tento překmit se opakuje vždy na stejném místě spolu s řídicím signálem, je to nejspíš způsobeno zpětným ráz skrze budič, ale snaha o eliminaci vhodným použitím kondenzátorů a odporů byla neúspěšná. Nepodařilo se ani zjistit co je zdrojem tohoto překmitu. Objevuje se přibližně 0,3  $\mu$ s po úplném zapnutí „high side“ signálu.



Obrázek 4.14 Průběh PWM signálu vystupujících z mikroprocesoru.

Dalšími změřenými průběhy, byly výstupy budiče. Na průběhu je jasně zřetelné zvýšené napětí, které je třeba pro sepnutí NMOS tranzistoru, a také je zřejmé, že náběh napětí na „low side“ je velmi pomalý, ale dosahuje hodnoty 5 V, což stačí pro otevření „low side“ tranzistoru. Také je v průběhu opět jasně zřetelný překmit, přibližně v čase sepnutí „high side“ tranzistoru.



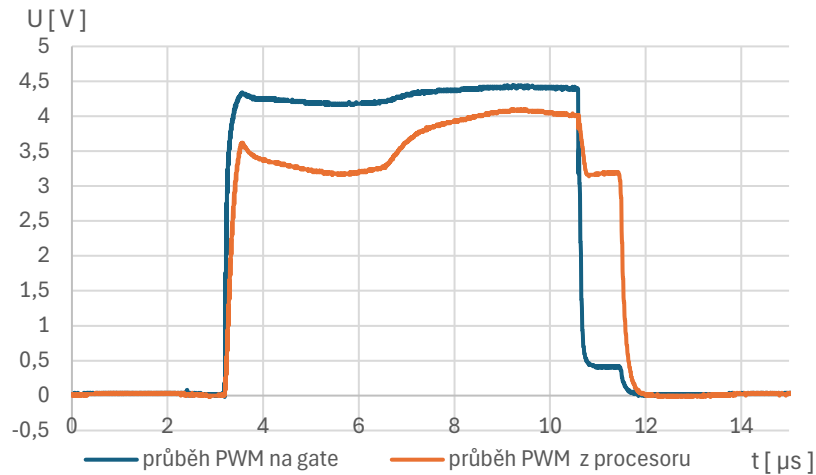
Obrázek 4.15 Průběh PWM signálu vystupujících z mikroprocesoru.

Posledním změřeným průběhem pro zdroj typu BUCK, byl průběh závislosti výstupního napětí budiče pro „high side“ na řídicím signálu PWM. V grafu je uveden průběh PWM z čipu, včetně rozkmitu, který nastává přibližně 0,3  $\mu$ s po dosažení 5 V. Výstupní signál z budiče, je zpožděn také přibližně okolo hranice 0,3  $\mu$ s.

Výše uvedené průběhy, byly naměřeny při nastaveném výstupním proudu 150 mA na zátěži 100  $\Omega$  a spínací frekvenci 250 kHz. Použitý osciloskop byl Owon SDS6062V a laboratorní zdroj značky Geti GLPS 3005.

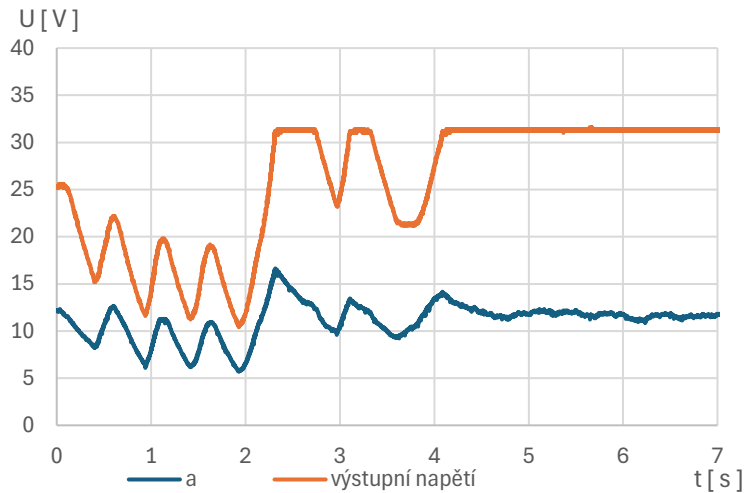
#### 4.6.2 Průběhy zdroje SEPIC

Frekvence musel být na SEPICU stažena na 40 kHz, proto prvním měřeným průběhem byly průběhy napětí na bráně tranzistoru, a na výstupu mikroprocesoru. Na grafu v obrázku jsou tyto průběhy uvedeny.



Obrázek 4.16 Průběh PWM signálu z mikroprocesoru a na bráně tranzistoru

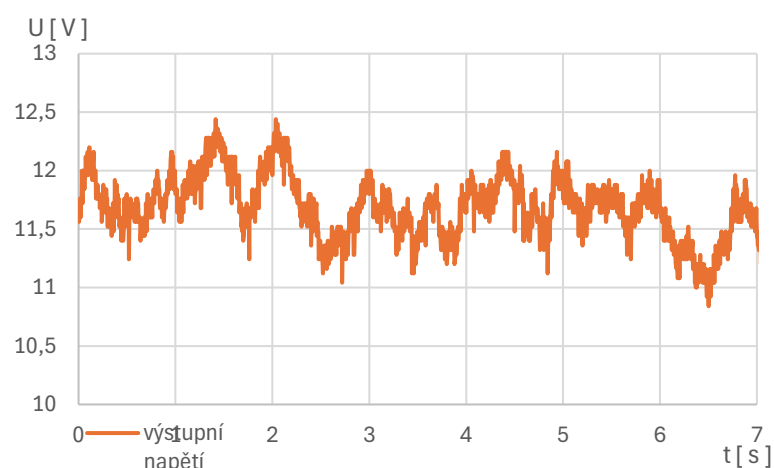
V průběhu na obrázku 4.16 je zřetelné, že mikroprocesor je oproti budiči relativně měkký zdroj, má problém nabíjet hradlo, i když zde nakonec dokázal hradlo nabít, budič by dovolil vyšší frekvenci.



Obrázek 4.17 Závislost výstupního napětí na vstupním

Na obrázku 4.17 je uveden průběh výstupního napětí při proměnlivém vstupním napětí. Na průběhu jsou zřetelné pokusy zdroje o regulaci. Když změny byly pomalejší, dařilo se zdroji výstup relativně uregulovat. Ve stejném průběhu je i výstupní napětí při konstantním vstupním napětí. Výstupní napětí je stabilnější, a ani na jednom se nenachází VF rušení, které se nacházelo u BUCK zdroje.





Obrázek 4.18 Detail výstupního napětí SEPIC

Výstupní je uvedeno na obrázku 4.18. Napětí stále osciluje kolem určité hodnoty, ale oproti BUCK zdroji, značně méně, také zde chybí VF rušení, který bylo značné u předchozího zdroje. V průběhu je minimální napětí 11,8 V a maximální napětí 12,5 V.

Dále byla změřena efektivita zdrojů, která byla následně uvedena do tabulek 4.1 a 4.2.

Tabulka 4.1 Naměřené hodnoty, při nastaveném proudu 50 mA

| zdroj @50mA | U <sub>in</sub> [ V ] | I <sub>in</sub> [ mA ] | U <sub>out</sub> [ V ] | I <sub>out</sub> [ mA ] | ef [ % ] |
|-------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|----------|
| BUCK        | 30,1                  | 0,08                   | 11,7                   | 0,08                    | 0,39     |
|             | 24                    | 0,09                   | 11,9                   | 0,06                    | 0,33     |
| SEPIC       | 30                    | 0,04                   | 12                     | 0,06                    | 0,6      |
|             | 24                    | 0,06                   | 12                     | 0,08                    | 0,67     |

Tabulka 4.2 Naměřené hodnoty, při nastaveném proudu 150 mA

| zdroj @150mA | U <sub>in</sub> [ V ] | I <sub>in</sub> [ mA ] | U <sub>out</sub> [ V ] | I <sub>out</sub> [ mA ] | ef [ % ] |
|--------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|----------|
| BUCK         | 30,1                  | 0,11                   | 12                     | 0,16                    | 0,58     |
|              | 24                    | 0,13                   | 12,1                   | 0,16                    | 0,62     |
| SEPIC        | 30,1                  | 0,16                   | 12,3                   | 0,16                    | 0,40     |
|              | 24                    | 0,19                   | 12                     | 0,16                    | 0,42     |

Při zkratování kontaktů, nedošlo k dodržení maximální hodnoty nastavené v programu, zdroje se snažily proud stále regulovat, a i když otevíraly tranzistory pouze velmi krátce, byly vstupní proudy značné, pro SEPIC 1A, pro BUCK 2,4 A. Docházelo i ke značnému zahřátí součástek. Po minutě byl zkrat odstraněn, po pěti minutách zdroje byly zapojeny zpět na normální zátěž a stále fungovaly, i když se sníženou efektivitou, což bylo nejspíš způsobeno vyšším r<sub>ds(on)</sub>, kvůli vyšším teplotám tranzistorů.

## 5. ZÁVĚR

V první kapitole této práce, byly krátce shrnuty informace o osvětlení v leteckém průmyslu, včetně častých typů světél a používaných technologií. Také byly zmíněny způsoby připojení do elektrické sítě letadel. Nakonec byly uvedeny základní topologie spínaných zdrojů. První kapitola je zakončena krátkým shrnutím vlastností jednotlivých topologií ve formě tabulky a krátkého textu, na základě čehož jsou zvoleny dvě topologie.

V druhé kapitole, byla vybrána světla, která pak fungovala jako model, pro který byly zdroje navrženy. Byly zmíněny jejich pracovní podmínky z pohledu napájení. Následně byl uveden krátký výpis z normy ETSO-C71, kterou by na konci měli zdroje splňovat. Dále byla probrána elektrická síť malého letadla, kde bylo zjištěno, zdali světla musí fungovat i při bateriovém režimu, a také samotný rozsah napájecího napětí. Nakonec byly zvoleny dvě vhodné topologie, pro které byly v dalších kapitolách navrženy zdroje.

Ve třetí kapitole byl proveden návrh. Byly provedeny výpočty jednotlivých součástí ze všech částí zdrojů, kde to bylo nutné, tedy zpětná vazba a silová část. Některé hodnoty byly stanoveny na základě simulací, a některé byly ponechány do fáze realizace, kde pak byly zvoleny nejvhodnější hodnoty. Navržené řešení se skládá z centrální jednotky, která ovládá a komunikuje s jednotlivými zdroji pomocí RS485 sběrnice.

Následně byla provedena realizace. Součástí požadavků, stanovených v normě byla i odolnost přepětí, ta byla v poslední kapitole navržena a od simulována. Následně byly provedeny realizace jednotlivých zdrojů, a centrální jednotky. Pro SEPIC, byly všechny hodnoty stanoveny při návrhu, ale při prvotním testování se projevil jako nefunkční při spínací frekvenci 250 kHz, ta byla tedy snížena na 40 kHz, kde už fungoval. Také byl vyměněn zvolený tranzistor, protože vyžadoval příliš vysoké množství energie k dobití hradla, kterou nebyl mikroprocesor schopen dodat. Zvolený oddělovací kondenzátor se také projevil jako neúčinný, byl tedy nahrazen jiným, se značně vyšší hodnotou. Zdroj s topologií BUCK byl až na odpory na hradla tranzistorů zcela navržen. Jejich hodnota byla stanovena experimentálně. Následně byly vytvořeny programy pro řízení těchto zdrojů, byly zde krátce popsány.

Nakonec, bylo provedeno experimentální potvrzení funkčnosti zdrojů, a jejich souladem se zvolenou normou.

Zdroj s topologií BUCK, značně trpěl na VF zvlnění, toto zvlnění je viditelné na všech změřených průbězích. Z naměřených průběhů, je zjevné, že toto zvlnění se objevuje při spínání cívky, a šlo by tak možná částečně, nebo zcela odstranit změnou hodnoty, protože součástí výpočtů, je hodnota zvlnění proudu na této cívce, při zvyšování této hodnoty, klesá minimální indukčnost cívky. Naopak při snižování této hodnoty minimální indukčnost roste. Dalším možným řešením je přidáním filtrů. V tomto případě by musel být jak na vstupu, tak i na konci, což samozřejmě znamená zvýšenou hmotnost a složitost obvodů. Při použití filtrů, ale zůstává toto rušení uvnitř obvodu, a z průběhů je zřejmé, že se objevuje v číslicových částech obvodu. Při krátkém testování, které bylo provedeno,

nebyly součástky nijak zvláště ovlivněny, nebo se jejich poškození nijak neprojevovalo. V dlouhodobém provozu, a velkém množství opakovaných cyklů, by mohlo dojít k poškození součástek v číslicové části. Dalším změřeným průběhem bylo právě VF šumění v detailu, zde je viditelný rozkmit napětí na výstupu 7 V až skoro 20 V. Na vstupním napětí se pak objevuje rozkmit 28 V až 36 V. Na výstupu je tento rozkmit mnohem zřetelnější, nejspíše kvůli tomu, že na výstup vede přímá cesta z cívky pouze přes malý 150 mΩ odpor. Velikost tohoto rozkmitu je nepřijatelná, a sestavený zdroj BUCK, už z tohoto důvodu je pro tuto aplikaci nevhodný. Dalším průběhem, co byl změřen, je přibližné výstupní napětí. Pokud bude pominuto VF zvlnění, stále zůstává rozkmit samotného výstupního napětí, které se pohybuje v mezi 13 V až 17 V. Zvlnění, se nejeví jako opakované, a při využití pevné střídavy, bez regulace pomocí zpětné vazby, tento rozkmit prakticky vymizí. VF zvlnění ale zůstává. Toto nízko frekvenční zvlnění, je tedy způsobeno mikroprocesorem, který se snaží nastavit požadovanou hodnotu, střidu prodlužuje a zkracuje, což nemusí mít okamžité účinky, zdroj tak překompenzuje, a vzniká vyšší výstupní hodnota, než je požadováno. Procesor začne střidu snižovat, ale opět překompenzuje a toto se stále opakuje. Možným řešením tohoto problému by mohlo být vhodnější nastavení zpětné vazby, které pouze neprodlužuje střidu při nedosáhnutí nastavené hodnoty a při přesáhnutí střidu stahuje. Také by mohlo pomoci PWM s vyšším rozlišením a využití dedikovaného integrovaného čipu pro AD převod zpětné vazby, který by dosahoval vyšší přesnosti. Posledními změřenými průběhy pak byly průběhy PWM signálů na mikroprocesoru, a také na výstupech budiče. „High side“ tranzistor byl spínáný v pořádku, ale hradlo „low side“ tranzistoru mělo problémy s nabíjením. Problémem bylo nejspíš to, že budič vydával na hradlo tohoto tranzistoru pouze 5 V, a tranzistor se tak pomalu otvíral. Je nutné ale brát v potaz, že tento tranzistor nespíná žádné výkony, pouze tvoří plovoucí zem, pro nabíjení „bootstrap“ kapacitoru budiče, který pak dovoluje dosažení vyššího napětí pro sepnutí „high side“ tranzistoru. Pokud by tedy střida nebyla taková, že šířka tohoto pulsu bude příliš krátká pro dostatečné pootevření, není to pro zdroj velký problém.

Protože u zdroje s topologií SEPIC byl problém se spínáním tranzistoru, byl nejprve zobrazen průběh PWM signálu na výstupu procesoru a také na hradle tranzistoru. PWM průběh na výstupu mikroprocesor byl podle očekávání, i když lehce zdeformován. Průběh PWM na hradle byl ale již značně zdeformovaný, a i při maximálním dobití měl hodnotu pouze 4 V. Spínání bylo ale pro funkci zdroje dostačující. Lepší řešení, které by dosáhlo vyšší efektivity, by bylo využití budiče, podobnému tomu, co byl použit u předchozího zdroje, nebo alespoň zesílení napětí z mikroprocesoru pomocí tranzistoru, který by spínal vstupní napětí. Další zobrazený průběh, bylo výstupní napětí oproti tomu vstupnímu. Zde je zřejmé, že tento zdroj netrpí VF rušením, jako předchozí zdroj BUCK. Na vstupu bylo napětí i měněno, a zdroj na tuto změnu reagoval. Při snižování hodnoty vstupního napětí je zjevné, že zdroj příliš pomalu kompenzoval, a při zvyšování napětí pak prodloužená střídá způsobila vyšší napětí, zdroj opět překompenzoval. Na přibližném výstupním

napětí je pak viditelný jasný rozdíl mezi stabilitami zdrojů. SEPIC měl poloviční rozkmit, oproti předchozímu zdroji. To ale může být také způsobeno rychlejší reakcí topologie na změnu střídání. Na tomto průběhu jsou zřetelné strmější průběhy, než tomu tak bylo u topologie BUCK, hodnota střídání tak nenabývá tak vysoké hodnoty, kterou by mikroprocesor musel snižovat, reakce jsou tak mnohem přesnější. Co je zde zajímavé, tak zdroje byly testovány na stejné zátěži, při stejných nastavených proudech, a podle změřených průběhů, se oba zdroje pohybovaly okolo jiné střední hodnoty. To poukazuje na chybu zpětné vazby, která i přesto, že byla provedena stejně dodávala nějakým způsobem špatné hodnoty. Je možné na DPS byly vady, které změnili vlastnosti zpětné vazby, ale hodnoty odporů byly změřeny a vykazovaly očekávané hodnoty.

Dále byly otestovány zdroje z pohledu efektivity, kde se BUCK projevil efektivnější při vyšší zátěži, zatím co SEPIC naopak u nižší zátěže. Zvolené hodnoty proudů pro toto testování odpovídaly těm, které by zdroje případně zdroje napájely.

Nakonec byly otestovány zdroje při zkratu výstupních svorek. Oba zdroje touto zkouškou prošly, ale zcela se jim nedařila jakákoliv regulace výstupního proudu. Zdroje detekovaly vyšší výstupní proud, než byl nastaven, a tak střídání stahovaly na nulu, ale poté detekovaly výstup jako příliš nízký a snažili se jej tak zvýšit pomocí prodlužování střídání, což uvedlo zdroje do přímého zkratu a proudy rychle rostly. Tento cyklus se opakoval, zdroje dosáhly poměrně vysokých teplot, ale po minutě ve zkratu byly odpojeny a jevíly byly jen na připojeny na zátěž. Proud byl změřen multimetrem a odpovídal nastavené hodnotě. Zdroje nejevily známky dlouhodobého poškození, pouze byla snižena efektivita zdrojů, nejspíš způsobená zvýšenou teplotou tranzistorů, protože po ochlazení se efektivita pohybovala okolo naměřených hodnot.

Z pohledu normy, pro kterou byly zdroje navrhovány oba dva zdroje selhaly, kvůli zvlnění výstupního napětí. Je ale možné, v případě zdroje SEPIC by pouze stačila optimalizace zpětné vazby, především navržení vhodného algoritmu pro ovládání střídání PWM.

## LITERATURA

- [1] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN 2285, *Vlastnosti elektrických soustav letadel*. Leden 1996. 1996.
- [2] TOOLEY, Mike a WYATT, David. Aircraft and electrical systems. Online. Dostupné z: [https://eng.sut.ac.th/me/box/1\\_54/437306/ebooksclub.pdf](https://eng.sut.ac.th/me/box/1_54/437306/ebooksclub.pdf)
- [3] EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY. ETSO, *MINIMUM PERFORMANCE STANDARDS FOR AIRBORNE STATIC („DC TO DC“) ELECTRICAL POWER CONVERTER*. 24.října 2003. 2003.
- [4] Theoretical maximum luminous efficacy of white LEDs. Online. Dostupné z: <https://cityofmidlandmi.gov/218/Efficiency-of-LED-vs-Incandescent-Lights>. [cit. 2024-05-25].
- [5] Zářivky. Online. Dostupné z: <https://clanky.rvp.cz/clanek/o/g/1456/ZARIVKY.html>. [cit. 2024-05-26].
- [6] Installation instruction BOEING 737. AVEO engineering, Online. Dostupné z: [https://www.aveoengineering.com/downloads/AVE-MOD-002-INS\\_I04.pdf](https://www.aveoengineering.com/downloads/AVE-MOD-002-INS_I04.pdf) [cit. 2024-05-25].
- [7] TEXTRON COMPANY. *Cessna Single Engine High Wing Maintenance Electrical Systems* [online]. 2017 [cit. 2023-12-14]. Dostupné z: [http://repo.poltekbangsby.ac.id/654/1/SEHW\\_ATA24\\_ATA33\\_ATA80\\_ElectricalSystems.pdf](http://repo.poltekbangsby.ac.id/654/1/SEHW_ATA24_ATA33_ATA80_ElectricalSystems.pdf)
- [8] TEXAS INSTRUMENTS. *Power Topologies Handbook* [online]. 2023 [cit. 2023-12-14]. Dostupné z: <https://www.ti.com/seclit/ug/slyu036/slyu036.pdf>
- [9] MOUSER. *Power Supply Technology* [online]. 2023 [cit. 2023-12-14]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/applications/power-supply-topology-buck/>
- [10] XP POWER. *COMMON POWER SUPPLY TOPOLOGIES* [online]. 2022 [cit. 2023-12-14]. Dostupné z: <https://www.xppower.com/storage/documents/technical-articles/PSUTopologies.pdf>
- [11] Switched mode power supply, Online, Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Switched-mode\\_power\\_supply](https://en.wikipedia.org/wiki/Switched-mode_power_supply)
- [12] TREND-ELEKTRO. *PL14VNG* [online]. [cit. 2023-12-14]. Dostupné z: <https://www.trend-elektro.cz/pl14vng/>
- [13] TREND-ELEKTRO. *MINISTROBE* [online]. [cit. 2023-12-14]. Dostupné z: <https://www.trend-elektro.cz/ministrobe/>
- [14] EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY. ETSO-C71, *MINIMUM PERFORMANCE STANDARDS FOR AIRBORNE STATIC („DC TO DC“) ELECTRICAL POWER CONVERTER*. 24.10.2003. 2003. dostupná z: [https://www.easa.europa.eu/download/ets/ETSO-C71\\_CS-ETSO\\_0.pdf](https://www.easa.europa.eu/download/ets/ETSO-C71_CS-ETSO_0.pdf)
- [15] IRFR2905Z datasheet. Online. Dostupné z: [https://cz.mouser.com/datasheet/2/196/Infineon\\_IRFR2905Z\\_DataSheet\\_v01\\_01\\_EN-3363167.pdf](https://cz.mouser.com/datasheet/2/196/Infineon_IRFR2905Z_DataSheet_v01_01_EN-3363167.pdf). [cit. 2024-05-28].

- [16] FASTRON 09P-331 K tlumivka. Online. Dostupné z: <https://www.gme.cz/v/1487060/fastron-09p-331-k-tlumivka>. [cit. 2024-05-28].
- [17] IRFR2905Z datasheet. Online. Dostupné z: <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/n-channel/irlr2905/>
- [18] BUCK-CONVCALC. Online. Dostupné z: <https://www.ti.com/tool/BUCK-CONVCALC>. [cit. 2024-05-19].
- [19] Designing A SEPIC Converter. Online. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/snva168e/snva168e.pdf>. [cit. 2024-05-19].
- [20] POLOLU 2834 menic. Online. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/pololu-2843/menice/pololu/>. [cit. 2024-05-28].
- [21] THVD1420. Online. Dostupné z: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/thvd1400.pdf?ts=1716763953433&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/thvd1400.pdf?ts=1716763953433&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F). [cit. 2024-05-28].
- [22] Over voltage protection circuit. Online. Dostupné z: <https://circuitdigest.com/electronic-circuits/overvoltage-protection-circuit>. [cit. 2024-05-28].
- [23] NRP, počítačová cvičení 9, dostupné z: <https://moodle.vut.cz/mod/folder/view.php?id=358056>
- [24] SSD1306 driver, Online. Dostupné z: [https://github.com/gavinlyonsrepo/pic\\_PIC18F47K42\\_projects](https://github.com/gavinlyonsrepo/pic_PIC18F47K42_projects)

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

### Zkratky:

|        |  |
|--------|--|
| FEKT   | Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  |
| VUT    | Vysoké učení technické v Brně                        |
| UART   | Universal asynchronous receiver-transmitter          |
| I2C    | Inter integrated circuit                             |
| CWG    | Complimentary wave generator                         |
| PWM    | Pulse width modulation                               |
| SEPIC  | Single ended primary inductor                        |
| EUSART | Enhanced universal asynchronous receiver-transmitter |

### Symboly:

|           |                     |      |
|-----------|---------------------|------|
| $U$       | napětí              | (V)  |
| $I$       | proud               | (A)  |
| $L$       | induktance          | (H)  |
| $F$       | frekvence           | (Hz) |
| $L_{MIN}$ | minimální indukance | (H)  |
| $C_{MIN}$ | minimální kapacita  | (F)  |
| $U_{IN}$  | vstupní napětí      | (V)  |
| $U_{OUT}$ | výstupní napětí     | (V)  |
| $F_{SW}$  | spínací frekvence   | (Hz) |
| $I_{MIN}$ | minimální proud     | (A)  |
| $I_{RIP}$ | rozkmit proudu      | (A)  |

# SEZNAM PŘÍLOH

|   |           |
|---|-----------|
| <b>PŘÍLOHA A – SCHÉMATA.....</b>                              | <b>23</b> |
| <b>PŘÍLOHA B – OBVODOVÁ ŘEŠENÍ A SCHÉMATA – uloženo na CD</b> |           |
| <b>PŘÍLOHA C – ZDROJOVÉ KÓDY – uloženo na CD</b>              |           |



# Příloha A - Schémata

## A.1 Schéma centrální jednotky

