

UNIVERZITA PARDUBICE

DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2023

Vojtěch Šilar

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Superkapacitorový startovací zdroj
Bakalářská práce

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Vojtěch Šilar**
Osobní číslo: **D19300**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Elektrotechnické a elektronické systémy v dopravě**
Téma práce: **SUPERKAPACITOROVÝ STARTOVACÍ ZDROJ**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

Zásady pro vypracování

Jako startovací zdroj (startovací booster) označujeme zařízení, jenž má pomoci při startu spalovacího motoru v případě hluboce vybitého startovacího akumulátoru. K tomuto jevu dochází v případě dlouhodobého odstavení vozidla, špatného stavu akumulátoru či vysoké hodnoty klidové spotřeby vozidla. Cílem bakaláře bude navrhnout a vyrobit booster využívající superkapacitory.

Specifikace zařízení a úkoly bakaláře:

1. Seznámit se s nabídkou trhu v oblasti startovacích boosterů
2. Rešerše možných topologií a řešení
3. Volba vhodné topologie boosteru s využitím superkapacitorů
4. Výroba zařízení a validační měření v reálném provozu

Rozsah pracovní zprávy:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- KOVAŘÍK, Jakub a Jaroslav BOUŠEK. *Superkapacitory pro akumulaci energie*. 2017.
- YU, Aiping. *Electrochemical supercapacitors for energy storage and delivery: fundamentals and applications*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2013. ISBN 9781439869895

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ondřej Sadílek, Ph.D.**
Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací
techniky v dopravě

Datum zadání bakalářské práce: **30. listopadu 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **9. května 2023**

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

Ing. Dušan Čermák, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlašuji:

Práci s názvem Superkapacitorový startovací zdroj jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 30. 08. 2023

Vojtěch Šilar v.r.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Ondřejovi Sadílkovi Ph.D. za cenné rady, konzultace a poskytnutí mnoha informací, které mi pomohli při zpracování této bakalářské práce.

Zároveň bych rád poděkoval mé rodině, která mě podporovala během mého studia a při psaní této práce.

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem startovacího zdroje využívajícího superkapacitory. Teoretická část popisuje současnou nabídku na trhu, princip superkapacitorů, topologie startovacích zdrojů včetně jejich případných úskalí. Praktická část řeší konkrétní zapojení, návrh DPS, program pro mikrokontrolér, i měření z reálného použití.

KLÍČOVÁ SLOVA

superkapacitor, ultrakapacitor, SEPIC, startovací zdroj, startovací booster

TITLE

Supercapacitor starting power supply

ANNOTATION

This bachelor thesis deals with the design of a starter power supply using supercapacitors. The theoretical part describes the current offer on the market, the principle of supercapacitors, the topology of starter power supplies including their potential pitfalls. The practical part deals with specific circuitry, PCB design, microcontroller program, and real-world measurements.

KEYWORDS

supercapacitor, ultracapacitor, SEPIC, starting source, car booster, jump starter

OBSAH

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK.....	10
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	12
ÚVOD	13
1. Nabídka trhu v oblasti startovacích zdrojů	14
1.1. KUNZER CSC 1224.....	14
1.2. CARCLEVER HYBRID 800 - 35970	15
1.3. NOCO GENIUS BOOST PRO GB150	18
1.4. Autophix JSC 2100.....	19
1.5. TELWIN SPRINTER 6000 START.....	21
1.6. Banner Power Booster PB12/24	22
1.7. Shrnutí.....	22
2. Superkapacitory	24
2.1. Typy superkapacitorů	28
2.2. Důležité parametry a vlastnosti superkapacitorů	32
3. Možnosti nabíjení startovacích zdrojů	35
4. Realizace startovacího zdroje	37
4.1. Požadavky na parametry konstruovaného startovacího zdroje.....	37
4.2. Parametry vybraných superkapacitorů.....	41
4.3. Vybrané možnosti napájení	42
4.4. Zvolená topologie startovacího zdroje.....	44
4.4.1. Mikrokontrolér	46
4.4.2. Měření napětí	47
4.4.3. Spínání elektromagnetických relé.....	48
4.4.4. Řídící obvod DC / DC měniče	48
4.4.5. Výběr klíčových komponent DC / DC měniče	50

4.4.6. Li-Ion akumulátory 18650	51
4.5. Schéma zapojení	53
4.6. Desky plošného spoje	53
4.6.1. DPS řízení	53
4.6.2. DPS superkapacitorů.....	57
4.7. Firmware mikrokontroleru.....	58
4.8. Objevené problémy při oživování DPS řízení	61
4.9. Ovládání.....	62
4.10. Měření v reálném provozu.....	63
ZÁVĚR	67
POUŽITÁ LITERATURA	68
SEZNAM PŘÍLOH.....	72

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1: KUNZER CSC 1224 [12].....	14
Obrázek 2: CARCLEVER HYBRID 800 (autor).....	15
Obrázek 3: Odkrytovaný HYBRID 800 (autor).....	16
Obrázek 4: Měření kapacity z nabíjecí charakteristiky (autor).....	16
Obrázek 5: Zapojení měření simulovaného startování (autor).....	17
Obrázek 6: Průběh napětí a proudu při zátěži (autor).....	18
Obrázek 7: NOCO GENIUS BOOST PRO GB150 [14].....	19
Obrázek 8: Autophix JSC 2100 [16].....	20
Obrázek 9: TELWIN SPRINTER 6000 START [18].....	21
Obrázek 10: Banner Power Booster PB12/24 [20].....	22
Obrázek 11: Princip kondenzátoru [26].....	24
Obrázek 12: Princip superkondenzátoru [26].....	25
Obrázek 13: Závislost energetické a výkonové hustoty [25].....	27
Obrázek 14: Typy superkapacitorů [27].....	28
Obrázek 15: Střední doba do poruchy superkapacitoru [34].....	34
Obrázek 16: Konektor typu USB-C (autor).....	35
Obrázek 17: Měření proudu a napětí při startování (autor).....	37
Obrázek 18: Měření startovacích parametrů na vozidle Škoda Kodiaq (autor).....	38
Obrázek 19: Průběh napětí a proudu při startování Škoda Kodiaq (autor).....	39
Obrázek 20: Nabíjecí výkon DC / DC měniče (autor).....	43
Obrázek 21: Pohled na konstruovaný startovací zdroj (autor).....	44
Obrázek 22: Blokové schéma konstruovaného startovacího zdroje (autor).....	45
Obrázek 23: Odkrytovaný konstruovaný startovací zdroj.....	46
Obrázek 24: Arduino Nano [28].....	46
Obrázek 25: Řešení IO Atmega 328[38].....	47
Obrázek 26: Zapojení SEPIC [39].....	49
Obrázek 27: Chování SEPIC při sepnutém stavu spínače. [39].....	50
Obrázek 28: Chování SEPIC při rozepnutém stavu spínače [39].....	50
Obrázek 29: Návrh DPS řízení – BOTTOM (autor).....	54
Obrázek 30: Návrh DPS řízení – TOP (autor).....	54
Obrázek 32: 3D model DPS řízení (autor).....	55

Obrázek 31:Označení čísel pinu na konektoru (autor).....	55
Obrázek 35: Návrh DPS superkapacitorů – TOP (autor).....	57
Obrázek 33: 3D model DPS superkapacitorů (autor)	57
Obrázek 34: Návrh DPS superkapacitorů – BOTTOM (autor)	57
Obrázek 41: Dodatečné propojky DPS (autor)	61
Obrázek 37: Start vozidla Škoda Octavia s předepsaným akumulátorem (autor)	63
Obrázek 38: Start vozidla Škoda Octavia s vadným akumulátorem 1 (autor).....	64
Obrázek 40: Start vozidla CAT 428B s vadným akumulátorem	65
Obrázek 39:Start vozidla Škoda Octavia s vadným akumulátorem 2 (autor).....	65
Tabulka 1: Čas nabití GB150 [14]	19
Tabulka 2: Čas nabití JSC 2100 [16]	20
Tabulka 3: Shrnutí a porovnání důležitých atributů [29, 41].....	28
Tabulka 4: Porovnání hybridního SC, EDLC SC a akumulátoru Li-Ion [33, 34, 35] ..	31
Tabulka 5: Měření startovacích potřeb osobních automobilů (autor).....	40
Tabulka 6: Parametry BCAP0140 E250 [36]	41
Tabulka 7: Parametry superkapacitorového modulu (autor).....	42
Tabulka 8: Popis konektorů DPS řízení (autor).....	56

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

USB – Universal Serial Bus

PD – Power Delivery

SC - superkapacitor

DPS – deska plošného spoje

IC – integrovaný obvod

ESR – ekvivalentní sériový odpor

EDLC – elektrický dvojvrstvý kondenzátor

mcu – microcontroller unit (jednočipový počítač)

BMS – battery management system

CD – Compact Disk, datové médium

ÚVOD

Startovací zdroj, též označovaný jako startovací booster, je zařízení určené k nastartování konvenčního silničního vozidla s nesprávně fungujícím startovacím olověným akumulátorem. Ten nedokáže poskytnout dostatek energie pro roztočení elektrického startéru a nastartování vozidla. K tomuto jevu může dojít vlivem hlubokého vybití akumulátoru např. poruchou v elektroinstalaci vozidla vznikne velký klidový odběr nebo je vozidlo dlouhodobě odstaveno, případně startovací akumulátor je poškozen. Startovací akumulátor může být pouze podchlazen, nemusí mít dostatečnou kapacitu, nebo je degradován stářím. Každý z uvedených vlivů či jejich kombinace může vést k nemožnosti nastartovat vozidlo.

Pokud vozidlo není možné nastartovat běžným způsobem, máme několik možností. Vozidlo je možné nastartovat pomocí startovacích kabelů – tato metoda je rychlá, ale bohužel vyžaduje druhé funkční vozidlo či nabitý externí akumulátor. Samozřejmě můžeme také startovací akumulátor vyměnit za jiný, ovšem zdaleka ne všechny případy neúspěšného startu vozidla nutně vyžadují výměnu akumulátoru. Současný akumulátor lze také nabít nebo ohřát na provozní teplotu, ovšem tato možnost odstaví automobil z provozu na několik hodin. Zajímavou alternativu představují přenosné startovací zdroje, které tématicky tvoří náplň této práce.

Startovací zdroj stačí zapojit na elektrickou soustavu vozidla podobně jako startovací kabely. Startovací zdroj se poté ve většině případů nabíjí malým proudem ze startovacího akumulátoru či je dobit externě například pomocí USB. Výhoda startovacího zdroje spočívá právě v nízkém vnitřním odporu zásobníku energie, který je pro startovací soustavu jedním z nejdůležitějších parametrů. Celý proces je velmi rychlý a uživatel vozidla je schopný v řádu minut od zjištění nemožnosti nastartovat pokračovat v jízdě.

Teoretická i praktická část této práce je převážně zaměřena na startovací zdroj využívající k akumulaci energie superkapacitory.

1. Nabídka trhu v oblasti startovacích zdrojů

Na trhu existuje nespočet výrobců i samotných výrobků s velkým rozptylem cen a vlastností. Uvádím tedy vždy alespoň jednoho zástupce od každé topologie. Pokud výrobce nabízí více modelů, vybíral jsem ty nejdražší, obvykle levnější startovací modely mají pouze nižší startovací proud a menší kapacitu. Také některé dražší modely podporují 24 V elektrické soustavy vozidel, které jsou typické u nákladních vozidel.

1.1. KUNZER CSC 1224

Tento superkapacitorový startovací zdroj umožňuje použití jak pro vozidla s 12 V elektrickou soustavou, tak i pro vozidla s 24 V elektrickou soustavou. V přístroji není umístěn akumulátor, a proto zařízení disponuje velmi nízkou provozní teplotou. Rozsah provozních teplot: -40 °C až +65 °C. Výrobce udává startovací proud pro 24 V 800 A, pro 12 V 500 A. Výrobce dále udává kapacitu pro 24 V 7500 F, pro 12 V 3750 F. Tato kapacita je ohromná a vzhledem k rozměrům zařízení a současné energetické hustotě superkapacitorů je otázkou, jak výrobce k dané hodnotě dospěl. Bohužel zařízení nebylo možné vypůjčit a ověřit, jestli je udávaná kapacita reálná. Z dostupných informací lze s velkou pravděpodobností určit, že zařízení bude obsahovat spínací prvek, který umožňuje rozdělit sériovou kombinaci superkapacitorů v polovině. Pro 12 V elektrickou soustavu vozidla bude spínací prvek rozepnutý, a tím se použije pouze jedna polovina superkapacitorů. V případě 24 V elektrické soustavy bude prvek sepnutý, což povede k využití všech superkapacitorů. [12]



Obrázek 1: KUNZER CSC 1224 [12]

Současná cena (2023) uvedeného modelu se pohybuje okolo 18 000 Kč. Z toho vyplývá, že se jedná o jeden z nejdražších boosterů na trhu. [13]

1.2. CARCLEVER HYBRID 800 - 35970

Model vzájemně spojuje výhody superkapacitorových a akumulátorových startovacích zdrojů. Zařízení slouží pouze pro vozidla s 12 V elektrickou soustavou. Špičkový startovací proud dosahuje 800 A. Rozsah pracovních teplot je $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$. Do superkapacitorů se ukládá energie sloužící k vyvinutí startovacího proudu. Zařízení dále obsahuje Li-ion akumulátor velikosti 18650 pro záložní nabíjení superkapacitorů v případě nedostatečné zbytkové energie ve startovacím akumulátoru vozidla. Nabíjení pomocí akumulátoru vozidla trvá přibližně 2 min. Nabízí startování vozidel až s třilitrovým benzínovým motorem nebo až s dvoulitrovým naftovým motorem. Akumulátor i superkapacitory lze dále dobít prostřednictvím micro USB (5 V, 1 A). Model disponuje zabudovanou svítilnou a poskytuje USB výstup s proudem až 2 A určený pro nabíjení elektroniky. [22]



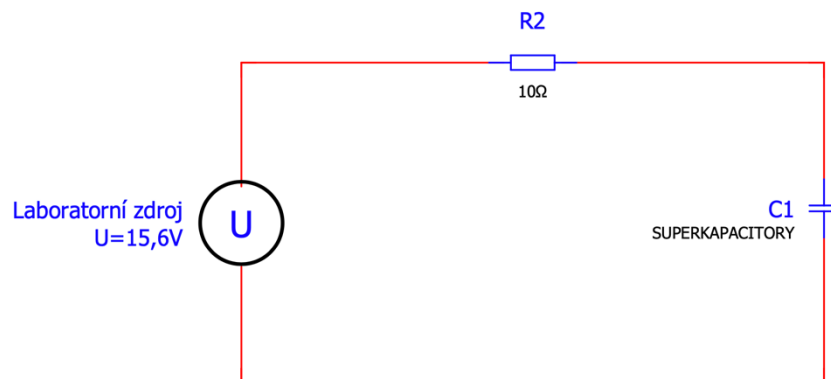
Obrázek 2: CARCLEVER HYBRID 800 (autor)

Současná cena (2023) uvedeného modelu se pohybuje okolo 3 400 Kč. [23]



Obrázek 3: Odkrytovaný HYBRID 800 (autor)

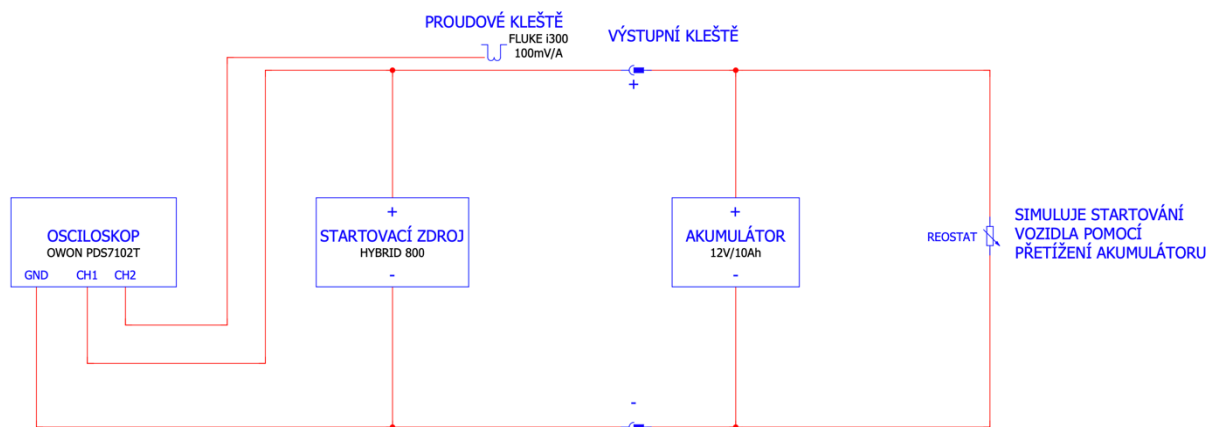
Výrobce neudává energii uloženou v superkapacitorech, ale byla možnost toto zařízení vyzkoušet a kapacitu změřit experimentálně. Měřením bylo zjištěno, že superkondenzátory se v zařízení nabíjejí na hodnotu 15,6 V. Kapacitu lze zjistit několika způsoby. Jedním ze způsobů je přímé měření například RLC můstkem, avšak v našem případě bylo využito měření kapacity z nabíjecí charakteristiky. Superkapacitory byly připojeny na laboratorní zdroj s nastaveným napětím 15,6 V a přes definovaný rezistor 10 Ω pak nabíjeny. Na následujícím Obrázek 4 můžeme vidět schéma použitého zapojení pro měření kapacity.



Obrázek 4: Měření kapacity z nabíjecí charakteristiky (autor)

Pro zjištění kapacity potřebujeme zjistit čas, po který se superkapacitory nabíjí na hodnotu $U_C = U_0 \cdot (1 - e^{-1}) \approx 0,632 \cdot U_0$, tedy $U_C = 9,73 \text{ V}$. Tento čas právě odpovídá časové konstantě τ konkrétního RC článku. Z naměřeného času 494 sekundy a vzorce $\tau = R \cdot C$ pak vychází kapacita superkapacitorů na 49,4 F.

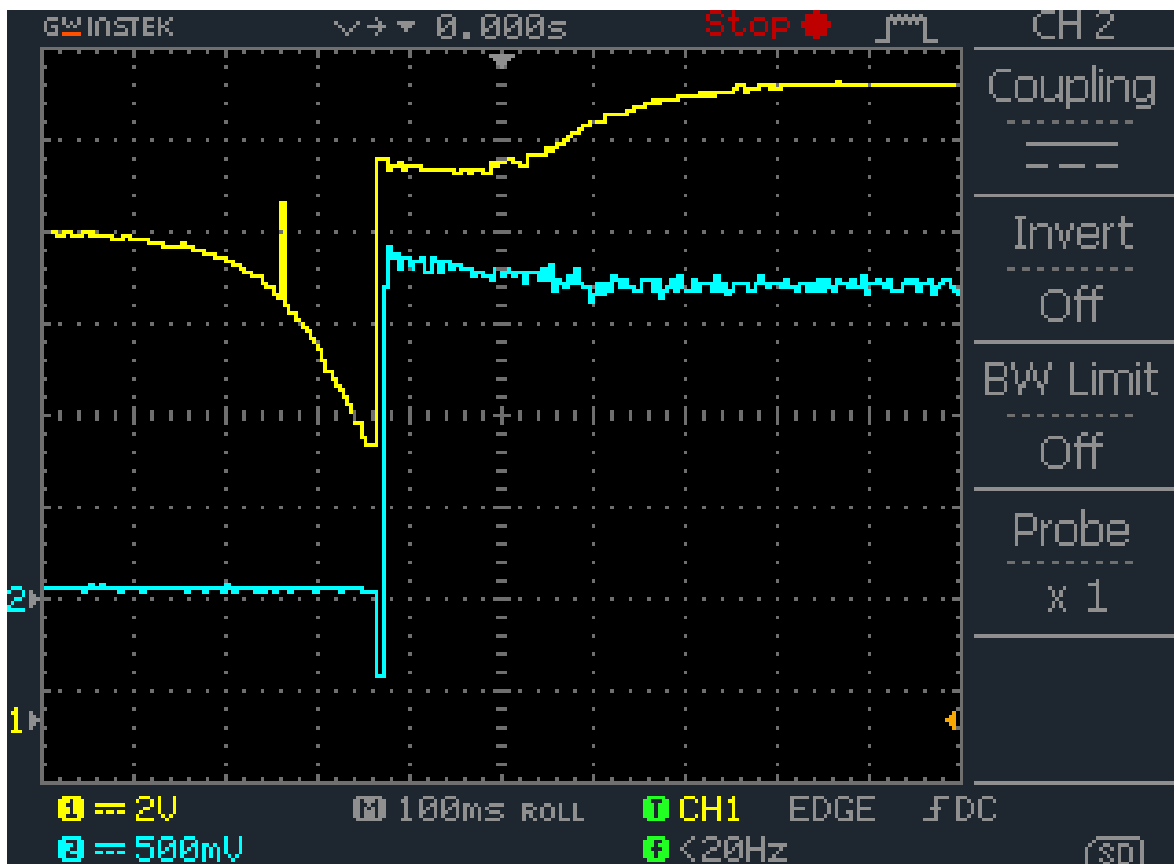
Ze zařízení byl také sundán kryt, kdy bylo patrné, že mínus od superkondenzátorů jde rovnou na výstupní svorku, zatímco plus jde nejdříve přes 80 A relé a až následně na výstupní svorku.



Obrázek 5: Zapojení měření simulovaného startování (autor)

V rámci testu konkrétního typu startovacího zdroje bylo také provedeno měření chování při simulovaném startování. Zapojení tohoto měření zobrazuje Obrázek 5. Výsledný průběh napětí a proudu zobrazuje Obrázek 6. Žlutá stopa (1) zobrazuje napětí na akumulátoru vozidla. Modrá stopa (2) zobrazuje proud vycházející ze startovacího zdroje. Tato stopa je zaznamenána pomocí proudových kleští s rozsahem 100 mV / A, a proto pro vyjádření v ampérech je potřeba si hodnotu přepočítat. Z měření vyplývá, že startovací zdroj vyčkává na určitý pokles napětí v čase. Hodnota bude nastavená okolo 2 V / 100 ms. Po splnění této podmínky booster sepne 80 A relé a superkapacitory se začnou vybíjet. Po 12 s dojde k rozepnutí relé. V případě nezdařilého pokusu o nastartování musíme znovu nabít zařízení a startování vyzkoušet znovu.

Výrobce předepisuje po pěti nezdařilých pokusech patnácti minutovou pauzu pro vychladnutí zařízení.



Obrázek 6: Průběh napětí a proudu při zátěži (autor)

1.3. NOCO GENIUS BOOST PRO GB150

Jedná se o akumulátorový startovací zdroj určený pro vozidla s 12 V elektrickou soustavou. Je to nejsilnější model amerického výrobce NOCO. Ostatní modely se liší převážně dostupnou energií začínající na 24 Wh. Tento model umí vyvinout špičkový proud až 3000 A. Lithium-iontový akumulátor má energii 88 Wh. Rozsah provozních teplot: -20 °C až +50 °C. Model disponuje zabudovanou svítilnou a poskytuje USB výstup až 2,1 A pro nabíjení elektroniky. Tento nejsilnější model je určený k nastartování až devítilitrových benzínových nebo sedmilitrových naftových motorů. Dobíjení akumulátoru probíhá přes konektor micro USB o maximálním proudu 2,1 A nebo pomocí XGC (INPUT), kdy je zařízení schopno přijímat až 12 V, 5 A. Dobíjení akumulátoru je v řádu hodin, viz Tabulka 1: Čas nabití GB150: [14]

Tabulka 1: Čas nabití GB150 [14]

Proud (A)	Čas nabití (hod.)
0,5	12
1	6
2	3



Obrázek 7: NOCO GENIUS BOOST PRO GB150 [14]

Současná (2023) cena uvedeného modelu se pohybuje okolo 8 000 Kč. [15]

1.4. Autophix JSC 2100

Dle vyjádření výrobce se startovací zdroj skládá z 5 ks 600 F superkondenzátorů. Jelikož se jedná o sériové zapojení, výsledná kapacita je 120 F. Špičkový proud je 1000 A. Rozsah provozních teplot: -25 °C až +70 °C. Je určen pouze pro 12 V elektrické soustavy vozidel. Startovací zdroj lze nabíjet za pomoci zbytkové energie v akumulátoru vozidla nebo za pomoci USB (5 V, 2 A). Rychlost nabíjení je závislá na vstupním napětí a popisuje ji Tabulka 2: Čas nabití JSC 2100 [16]

Tabulka 2: Čas nabití JSC 2100 [16]

Napětí (V)	Čas nabití (min.)
12	5
6	20
5	30



Obrázek 8: Autophix JSC 2100 [16]

Současná cena (2023) uvedeného modelu se pohybuje okolo 3 000 Kč. [17]

1.5. TELWIN SPRINTER 6000 START

Startovací vozíky jsou určeny spíše do autoservisů. Ve většině případů mají zároveň funkci nabíječky. Na rozdíl od jiných startovacích zdrojů se jedná o rozměrné, těžké a bezakumulátorové zařízení. Například tento model má rozměry: 32 x 38 x 78 cm a hmotnost 24 kg. Mobilita je značně omezená, jelikož pro svoji funkci je zapotřebí síťové napájení (230 V / 50 Hz). Maximální startovací proud je 570 A. Je určen jak pro 12 V, tak 24 V elektrické soustavy vozidel. Dobíjecí proud je až 105 A. [18]



Obrázek 9: TELWIN SPRINTER 6000 START [18]

Současná cena (2023) uvedeného modelu se pohybuje okolo 10 000 Kč. [19]

1.6. Banner Power Booster PB12/24

Na trhu se stále dají pořídit startovací zdroje s olověnými akumulátory. Zástupcem této kategorie je i Power Booster PB12/24 obsahující dvojici 25 Ah AGM akumulátorů. Umožňuje startovat jak 12 V, tak i 24 V elektrické soustavy vozidel. Špičkový proud je pro 12 V 6200 A a pro 24 V 3100 A. Mobilita je už díky akumulátorům vyšší než u startovacích vozíků, nicméně hmotnost stále dosahuje 22,5 kg. Rozměry jsou 44 x 30 x 23 cm. [20]



Obrázek 10: Banner Power Booster PB12/24 [20]

Současná cena (2023) uvedeného modelu se pohybuje okolo 15 000 Kč. [21]

1.7. Shrnutí

Výrobci superkapacitorových startovacích zdrojů tvrdí, že jsou bezpečnější než výrobky obsahující lithiový akumulátor. Toto tvrzení nelze jednoduše potvrdit, vždy záleží na typu akumulátoru, superkapacitoru a jejich případných implementovaných ochranách. Životnost superkapacitorových startovacích zdrojů je řádově vyšší nicméně jako u bezpečnosti, i zde platí, že vždy záleží na konkrétních výrobcích pro korektní srovnání. Nabíjení tohoto typu startovacího zdroje trvá v řádu minut, kdy je možné využít i zbytek uložené energie

v akumulátoru vozidla. Superkapacitory mají obecně větší rozsah provozních teplot než lithiové akumulátory, a proto je možné nechávat tento booster preventivně ve vozidle.

Startovací zdroje obsahující jako zdroj energie akumulátor na bázi Lithia se vyznačují větší uloženou energií a ve stejné cenové kategorii vyššími startovacími proudy. Akumulátorové startovací zdroje je nutné udržovat nabitě a nelze ani doporučit nechávat tento typ startovacích zdrojů ve vozidle z důvodu možného prochlazení akumulátoru a následného poklesu výkonu. V případě vybitého akumulátoru trvá nabíjení v řádu hodin. Pokud je akumulátor startovacího zdroje vybitý, nemůže být použit k rychlému uvedení vozidla do provozu. Je však pravdou, že na rozdíl od superkapacitorové technologie, lithiový akumulátor netrpí velkým samovybitím, a proto stačí provést kontrolu nabití několikrát ročně.

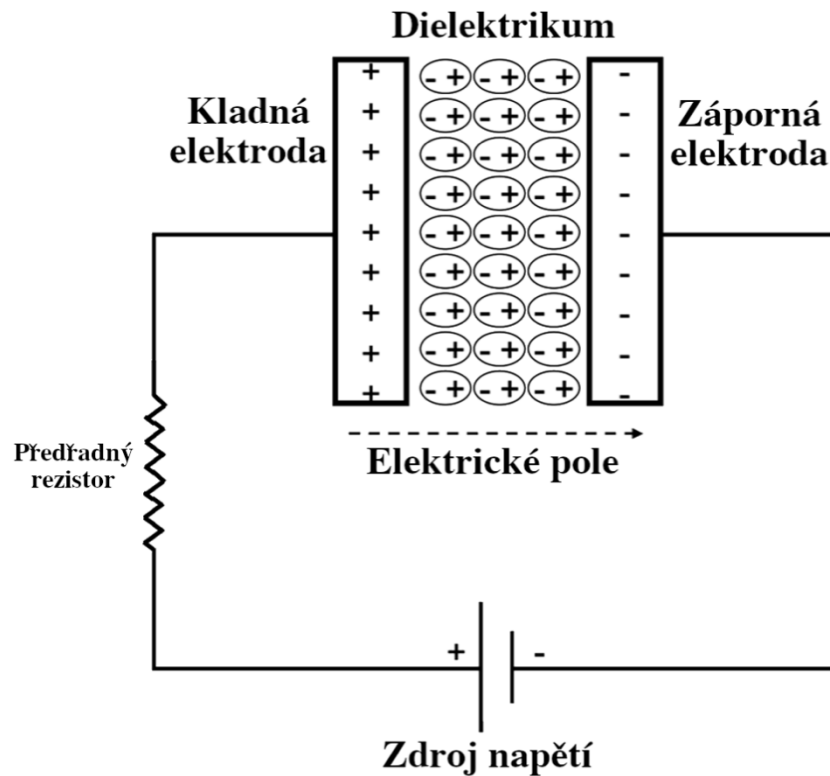
Startovací zdroje založené na síťovém zdroji považují za dobrou volbu pouze pro malý okruh uživatelů, typicky autoservisy. Jejich zhoršená mobilita i cena značně snižují možnosti použití. Naopak vzhledem k absenci akumulátoru dosahují dlouhé životnosti s nízkými provozními náklady.

Taktéž startovací zdroje obsahující olověný akumulátor vnímám spíše jako dosluhující. I přesto, že jejich startovací proud je na vysoké úrovni, životnost akumulátorů je ve srovnání s ostatními technologiemi nižší. Z nízké energetické hustoty olověného akumulátoru plyne i vysoká hmotnost takového zařízení.

Jako standart všech startovacích zdrojů se ukázala ochrana proti přepólování a zkratu.

2. Superkapacitory

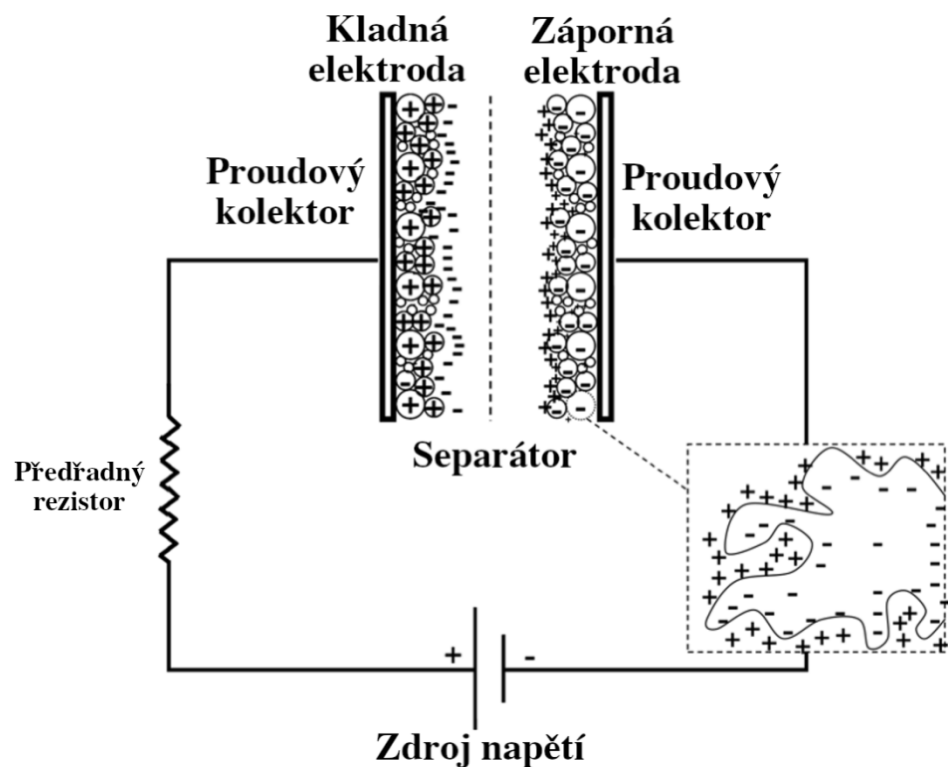
Superkapacitory, též označované jako ultrakapacitory či superkondenzátory, jsou elektronické pasivní součástky určené k akumulaci energie. Narozdíl od klasických kondenzátorů dosahují mnohem větších kapacit. Někdy se můžeme setkat s názvem elektrické dvouvrstvé kondenzátory (EDLC), kdy se jedná o konkrétní typ superkapacitoru.



Obrázek 11: Princip kondenzátoru [26]

Pro superkapacitory platí stejné principy jako pro klasické kondenzátory. Klasický kondenzátor se skládá ze dvou vodivých desek oddělených dielektrickým materiálem (dielektrikem). Přivedením napětí na kondenzátor dojde k nahromadění opačných nábojů na povrchu elektrod. Náboje jsou drženy dielektrikem, kde takto vytvořené pole dovoluje akumulovat elektrickou energii. [26]

Rozdílnost superkondenzátorů od klasických kondenzátorů spočívá v mnohem větším povrchu elektrod a zároveň v mnohem tenčím dielektriku, které zmenšuje vzdálenost mezi elektrodami.



Obrázek 12: Princip superkondenzátoru [26]

Dle rovnice **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** pro kapacitu kondenzátoru:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{D} \quad (1.1)$$

- kde
- C kapacita [F]
 - ε_0 permitivita vakua [$F \cdot m^{-1}$]
 - ε_r permitivita dielektrika [$F \cdot m^{-1}$]
 - A plocha desek [m^2]
 - D vzdálenost desek mezi sebou [m]

a z rovnice **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** pro energii kondenzátoru:

$$E = \frac{1}{2} C \cdot U^2 \quad (1.2.)$$

kde E energie [J]

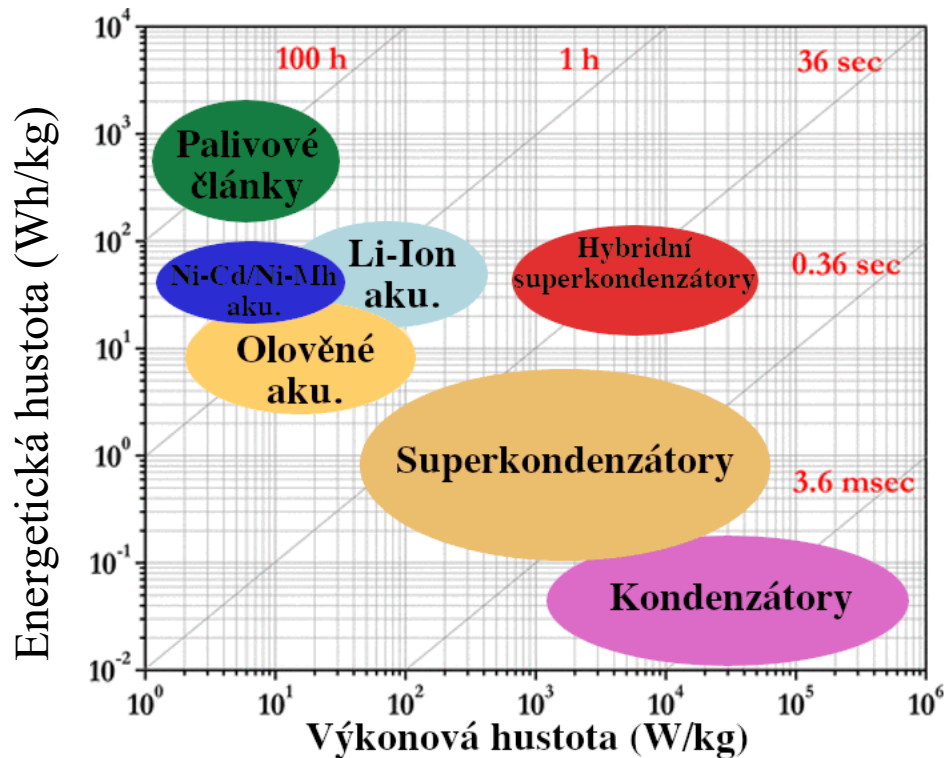
C kapacita [F]

U napětí [V]

plyne, že výše popsané rozdíly vedou ke zvýšení kapacity i energie.

Díky zachování nízkých hodnot ESR stejně jako u klasických kondenzátorů jsou schopny dosahovat srovnatelných hustot výkonu jako klasické kondenzátory. Navíc superkondenzátory nabízejí oproti palivovým článkům a akumulátorům několik výhod včetně vyšší hustoty výkonu, kratší doby nabíjení a delší životnosti a skladovatelnosti. [26]

Závislost energetické a výkonové hustoty některých zařízení sloužících pro ukládání energie vyjadřuje následující Obrázek 13, v angličtině často pojmenovaný jako „Ragone plot“:

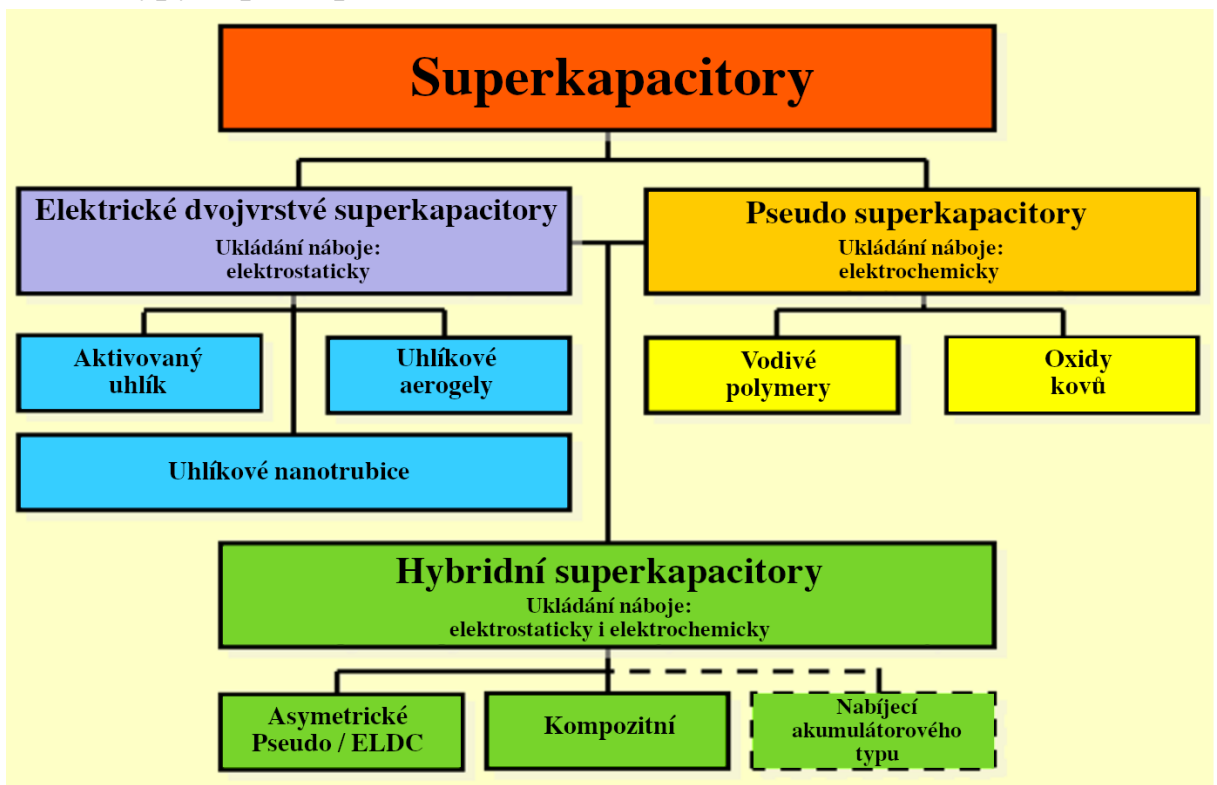


Obrázek 13: Závislost energetické a výkonové hustoty [25]

Nejdůležitější vlastnosti [29]:

- Vlastnosti pro ukládání elektrické energie jako alternativa k bateriím.
- Zvládají velmi vysoké proudy díky nízkému ESR.
- Mají nízkou hustotu energie na jednotku hmotnosti a objemu.
- Cena za jednotku energie (kWh) je extrémně vysoká.
- Vysoký rozsah pracovních teplot už od -40 °C až po +65 °C

2.1. Typy superkapacitorů



Obrázek 14: Typy superkapacitorů [27]

Tabulka 3: Shrnutí a porovnání důležitých atributů [29, 41]

Parametr	Superkapacitory			Li-ion akumulátor NMC
	EDLC	Pseudo	Hybridní	
Doba nabíjení [s]	1–10	1–10	100	3600
Počet cyklů	1 000 000	100 000	500 000	1000
Napětí článku [V]	2,7	2,3–2,8	2,3–2,8	3,6
Energetická hustota [Wh.kg ⁻¹]	3-5	10	180	220
Cena za kWh [Kč]	~ 1 000 000	Data nejsou dostupná	~ 800 000	~ 10 000
Provozní teplota [°C]	-40 °C až +65 °C	-40 °C až +65 °C	-40 °C až +65 °C	-20 °C až +60 °C
Samovybíjení za měsíc [%]	60	60	Data nejsou dostupná	4
Typ elektrolytu	Aprotické nebo Protické	Protické	Aprotické	Aprotické

Elektrický dvojvrstvý superkapacitor

Někdy jsou označovány jako EDLC a nebo superkondenzátory první generace. [26] Tento typ superkondenzátoru je nejběžnějším typem a představuje většinu na komerčním trhu. [29] Obsahují tekutý elektrolyt. Využívají ne-faradické ukládání náboje, též zvané elektrostatické ukládání náboje, a tak nedochází k přenosu náboje mezi elektrodou a elektrolytem. Dochází k elektrostatickému oddělení náboje na rozhraní mezi povrchem elektrody a elektrolytem. EDLC se skládají nejméně ze dvou elektrod oddělených iontově propustným separátorem, který zabraňuje zkratům mezi elektrodami. Elektrostatický přenos náboje v tomto zařízení je plně reverzibilní, což dává vzniknout účinným zařízením s dlouhou životností a zvládající miliony cyklů. Při nabíjení se na rozhraní elektroda/elektrolyt vytvářejí dvě vrstvy protikladných nábojů. Tato elektrická dvojvrstva je popsána různými modely například Helmholtzův, Gouy–Chapmanův, Gouy–Chapmanův Sternův atd. EDLC jsou srovnatelné s paralelními deskovými kondenzátory, což je způsobeno polarizací elektrod, která vede k hromadění opačně nabitých iontů. [27]

Klíčovým bodem pro dosažení extrémně vysoké kapacity je velký povrch elektrod a tloušťka separační mezery náboje. [29] Separační mezera náboje je mnohem menší než v běžném kondenzátoru a pohybuje se v rozmezí 0,3 - 0,8 nm. [24]

EDLC můžeme dále rozdělit podle toho, z jakého materiálu jsou vyrobeny elektrody. Nejčastěji se používá aktivovaný uhlík – vysoká pórovitost povrchu a nízká cena. Mezi další materiály patří uhlíkové nanotrubicе nebo uhlíkové aerogely. [24]

Pseudo superkapacitor

Též nazývány jako faradické SC nebo Pseudo-faradické superkapacity. Jsou mnohem méně používány než EDLC a komerční dostupnost se nepodařila dohledat. Dříve byly vyráběny firmou Maxwell, ale nyní již tento typ nenabízejí. Stabilita a počet cyklů jsou nižší než u EDLC. Dále oproti EDLC mají nižší účinnost nabíjení a delší časovou odezvu (nižší rychlost vybíjení). Naopak jejich specifická energie je zhruba dvojnásobně vyšší oproti EDLC. [29]

Ukládání náboje probíhá elektrochemicky pomocí přenosu náboje mezi elektrodou a elektrolytem. Využívají faradického přenosu náboje vznikajícího při redoxních reakcích probíhajících na povrchu elektrody. Tyto procesy jsou rychlejší než procesy v sekundárních článcích, ale zároveň pomalejší než elektrostatické procesy v EDLC. Stejně vlastnosti platí pro reverzibilitu a životnost. To je dáno především nižší produkcí reakčních produktů než v případě akumulátorů, ale naopak vyšší oproti EDLC, které neprodukují žádné reakční produkty. [27]

Za nerozšířením Pseudo SC stojí především špatné vlastnosti materiálů pro výrobu elektrod. V případě použití vodivých polymerů pro výrobu elektrod je problematická dostupnost elektrod typu N. Také dochází k mechanickému namáhání elektrod při oxidačně redukčních reakcích, což má za následek jejich nižší životnost. Tyto dvě vlastnosti brání rozšíření Pseudo SC s vodivými polymery. Dalším možným materiálem pro výrobu elektrod jsou oxidy kovů, především oxid ruthenia. Bohužel v tomto případě brání rozšíření vysoká cena.

Hybridní superkapacitor

Někdy označovány jako superkondenzátory druhé generace. [26] Jedná se o nejnovější typ SC, a tak není překvapením, že komerční dostupnost je velmi omezená a zatím jsou hybridní SC spíše v laboratořích. [29]

Jak už název napovídá tento typ kombinuje oba předchozí typy. Hlavní výhodou je vysoká energetická hustota. Té je dosaženo díky faradické reakci, která probíhá na záporné elektrodě, jež je obvykle vyrobena z pseudokapacitního elektrodového materiálu. Kladná elektroda je obvykle vyrobena z aktivního uhlí, které ukládá elektrostatickou energii ve dvojité vrstvě na povrchu elektrody. Díky elektrostatické interakci mezi nosiči náboje a povrchem elektrody na straně kladné elektrody mohou hybridní superkondenzátory dodávat vysoké proudy. Jejich konstrukční i provozní hledisko je velmi podobné lithium-iontovým akumulátorům. To vyplývá i z vlastností uvedených v Tabulka 4. [29]

Dle dostupných informací jsou v současné době na trhu komerčně prodávány hybridní SC pouze od výrobců EATON a Cornell Dubilier. Pro příklad EATON nabízí sérii hybridních cylindrických článků. Jejich kapacity jsou od 10 F do 220 F. Maximální napětí článků je 3,8 V. Pracovní teplota (HSL): -25 °C až +60 °C. Úbytek kapacity po 250 000 cyklech je $\leq 30\%$ (HSL). [33]

Pro srovnání technologií jsem vybral dva superkondenzátory se stejnou kapacitou. Hybridní HSL1625-3R8227-R od výrobce EATON a EDLC SCCX50B227SSBLE od výrobce KYOCERA-AVX. Zároveň jsem také zařadil zástupce akumulátorů: Li-Ion akumulátor 18650HG2 s chemickým složením NMC od výrobce LG. Jejich parametry jsou uvedeny v následující Tabulka 4.

Tabulka 4: Porovnání hybridního SC, EDLC SC a akumulátoru Li-Ion [33, 34, 35]

Parametr	HSL1625-3R8227-R	SCCX50B227SSBLE	LG 18650HG2 (3Ah)
Kapacita [F]	220	220	x
Napětí článku [V]	3,8	2,7	3,6
Minimální pracovní napětí [V]	2,2	0	2
Provozní teplota [°C]	-25 °C až +60 °C	-40 °C až +65 °C	Nabíjení: 0 °C až +50 °C Vybíjení: -20 °C až +75 °C
Cena za kWh [Kč]	~ 800 000	~ 1 080 000	~ 14 000
ESR [mΩ]	100	5	30
Špičkový proud [A]	15,3	128	30
Unikající proud [μA]	25	620	neuveđen
Energetická hustota [Wh.kg ⁻¹]	31,17	4,64	229
Energetická hustota [Wh.l ⁻¹]	50,5	6,31	655
Výkonová hustota [W.kg ⁻¹]	3830	3038	1555
Výkonová hustota [W.l ⁻¹]	6206	4986	4242
Energie [Wh]	0,293	0,2228	11

2.2. Důležité parametry a vlastnosti superkapacitorů

Provozní napětí

Mnohem užší dielektrikum vede k řádově nižšímu maximálnímu napětí oproti běžným kondenzátorům. Typické napětí SC je pouze 2,3 až 3 V. Pro zvýšení maximálního napětí musíme superkapacity řadit sériově. V tom případě bude na každém kondenzátoru jen dílčí napětí. Při sériovém řazení se počítá ekvivalentní sériový odpor, a zároveň je celková kapacita menší než kapacita kteréhokoliv kondenzátoru, dle známé rovnice: [31]

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (1.3.)$$

Při sériovém řazení dochází vlivem různých výrobních tolerancí, i rozdílného opotřebení k rozdílným vlastnostem jednotlivých SC. Mezi problémové vlastnosti řadíme především rozdílnou kapacitu a ESR. Tyto vlastnosti vedou k nesouměrnému rozdělení napětí na jednotlivých superkapacitorech. Abychom předešli překročení maximálního napětí superkapacitorů, musíme články balancovat obdobně jako v případě lithiových sekundárních článků. Další možnost řešení překročení maximálního napětí superkapacitorů spočívá v udržování napětí s dostatečným odstupem od maximálního napětí.

Pro aplikace udržující superkondenzátory neustále nabité, typicky různé druhy zálohování, je balancování vyloženě nutností. Naopak u aplikací, kde dochází pouze ke krátkodobému nabití, nemusí být balancování nutné. Balancování spočívá v odvedení nabíjecího proudu mimo již nabité SC na maximální napětí. Tímto způsobem dosáhneme stejného napětí na všech SC. [30]

Nabíjecí a vybíjecí proudy

Jelikož při startování vozidla běžně dochází k odběru proudu ze zdroje (akumulátor vozidla, startovací zdroj) v řádu stovek ampér, je nutné, aby startovací zdroj alespoň částečně zvládal tyto proudy. V případě používání startovacího zdroje bez akumulátoru vozidla musí tyto proudy zvládat sám. Velikost a doba trvání těchto startovacích proudů je podrobněji probrána v kapitole 4.1. Superkapacity jsou vhodné právě pro takovou aplikaci, protože mají vysoké špičkové proudy i vysokou výkonovou hustotu. Těchto vlastností dosahují díky nízkým hodnotám Ekvivalentního sériového odporu (ESR). Právě nízká hodnota ESR je jedním z nejdůležitějších parametrů superkapacitorů pro využití ve startovacích zdrojích. Konkrétní hodnoty ukazuje Tabulka 4. Z této tabulky vyplývá, že superkapacity mají výrazně menší hodnoty ESR než Li-Ion akumulátory a tím dosahují až dvakrát větší výkonové hustoty při

stejně hmotnosti oproti Li-Ion akumulátorům. Případné velké hodnoty ESR vedou k velkému úbytku napětí na superkapacitorech, kdy zbylé napětí nemusí stačit pro roztočení startéru. Například při startovacím proudu 600 A a celkovém ESR superkapacitorů 10 mΩ dojde dle Ohmova zákona k úbytku napětí o 6 V. Když vezmeme v úvahu napětí na superkapacitorech 15 V, zůstane nám na výstupu ze startovacího zdroje pouze 9 V. Tento příklad demonstruje stav, kdy není zapojen startovací akumulátor vozidla. Ve většině případů použití startovacího zdroje ale zůstává startovací akumulátor zapojen, a tím poskytuje část startovacího proudu.

Z výše uvedených důvodů vyplývá, že při výběru superkapacitorů pro startovací zdroj se nemůžeme omezit pouze na provozní napětí a uloženou energii, ale musíme také zohlednit výsledné ESR, aby zařízení bylo schopné dodávat takto vysoké proudy při dostatečném výstupním napětí.

Kapacita

Ze vzorce pro energii kondenzátoru:

$$E = \frac{1}{2} C \cdot U^2 \quad (1.4)$$

vyplývá potřeba zvolení kapacity superkapacitorů, aby tato kapacita uchovala dostatek energie pro nastartování vozidla. Velikost energie potřebné k nastartování osobního vozidla se pohybuje okolo 0,5 Wh, ale závisí na typu vozidla, a proto se této energii věnuje podrobněji kapitola 4.1. Zároveň vzhledem k druhé mocnině napětí je výhodné superkondenzátory řadit sériově, aby dosahovaly co největšího napětí a tím bylo dosaženo vysoké uložené energie. Maximální napětí elektrické soustavy vozidla, zároveň určuje maximální napětí superkondenzátorů. V případě 12 V elektrické soustavy vozidel můžeme prohlásit, že bezpečná hodnota pro většinu vozidel dosahuje minimálně 15 V.

V případě potřeby zvýšení kapacity můžeme využít paralelního řazení, čímž se nám zároveň pozitivně sníží ESR, dle vztahu pro paralelní řazení rezistorů:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (1.5)$$

Kapacita paralelního řazení superkapacitorů je dle známé rovnice pro paralelní řazení kondenzátorů:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (1.6)$$

Provozní teplota

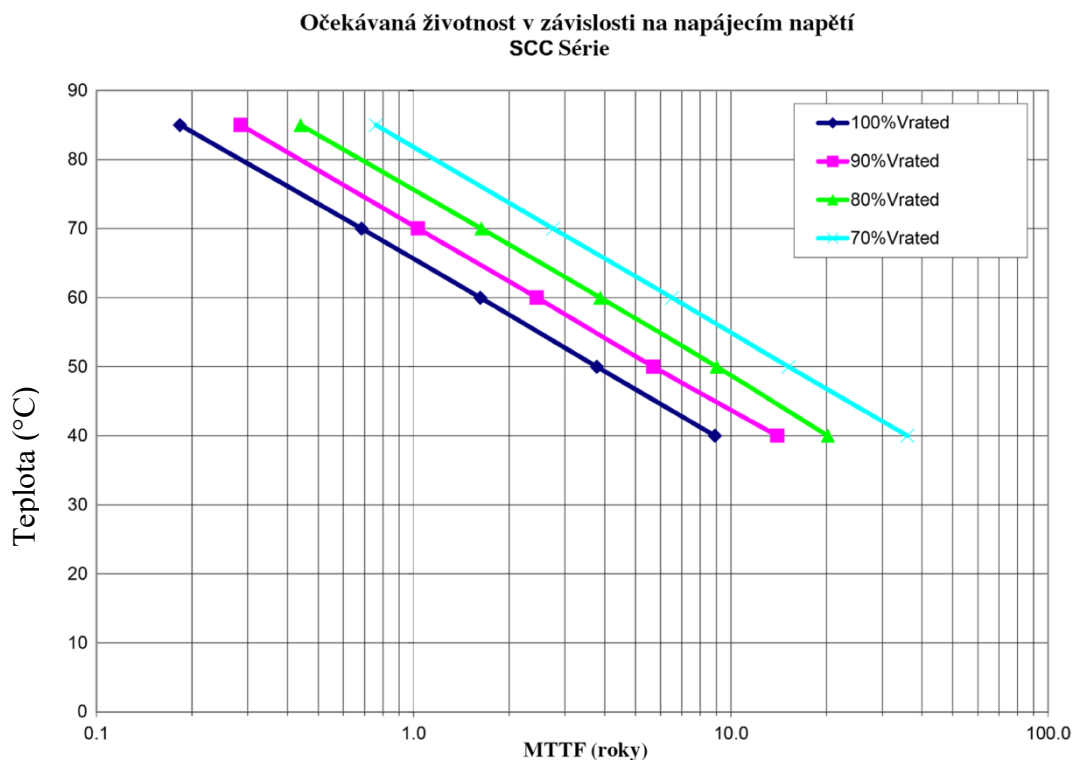
Startovací zdroj se používá převážně za nízkých teplot, kdy tato potřeba pramení z větších mechanických odporů motoru a zároveň z podchlazení akumulátoru vozidla. Provozní teplota tedy patří mezi důležité parametry pro výběr superkapacitorů do startovacího zdroje.

Toto kritérium jasně vedou superkapacity EDLC, pro které je typickou minimální teplotou $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, tudíž na rozdíl od akumulátorů nedochází k žádné nadměrné degradaci. Z toho plyne, že i při těchto nízkých teplotách můžeme EDLC využívat naplno.

Maximální teplota není nikterak omezující, protože dosahuje podobných hodnot jako u akumulátorů. Typickou maximální teplotou superkapacitoru EDLC je $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Životnost

Superkapacity dosahují až čtyřikrát větší životnosti než akumulátory Li-Ion. Životnost se obvykle určuje pomocí statistické veličiny: střední doba do poruchy – MTTF. U superkapacitorů se poruchou obvykle označuje nárůst ESR o víc jak 200 % oproti nominální hodnotě. Typy ELDC dosahují díky plně reverzibilnímu elektrostatickému přenosu náboje téměř neomezeného počtu cyklů. Naopak vliv na životnost superkapacitoru má jeho teplota, i napájecí napětí. Například pro superkondenzátor SCCX50B227SSBLE popisuje životnost Obrázek 15.



Obrázek 15: Střední doba do poruchy superkapacitoru [34]

3. Možnosti nabíjení startovacích zdrojů

U startovacích zdrojů založených na akumulátorové technologii, ať už lithiové nebo olověné, se počítá s udržováním nabitého stavu akumulátorů po celou dobu aktivního používání. Proto jsou většinou opatřeny nějakým typem konektoru USB nebo adaptérem do sítě. V případě vybití akumulátoru je booster odstaven z provozu na několik hodin z důvodu nabíjení.

Samostatnou kapitolu vytvářejí startovací vozíky, které ke své funkci vyžadují připojení k síti.

U superkapacitorové technologie se vzhledem k vysokým hodnotám unikajícího proudu nepředpokládá trvalé nabití. Naopak jsou superkapacitory schopny se velmi rychle nabít, a proto musí být vybaveny několika možnostmi nabití. Jelikož akumulátor vozidla může být vybitý natolik, že zbytková energie nebude stačit na nabití superkapacitorů, je vhodné, aby startovací zdroj nabízel i jiné možnosti nabití superkapacitorů. Dalšími možnostmi jsou například nabití z jiného akumulátoru – nevyžaduje žádné úpravy, pouze je vhodné pro pohodlnější obsluhu zařízení dodávat s redukčním kabelem do autozapalovače. Zařízení může být vybaveno i interním akumulátorem, které mimo jiné může zajišťovat napájení ovládacích obvodů. Běžný lithiový akumulátor velikosti 18650 obsahuje okolo 10 Wh energie, což je zhruba dvakrát více než energie uložená ve startovacích zdrojích tohoto typu.

USB

USB bylo vynalezeno pro jednoduché připojení počítače s ostatními periferiemi. Postupně se z USB stalo nejúspěšnější rozhraní v historii. [1] Mezi hlavní výhody patří funkce plug and play, velmi vysoká rozšířenost, možnost napájení periferií a dle standartu i velmi vysoká přenosová rychlost – pro USB4 až 80Gbps.



Obrázek 16: Konektor typu USB-C (autor)

Postupem času vznikla potřeba pro napájení zařízení o větším příkonu než původních 2,5 W (5 V, 1 A). Jako odpověď na tento problém vznikl standart USB PD. Současná specifikace USB PD 3.1 má několik napět'ových úrovní (5 V, 9 V, 15 V, 20 V, 28 V, 36 V a 48 V). Díky těmto napětím a zvýšením proudu konektorem typu USB Type-C® až na 5 A se podařilo dosáhnout výstupního výkonu až 240 W. [3]

Konektorů pro standart USB bylo vytvořeno několik. Nyní se však na většině zařízení objevuje konektor USB Type-C®, který je oblíbený u uživatelů především pro svou vlastnost rotační symetričnosti a menší velikosti ve srovnání se staršími typy. Může dosáhnout proudu až 5 A. Pro své vlastnosti a potřebu sjednocení konektorů byl vybrán parlamentem Evropské Unie. Konkrétně se jedná o směrnici Evropské Unie č. 2022/2380, ve které je stanovena povinnost používat tento konektor jako standart pro nabíjení mobilních telefonů od roku 2024 a notebooků od roku 2026. [4]

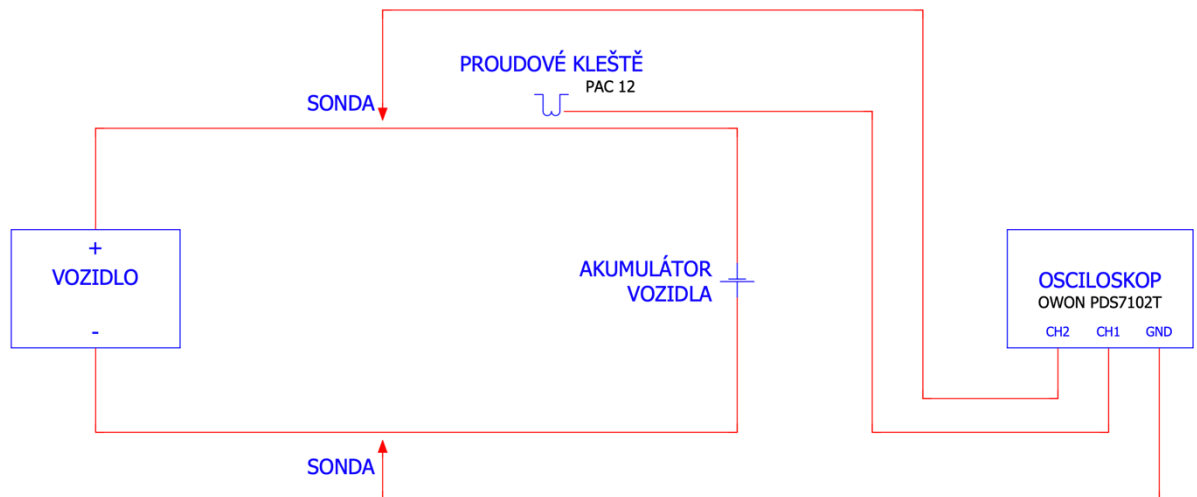
Masivní rozšíření USB Type-C® (powerbanky, nabíječky, automobily atd.) spolu s dostatečným výkonem díky USB PD vytváří ideální kombinaci pro účely nabíjení startovacího zdroje.

4. Realizace startovacího zdroje

Konstruovaný startovací zdroj je určen pro osobní vozidla s nejběžnější 12 V elektrickou soustavou. Obsahuje ochranu proti přepólování a nabízí mnoho způsobů nabíjení včetně USB PD. Dosahuje nadstandardní energie 2,6 Wh, kdy jeho špičkový proud je až 1600 A.

4.1. Požadavky na parametry konstruovaného startovacího zdroje

Pro stanovení startovacích požadavků na startovací zdroj bylo nejprve provedeno měření startovacích potřeb u čtyř standardních osobních vozidel. Dvě vozidla měla vznětový motor a dvě zážehový motor. Měřenými parametry bylo napětí, proud a čas potřebný k úspěšnému nastartování vozidla. Z těchto parametrů byla dále vypočítána energie potřebná k nastartování vozidla. Schéma zapojení měření na každém vozidle vyjadřuje Obrázek 17.



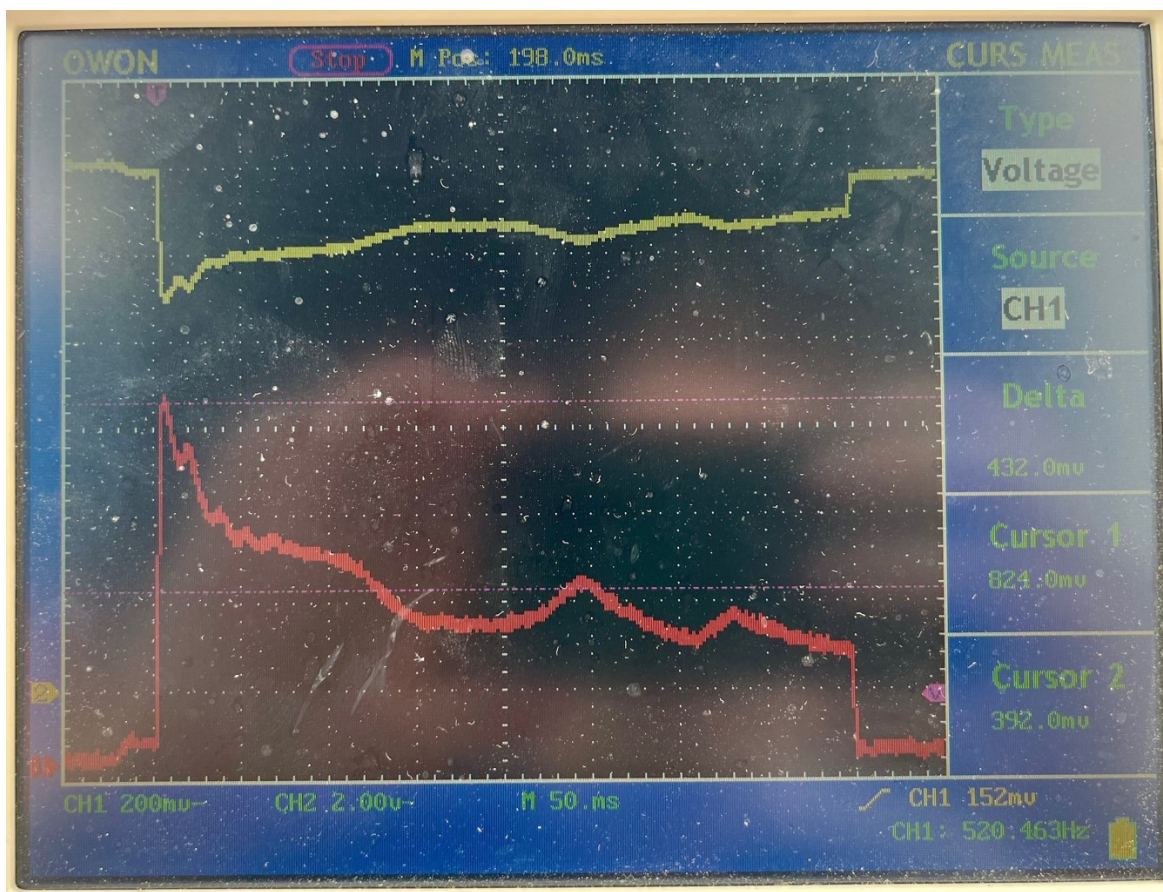
Obrázek 17: Měření proudu a napětí při startování (autor)

Měřicí schéma zapojení je také dobře patrné z fotografie průběhu měření, která je přiložena jako Obrázek 18:



Obrázek 18: Měření startovacích parametrů na vozidle Škoda Kodiaq (autor)

Pro účely měření byl použit osciloskop OWON PDS7102T, proudové kleště PAC-12 a sonda pro měření napětí. Všechna měřená vozidla byla měřena za stavu takzvaného studeného startu – teplota motoru se téměř rovná teplotě okolí. Tento stav je nejvíce náročný na energii startéru z důvodu vyšších mechanických odporů. Typický průběh napětí a proudu je zobrazen jako Obrázek 19. Červená stopa CH1 představuje startovací proud zaznamenávaný pomocí proudových kleští (1 mV / A). Žlutá stopa CH2 představuje napětí během startu.



Obrázek 19: Průběh napětí a proudu při startování Škoda Kodiaq (autor)

Výsledky tohoto měření zobrazuje Tabulka 5.

Z tabulky vyplývá, že energie uložená v superkapacitorech musí být alespoň 0,6 Wh pro start vznětového motoru bez připojeného akumulátoru. S připojeným akumulátorem se energie odevzdaná vozidlu dělí na energii ze startovacího zdroje a z akumulátoru vozidla. Proto pro další výpočty budeme uvažovat odpojený akumulátor, což vyžaduje 100% energie ze startovacího zdroje. To stejné platí i pro špičkový proud. Navýšení potřebné energie je dáno způsobem ukládání energie v kondenzátoru, kdy část energie zůstane nevyužita, protože výstupní napětí nestačí na přidržení cívky startéru a ani na dostatečné startovací otáčky. Toto napětí závisí na konkrétním typu startéru a motoru, ale pohybuje se okolo 7 V. Z toho plyne, že energie uložená v superkapacitorech s napětím nižším než 7 V nesmí být zahrnuta do výpočtu. Naopak pokud budeme superkapacitory dimenzovat na větší energii, umožní nám to opakované pokusy o nastartování bez nutnosti průběžného dobíjení. Dále mohou být tyto pokusy i časově náročnější, např. z důvodu poruchy vozidla. Zároveň budeme mít dostatek energie i pro výkonnější motory. Hlavní nevýhodou využití velké energie je cena za superkapacitory a případně i rychlost nabíjení.

Tabulka 5: Měření startovacích potřeb osobních automobilů (autor)

	Vozidlo			
	Škoda Kodiaq kombi 2.0 TDI (A7) 110 kW r.v. 2023	Škoda Octavia I kombi tour 1U5 1.9 TDI 66 kW r.v. 2005	Lada VAZ 2105 sedan 1.3 48 kW r.v. 1986	Ford focus kombi 1.6 16V 74 kW r.v. 2011
Palivo	Diesel	Diesel	Benzín a LPG	Benzín
Špičkový proud [A]	830	736	392	610
Střední hodnota proudu [A]	330	260	152	118
Minimální hodnota napětí [V]	9,52	8,9	9,92	7,84
Střední hodnota napětí [V]	10,65	10,7	11,58	10,87
Čas potřebný pro nastartování [ms]	400	540	520	630
Energie potřebná pro nastartování [Wh]	0,39	0,42	0,25	0,22

Dalším parametrem, na který musíme startovací zdroj sestrojít, je špičkový proud. V případě startování vozidla bez akumulátoru musí být zařízení schopno tento proud dodat při minimálním napětí alespoň 7 V (viz. předchozí odstavec). Velikost proudu ze superkapacitorů závisí především na hodnotě ESR. Nejvyšší hodnoty špičkového proudu dosáhlo vozidlo Škoda Kodiaq – 820 A. Je vhodné dimenzovat proud na mírně vyšší hodnotu, proto byla zvolena hodnota špičkového proudu pro výpočet maximální hodnoty ESR 850 A. Maximální napětí superkapacitorů může být 15 V (viz. kapitola 2.2. Kapacita). Z rozdílu maximálního a minimálního napětí plyne, že maximální úbytek napětí ΔU je 8 V. Z Ohmova zákona nám vyjde maximální hodnota ESR:

$$R = \frac{\Delta U}{I} = \frac{8}{850} = 9,5 \text{ m}\Omega \quad (1.7.)$$

Na základě těchto parametrů bylo vybráno 30 ks superkapacitorů BCAP0140 E250 od výrobce Maxwell technologies. [36]

4.2. Parametry vybraných superkapacitorů

Parametry vybraných superkapacitorů BCAP0140 E250 od výrobce Maxwell technologies popisuje Tabulka 6.

Tabulka 6: Parametry BCAP0140 E250 [36]

Parametr	BCAP0140 E250
Kapacita [F]	140
Maximální napětí článku [V]	2,5
Provozní teplota [°C]	-40 °C až +65 °C
ESR [mΩ]	7,2
Špičkový proud [A]	530
Unikající proud [μA]	100
Energetická hustota [Wh.kg-1]	4,19
Výkonová hustota [W.kg-1]	3500
Energie [Wh]	0,12
Délka [mm]	51
Průměr [mm]	26

Superkapacitory jsou umístěny v sérioparalelní kombinaci. Sériová kombinace poskytuje potřebné vyšší napětí. Paralelní zajišťuje větší kapacitu a nižší ESR.

Na základě kapitoly 2.2. Kapacita je vytvořena sériová kombinace šesti kusů superkapacitorů (Počet kusů = $U_{\text{požadované}} / U_{\text{článku}} = 15 / 2,5 = 6$). Výpočet kapacity této sériové kombinace plyne z rovnice:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (1.8.)$$

kdy po dosazení vyjde 23,33 F. Hodnota ESR této sériové kombinace je dána rovnicí pro sériové řazení rezistorů:

$$R_{\text{celk.}} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 \quad (1.9.)$$

po dosazení nám vyjde 43,2 mΩ. Pro výpočet energie této sériové kombinace použijeme:

$$E = \frac{1}{2} C \cdot U^2 \quad (1.10.)$$

kdy za C dosadíme 23,33 F a za U budeme dosazovat hodnotu 14,5 V z důvodu ochrany proti přebíání. Po dosazení do vzorce energie vychází na 0,68 Wh.

Z kapitoly 4.1 vyplývá, že uložená kombinace je v této sériové kombinaci dostatečná. Vypočítaná minimální energie je 0,6 Wh a tato kombinace má 0,68 Wh. Oproti tomu hodnota ESR je nedostatečná. Maximální požadovaná hodnota je 9,5 mΩ a tato sériová kombinace má 43,2 mΩ. Proto je nutné přidat k této sériové kombinaci ještě paralelní. Počet paralelních kombinací plyne ze vzorce: Počet kombinací = $R_{\text{kombinace}} / R_{\text{požadované}} = 43,2 / 9,5 = 4,5$. Jelikož kombinace nejde dělit musíme použít 5 paralelních kombinací.

Celkové zapojení se tedy skládá z pěti paralelních řad, kde každá řada obsahuje šest sériově zapojených superkapacitorů BCAP0140 E250. Dohromady je tedy použito třicet kusů superkapacitorů. Parametry tohoto zapojení vyjadřuje Tabulka 7.

Tabulka 7: Parametry superkapacitorového modulu (autor)

Parametr	Superkapacitorový modul
Kapacita [F]	116,7
Maximální napětí [V]	15
Provozované napětí [V]	14,5
Provozní teplota [°C]	-40 °C až +65 °C
ESR [mΩ]	8,64
Špičkový proud [A]	1600
Využitelný proud [A]	926
Energie [Wh]	3,4
Využitelná energie [Wh]	2,61

4.3. Vybrané možnosti napájení

Nabíjení startovacího zdroje nejrychlejším způsobem by nemělo zatěžovat obsluhu dlouhým čekáním. Proto byl stanoven maximální čas nabíjení z 0 na 100 % na čtyři minuty (240 s). Aby DC / DC měnič umístěný v konstruovaném startovacím zdroji splňoval tuto podmínku a tím byl správně navržen, musíme znát nabíjecí proud v režimu konstantního proudu. Pro určení minimálního nabíjecího proudu potřebného pro výpočet byl použit vzorec pro proud procházející kondenzátorem:

$$I = C \frac{dU}{dt} \quad (1.11.)$$

Po dosazení:

$$I = 116,7 \frac{14,5}{240} \quad (1.12.)$$

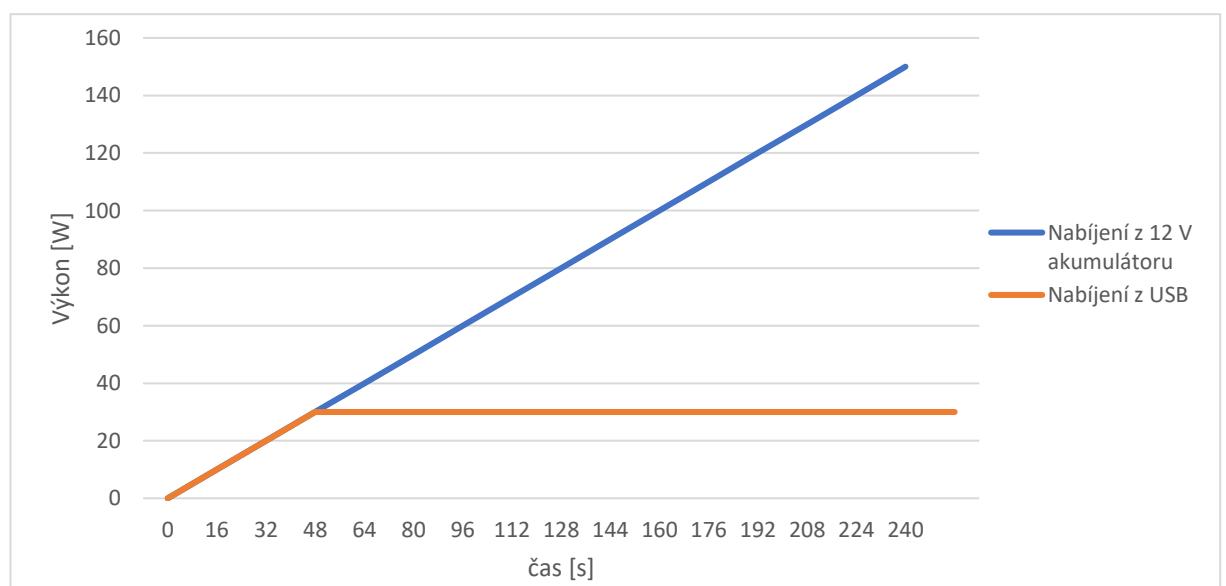
vychází minimální proud na 7 A. [37]

Konstruované zařízení obsahuje jako zdroj elektrické energie superkapacitory. Z tohoto důvodu byly vybrány následující možnosti napájení.

- Z akumulátoru vozidla, a nebo externího 12 V akumulátoru. Nabíjecí výkon až 150 W.
- Z dvojice interních Li-Ion akumulátorů. Nabíjecí výkon až 40 W.
- Z konektoru USB Type-C® podporující standart USB PD až do napěťové úrovně 15 V / 2 A. Nabíjecí výkon až 30 W.

S přihlédnutím k toleranci součástek je DC / DC měnič dimenzován na nabíjecí proud až 10 A. Zároveň musí pracovat už od 5 V pro podporu základního standartu USB. Také musí zvládnout alespoň 15 V pro podporu USB PD i akumulátoru vozidla.

Nabíjecí výkon není na rozdíl od proudu konstantní. Závisí na napětí superkapacitorů a maximálním výkonu zdroje nabíjení. Omezování nabíjecího výkonu musí být zajištěno u USB a pro delší životnost Li-Ion akumulátorů je vhodné ho využít i u nabíjení z interních akumulátorů. Potřebu omezit nabíjecí výkon zjistí mikrokontrolér, provede přepočten na výstupní proud a tuto informaci předá pomocí analogového výstupu 0 až 2 V do řídicího obvodu DC / DC měniče. Průběh nabíjecího výkonu v závislosti na čase zobrazuje Obrázek 20.



Obrázek 20: Nabíjecí výkon DC / DC měniče (autor)

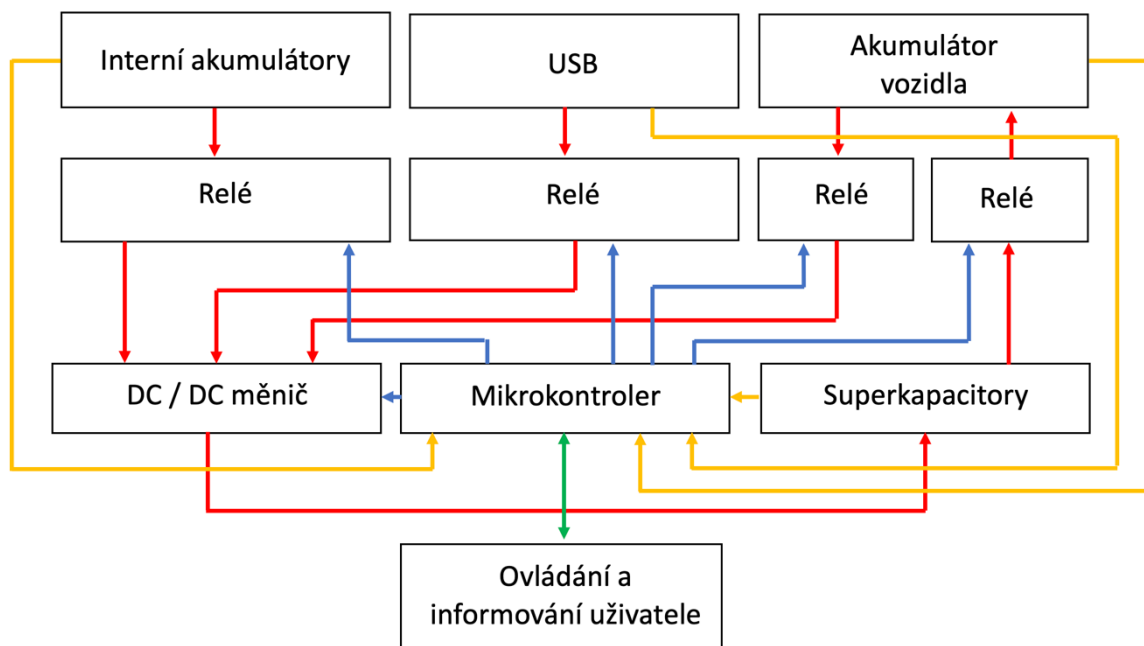
4.4. Zvolená topologie startovacího zdroje

Přední ovládací panel obsahuje veškeré ovládací prvky, konektor USB i pro informování uživatele dvouřádkový LCD displej. Tento panel zobrazuje Obrázek 21. Uživatel zařízení ovládá pomocí čtyř tlačítek podrobněji popsanych v kapitole Ovládání. Výstupní vodiče mají délku 80 cm a jsou zakončeny svorkami pro pohodlné připojení k akumulátoru vozidla. Plusový vodič má oranžovou barvu a červenou svorku. Naopak minusový vodič má modrou barvu a černou svorku. Pro snadnou manipulaci nechybí madlo.



Obrázek 21: Pohled na konstruovaný startovací zdroj (autor)

Zařízení dále obsahuje mikrokontrolér, sestavu superkapacitorů, DC / DC měnič a mnoho pomocných obvodů. Obrázek 22 znázorňuje blokové schéma zapojení konstruovaného startovacího zdroje. Žlutě jsou vyznačeny vstupy pro mikrokontrolér, zeleně komunikace mezi mikrokontrolerem a uživatelem, modrá barva představuje výstupy z mikrokontroleru a červená představuje tok energie. Kompletní zapojení všech prvků se nachází v kapitole Desky plošného spoje.



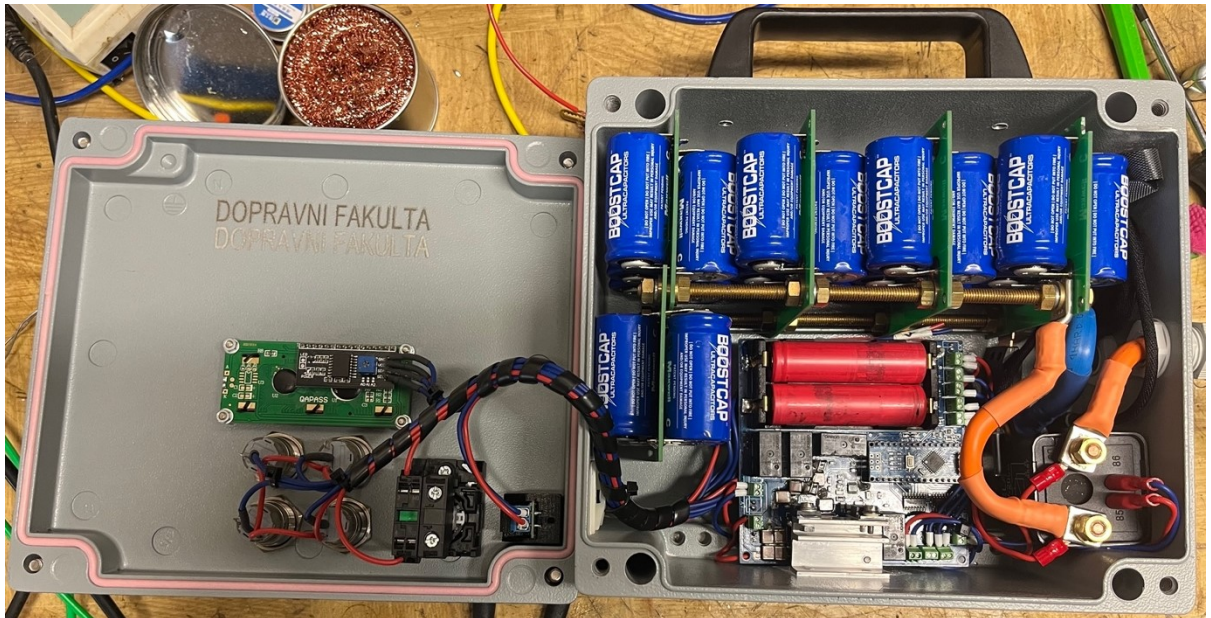
Obrázek 22: Blokové schéma konstruovaného startovacího zdroje (autor)

Zapnutí zařízení se provádí vypínačem na čelním panelu. Zapnutím vypínače dojde k přivedení napětí z interních akumulátorů na napájecí svorky mikrokontroleru, 5 V relé i řídicí obvod DC / DC měniče. Mikrokontrolér následně provede inicializaci, čímž dojde k zapnutí.

DC / DC měnič zajišťuje nabíjení superkapacitorů. Jeho vstup je přepínán na základě výběru uživatele za pomoci příslušného 5 V relé. Možnosti napájení jsou popsány v kapitole Vybrané možnosti napájení. Každou možnost napájení spíná jedno relé. Pro podporu USB PD je použit modul ZY12PDN, který zajišťuje podporu napětí vyšších než 5 V a zároveň vybírá napětí, které není větší než 15 V. Připojený USB adaptér musí podporovat minimální proud 2 A. Slabší adaptéry nejsou podporovány. Výstup s DC / DC měniče je spojen napřímo se soustavou superkapacitorů.

Relé propojující sestavu superkapacitorů s elektrickou soustavou vozidla je ovládáno pouze v režimu startování na základě poklesu napětí v čase. Toto vyhodnocení provádí mikrokontrolér a pro sepnutí relé je potřeba pokles napětí o minimálně 1 V za 100 ms. Po sepnutí relé začne mikrokontrolér vyhodnocovat několik parametrů. Spustí se časovač

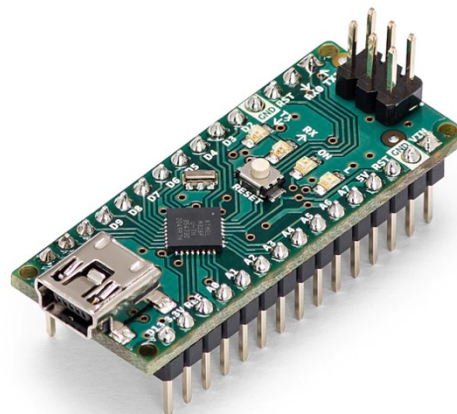
maximální délky sepnutí nastavený na 10 s, po této době je program startování automaticky ukončen a tím se i rozezne relé. Kontroluje se napětí na superkapacitorech, pokud je menší než 2 V, program se ukončí stejně jako v předchozím případě. V případě napětí elektrické soustavy vozidla větší než 13 V dojde po 2 s k ukončení programu z důvodu úspěšného nastartování vozidla. Samozřejmostí je text na LCD o konkrétním důvodu ukončení programu.



Obrázek 23: Odkrytý konstruovaný startovací zdroj

4.4.1. Mikrokontrolér

Pro svou jednoduchost implementace, rozměry, cenu, nízkou spotřebu a uživatelskou základnu byl pro řízení startovacího zdroje vybrán mikrokontrolér Arduino Nano. Ten řídí a ovládá celé zařízení.



Obrázek 24: Arduino Nano [28]

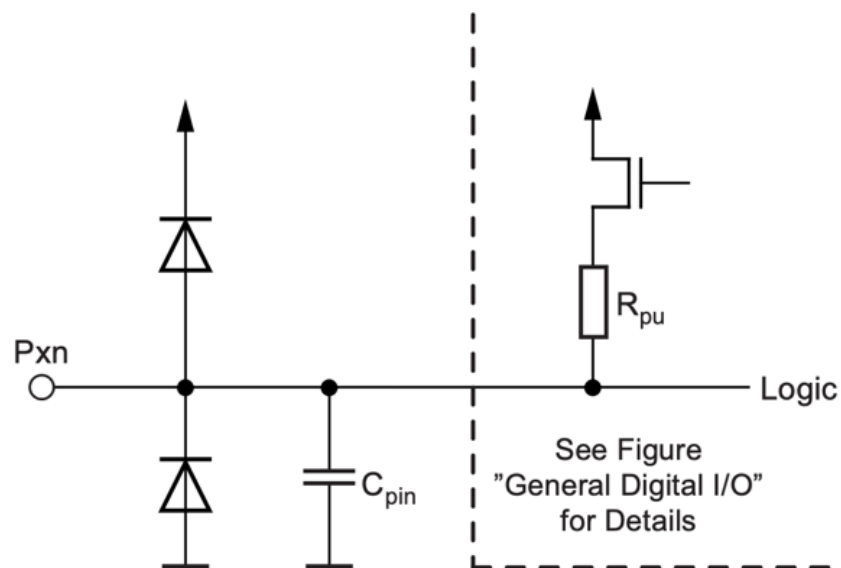
Arduino Nano je založeno na procesoru Atmega 328. Obsahuje 14 digitálních vstupně výstupních portů, šest PWM portů a osm analogových portů. Z rozhraní podporuje

USART, I2C a SPI. Pracuje s logickými úrovněmi 0-5 V. To vše při celkové velikosti zařízení pouze 43 x 18 mm. Rozsah pracovního napětí 7-12 V. Programování probíhá pomocí portu USB. V zařízení je umístěno Arduino Nano s portem USB Type-C®.

Arduino Nano v zařízení zajišťuje uživatelské vstupy a výstupy, ovládání relé, různé druhy ochran, dále nastavuje proud DC / DC měniče i měření potřebných napětí (popsáno v kapitole Měření napětí).

4.4.2. Měření napětí

Zařízení potřebuje pro správnou funkci měřit následující napětí: napětí na svorkách pro připojení automobilu, napětí interních akumulátorů, napětí USB a napětí sestavy superkapacitorů. Podporované napětí každého vstupu je v rozsahu 0 až +15 V. Napětí jsou přivedena na napěťové děliče, kde jsou přivedena na signály 0 až 5 V, tyto signály jsou už shodné s napěťovou úrovní mikrokontroleru. Napěťové děliče zároveň omezují proud do mikrokontroleru v případě připojení nepodporovaného napětí. Tato ochrana je založena na diodách umístěných uvnitř každého vstupu mikrokontroleru Atmega 328 vyobrazených na Obrázek 25. Pokud dojde k připojení napětí s opačnou polaritou, proud bude procházet spodní diodou. Pokud dojde k překročení maximálního napětí, proud bude procházet horní diodou. Maximální proud protékající těmito diodami je 1 mA [38]. Na základě těchto informací byly vypočítány odpory děličů tak, aby minimální rozsah této ochrany byl -15 V až +40 V. Tato ochrana tak tvoří významnou součást ochrany proti přepólování. Ochranu proti přepólování dokončuje mikrokontrolér, který na základě nepodporovaného napětí neprovede, nebo případně ukončí sepnutí relé. Tímto způsobem nehrozí zbytku zařízení poškození.



Obrázek 25: Řešení IO Atmega 328[38]

4.4.3. Spínání elektromagnetických relé

Výstupy Arduina neumožňují přímé ovládání relé, jelikož by došlo k překročení maximálního proudu výstupu. Maximální trvalý proud je v případě použitého Arduino Nano 20 mA, proud relé je 40 mA. Nutno též přihlídnout k přechodným dějům na cívce relé během rozpínání obvodu. Vzniklé přepětí na spínacím tranzistoru výstupu MCU jej může bez příčinných ochran trvale poškodit. Z tohoto důvodu je nutné pro spínání relé použít dodatečný obvod. Jelikož startovací relé nebylo nalezeno v 5 V verzi, musí být dodatečné obvody dva – jeden pro 5 V relé a druhý pro 12 V relé. Funkci obou spínacích obvodů zajišťují IC ULN2003AD v doporučeném zapojení pro spínání relé. Každé relé je opatřeno flyback diodou. Jako zdroj napájení u 5 V relátek je zvoleno napájecí napětí z interních akumulátorů. I když tento zdroj napájení poskytuje napětí okolo 8,4 V, a tak je vyšší než předepsaných 5 V, je stále v toleranci výrobce. [11] Jako zdroj napájení pro 12 V relé bylo zvoleno napětí na superkapacitorech. Pro toto relé není žádoucí a ani není potřeba, aby bylo sepnuto při vybitých superkapacitorech. Toto řešení je HW ochranou před spojením vybitých superkapacitorů, např. s elektrickou soustavou vozidla, kdy by mohlo dojít k poškození vozidla vlivem nadměrného odběru proudu.

4.4.4. Řídící obvod DC / DC měniče

Na trhu existují řádově vyšší desítky řídicích obvodů splňujících hlavní parametry. Mezi tyto parametry patří konstantní zdroj proudu, kdy s dosažením určitého napětí je potřeba přechod do režimu konstantního zdroje napětí. Tato charakteristika se také nazývá CC-CV podle anglického constant current – constant voltage. Dále musí splňovat rozsah napájecího napětí 5-15 V, maximální výstupní napětí alespoň 15 V a musí podporovat jak snižující, tak i zvyšující režim. Většina těchto obvodů je určena pro napájení LED, protože požadavky na napájení jsou velmi podobné. Ale dají se najít obvody určené přímo pro superkapacitory.

Vzhledem k roku realizace práce přibyla mezi parametry i dostupnost. Dostupnost vybraných řídicích obvodů se ukázala jako největší překážka při výběru. Skladové zásoby polovodičů byly narušeny celosvětovým nedostatkem čipů, který odstartovala pandemie COVID-19. [5]

Jelikož startovací akumulátor vozidla slouží k nabíjení superkapacitorů a zároveň jsou při startování superkapacitory elektricky propojeny s vozidlem, je výhodné, aby spínaný zdroj nebyl invertující. Tedy aby neměnil polaritu vstupu vůči výstupu. V případě invertované polarity je potřebné superkapacitory kompletně elektricky odpojovat. S přihlédnutím k

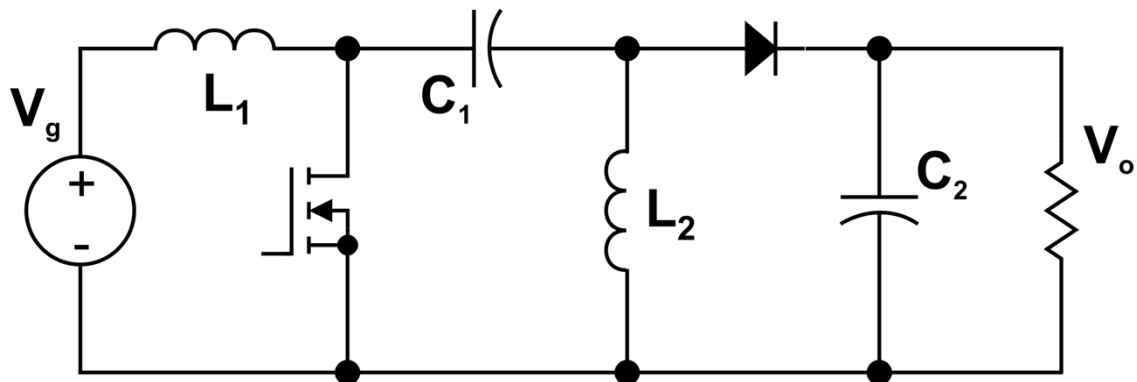
vysokým startovacím proudům není toto řešení vhodné, došlo by k vysokým nákladům na realizaci. Dalším řešením tohoto problému je izolovaný spínaný zdroj, který se řadí mezi dražší typy spínaných zdrojů. Proto byl jako typ spínaného zdroje vybrán SEPIC.

Pro zrychlení a odladění návrhu spínaného zdroje je velmi doporučeno použít simulační program. Jelikož jsme na univerzitě pracovali s programem LtSpice od společnosti Analog Devices, bylo výhodné ho využít i pro potřebné simulace v této BP. Bohužel LtSpice obsahuje pouze obvody spínaných zdrojů od společnosti Analog Devices.

S přihlédnutím k výše popsaným skutečnostem byl vybrán řídicí obvod LT3761 od společnosti Analog Devices. Významnou výhodou tohoto obvodu je možnost regulace výstupního proudu.

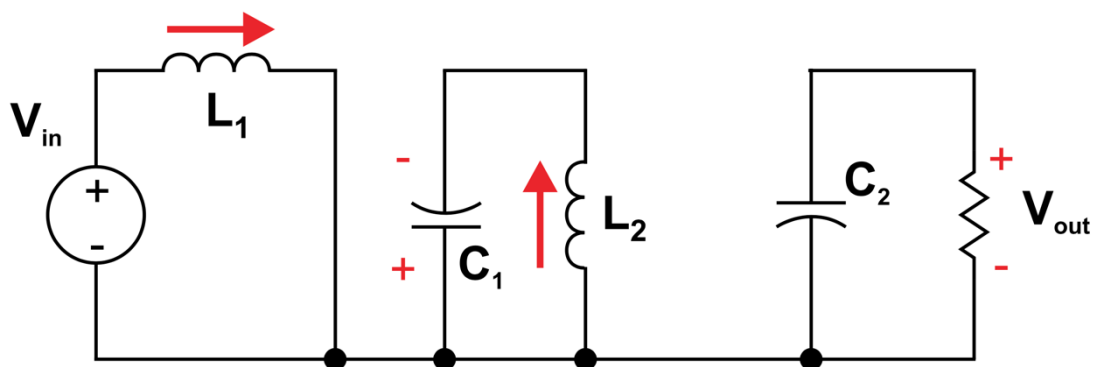
Sepic

Název vychází z anglického „single-ended primary-inductor converter“. Jedná se o neizolovanou a neinvertující topologii DC / DC měniče. Tato topologie umí pracovat jak ve snižujícím, tak i zvyšujícím režimu. Mezi nevýhody této topologie patří složitější regulační charakteristika na rozdíl například od Buck-Boost, nebo flyback. Dle typu aplikace může pracovat s účinností přes 90 %. Typickým znakem topologie SEPIC jsou dvě cívky, které bývají vzájemně sprzęžené. Typické zjednodušené zapojení vyjadřuje Obrázek 26.



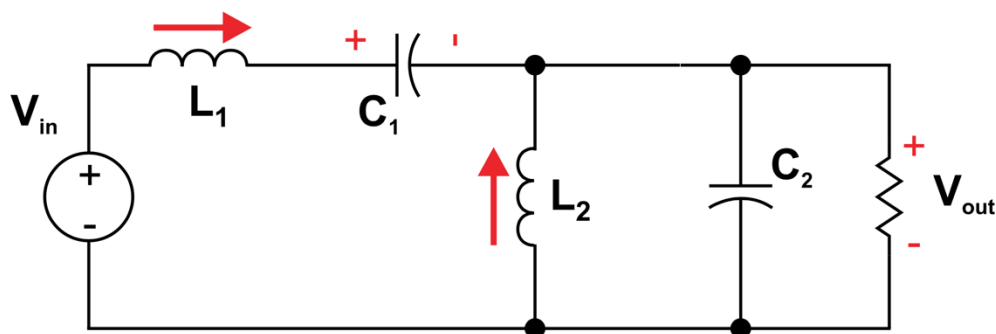
Obrázek 26: Zapojení SEPIC [39]

Pro pochopení principu funkce je důležité si uvědomit, že proud přes C_1 mění svůj směr s každou změnou stavu spínače (např. tranzistoru MOSFET), zároveň se pochopitelně směr proudu přes cívky L_1 , L_2 nemění. Topologie nabývá dvou stavů – rozepnutý a sepnutý spínač. Tyto stavy se neustále opakují, frekvence záleží vždy na konkrétním obvodu. V konstruovaném startovacím zdroji je zvolena na 300 kHz.



Obrázek 27: Chování SEPIC při sepnutém stavu spínače. [39]

Sepnutím spínače dochází k akumulaci energie v cívce L_1 , tato energie pochází ze zdroje napájení a dochází při ní k nárůstu proudu cívkou. Cívka L_2 také akumuluje energii, ovšem z kondenzátoru C_1 . Kondenzátor C_1 je nabitý z předchozího cyklu a v tomto stavu tedy dochází k jeho vybíjení ve prospěch nárůstu proudu cívkou L_2 . Výstup měniče je napájen pouze z kondenzátoru C_2 , který byl nabit v předchozím cyklu. Tento stav názorně zobrazuje Obrázek 27.



Obrázek 28: Chování SEPIC při rozepnutém stavu spínače [39]

Rozepnutím spínače dochází k nárůstu napětí na cívkách L_1 i L_2 . Tyto nárůsty napětí způsobí průchod proudu sloužící k nabíjení C_1 zároveň přes diodu i pro C_2 a napájení výstupu. Tento stav popisuje Obrázek 28.[39, 6]

4.4.5. Výběr klíčových komponent DC / DC měniče

Veškeré součástky byly vybrány na základě doporučení a vzorců výrobce uvedených v datasheetu řídicího obvodu DC / DC měniče. [6] Drobnou komplikaci způsobuje poměrně velký rozsah napájecího napětí 5 až 15 V a zároveň i velký rozsah výstupního napětí 0 až 14,5 V. Součástky se proto musí volit vždy pro tu nejhorší variantu. V případě nejistoty výběru byla použita simulace v programu LtSpice. Konkrétní hodnoty součástek i celkové zapojení je zobrazeno v kapitole 4.5 Schéma zapojení. Cenným dokumentem pro návrh DC / DC měniče s

topologií Sepic je: Designing DC/DC converters based on SEPIC topology od autora Jeff Falin ze společnosti Texas Instruments. [40]

Všechny keramické kondenzátory v obvodu DC / DC měniče jsou použity s dielektrikem X7R. Toto dielektrikum zajišťuje jedny z nejlepších vlastností mezi keramickými kondenzátory, a proto jsou i doporučeny výrobcem řídicího obvodu. Klíčový kondenzátor C42 je vlivem změny směru proudu jednou z nejnámáhavějších součástí v topologii Sepic. Proto se ukázalo, že pro zmenšení ztrát je vhodné jeho kapacitu zvýšit. Tudíž byl původní keramický kondenzátor 2220 15 μF nahrazen obdobným, ale s větší kapacitou 47 μF .

Výstupní MOSFET byl v původním návrhu použit IRFZ44N. Tento MOSFET splňuje veškeré požadavky, ale pro zmenšení ztrát je ve finálním zařízení použit jiný – RX3L07BBG. Tento nový MOSFET má celkový náboj hradla pouze $Q_g = 47 \text{ nC}$, což má za následek nižší teplotu řídicího obvodu LT3761. Mezi další výhody tohoto MOSFETU patří nižší odpor v sepnutém stavu: $R_{DS} = 4,6 \text{ m}\Omega$ oproti původním 17,5 $\text{m}\Omega$. [9] [10]

Schottkyho dioda D1 na výstupu. Hlavními parametry diody pro toto použití je úbytek napětí, který stojí za ztrátami na této součástce. Další parametr výběru je maximální proud, který může diodou trvale procházet a ztrátový výkon. Při návrhu byl opomenut ztrátový výkon, kdy došlo k přehřívání vybrané diody RBQ10RSM65B. Tato dioda měla v datasheetu jako poznámku malým písmem napsáno, že se jedná o proud, který je trvale možný pouze pokud součástku přiletujeme na hliníkové nožičky pro odvedení tepla. Ztrátový výkon vycházel na 6 W. [7] DPS musela být provrtána a vložena dvojitá dioda VFT3045CBP v pouzdru TO-220. Zároveň má tato nová dioda menší úbytek napětí V_F pro zmenšení ztrát. Ztráty na diodě se tedy výrazně zmenšily: při $T_A = 125 \text{ }^\circ\text{C}$ 3 W a při $T_A = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 4 W. [8]

4.4.6. Li-Ion akumulátory 18650

Na DPS řízení jsou v držáku umístěny dva lithium-iontové akumulátory velikosti 18650 zapojené v sérii. Zajišťují řídicí napájení pro Arduino, obvod spínaného zdroje, i 5 V relátka. Jejich dalším využitím je možnost nabití superkapacitorů.

Akumulátory jsou připojeny do BMS, která zajišťuje bezpečné a efektivní fungování bateriového úložiště. Obsahuje ochranu proti vybití i přebití, zajišťuje ochranu proti zkratu a např. balancováním článků se stará o správné nabíjení a vybití. V případě vybití akumulátoru dojde k vypnutí výstupu BMS a tím i celého zařízení. Bohužel má modul BMS několik problémů. V popisku na webových stránkách prodejce sice uvádí, že má ochranu před

přepólováním, nicméně byly akumulátory omylem vloženy opačně a BMS byla v sepnutém stavu. To vede k obrácené polaritě napětí na všech prvcích, které využívají napětí z akumulátorů. Naštěstí byl vypnutý vypínač, a tak nic nebylo napájeno. Další problém se děje při vyjmutí a následném vložení baterií. BMS nesepe výstup, z čehož plyne nefunkčnost zařízení. Sepnutí výstupu proběhne připojením napájení na výstup BMS. Řešením těchto problémů je výměna BMS modulu za jiný typ.

Tyto dva akumulátory se dají využít jako zdroj energie pro nabití superkapacitorů. Uložená energie záleží na konkrétním modelu akumulátoru, ale v případě použití výše popsané LG 18650HG2 bude energie dosahovat 22 Wh. Tato energie vystačí minimálně na pět plných nabití superkapacitorů.

O nabíjení těchto akumulátorů se stará speciální modul nabíjení Li-Ion akumulátorů TP5100. Nabíjení se zapíná z hlavní nabídky, kdy musí být nejprve nabitý superkapacitor. V případě splnění této podmínky již stačí připojit USB a počkat na úplné nabití. Je doporučeno připojit USB PD alespoň 10 V / 2 A. V opačném případě nemusí výkon připojeného USB stačit k nabíjení a dojde k vybití superkapacitorů, kdy při poklesu pod 8 V dojde k ukončení nabíjení. Vyhodnocení nabití je provedeno na základě napětí akumulátorů a výstupu z modulu TP5100. V průběhu nabíjení je po celou dobu kontrolováno nabití superkapacitorů a připojení podporovaného USB.

V původním návrhu nebyla správně promyšlena funkce nabíjení akumulátorů 18650. Původní řešení bylo navrženo pomocí modulu STEP-DOWN, který sníží napětí na 8,4 V a spínaný zdroj bude pomocí funkce nastavení výstupního proudu omezovat výstupní nabíjecí proud. Toto řešení se ukázalo jako chybné z důvodu přímého připojení výstupu spínaného zdroje se superkapacitory. Toto propojení by v případě nabitých superkapacitorů způsobilo překročení povoleného nabíjecího proudu akumulátorů, a zároveň by došlo k překročení maximálního proudu STEP-DOWN modulu. Tento problém vyřešil modul pro dobíjení Li-Ion akumulátorů TP5100. Mírnou komplikací při oživení byla nedostatečná úroveň dokumentace, a proto muselo oživení modulu probíhat až dle změření funkce modulu. Například se měřením ukázalo, že modul disponuje možností připojení externí LED pro indikaci stavu nabití akumulátorů. Tato indikace byla pomocí externího tranzistoru a odporu převedena na binární informaci (0 až 5 V) a je použita do vstupu Arduina. Tento vstup slouží jako informace o nabití akumulátorů a tím i ukončení nabíjení. Tato funkce nebyla v původním řešení možná a musela by se řešit na základě napětí akumulátorů. Drobnou komplikací bylo obsazení všech digitálních

portů na mikrokontroleru. Jediné volné porty byly analogové A6 a A7. Tyto vstupy lze však u Arduino Nano použít pouze pro analog. Proto byl tento problém elegantně vyřešen pomocí přehození portu A0 s portem A6.

4.5. Schéma zapojení

Schéma celkového zapojení bylo vytvořeno v programu Eplan verze 2.9 od společnosti Eplan. Schéma zapojení DPS řízení a superkapacitorů bylo vytvořeno v programu EAGLE verze 9.6.2 od společnosti Autodesk.

Veškeré schémata jsou přiložena jako následující přílohy:

- PŘÍLOHA A: Schéma celkového zapojení.
- PŘÍLOHA B: Schéma zapojení DPS řízení.
- PŘÍLOHA C: Schéma zapojení DPS superkapacitorů.

PŘÍLOHA D: obsahuje seznam součástek DPS řízení.

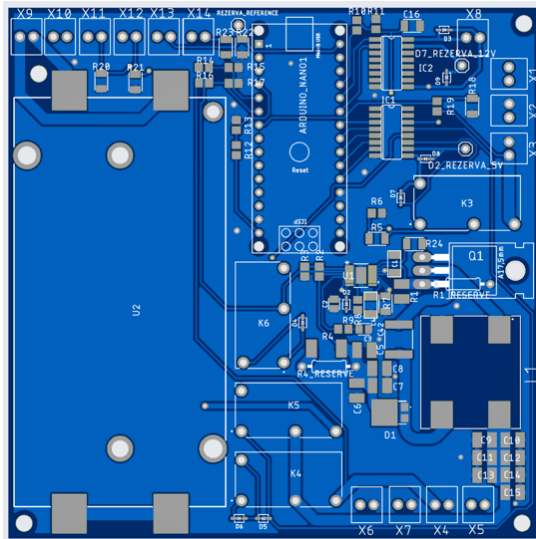
Schémata v plném rozlišení se nacházejí na přiloženém CD.

4.6. Desky plošného spoje

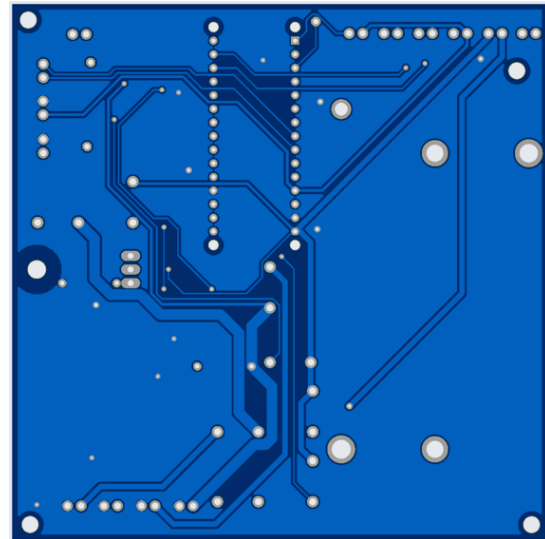
Zařízení se skládá z pěti stejných desek pro superkapacitory, jedné desky řízení a několika modulů. Jedná se o standardní dvouvrstvé desky z materiálu FR-4 o síle 1,6 mm. Síla měděné vrstvy je 35 μm . Rovněž jako schéma zapojení jsou i DPS vytvořena v programu EAGLE verze 9.6.2.

4.6.1. DPS řízení

Rozměry desky jsou 100 x 100 mm. Jelikož se jedná o prototyp DPS, kde rozměry finálního výrobku nehrají zásadní roli, tak původním záměrem bylo mít desku větší pro pohodlnější oživení, avšak za desku větších rozměrů si výrobci účtují téměř dvojnásobný příplatek. Na DPS je umístěn držák na dva akumulátory 18650. DPS dále obsahuje obvod DC / DC měniče, Arduino, relátka, vstupní a výstupní konektory. Nechybí ani otvory pro montáž DPS do krabičky. Na straně bottom se nachází modul BMS a modul nabíjení akumulátorů TP5100.



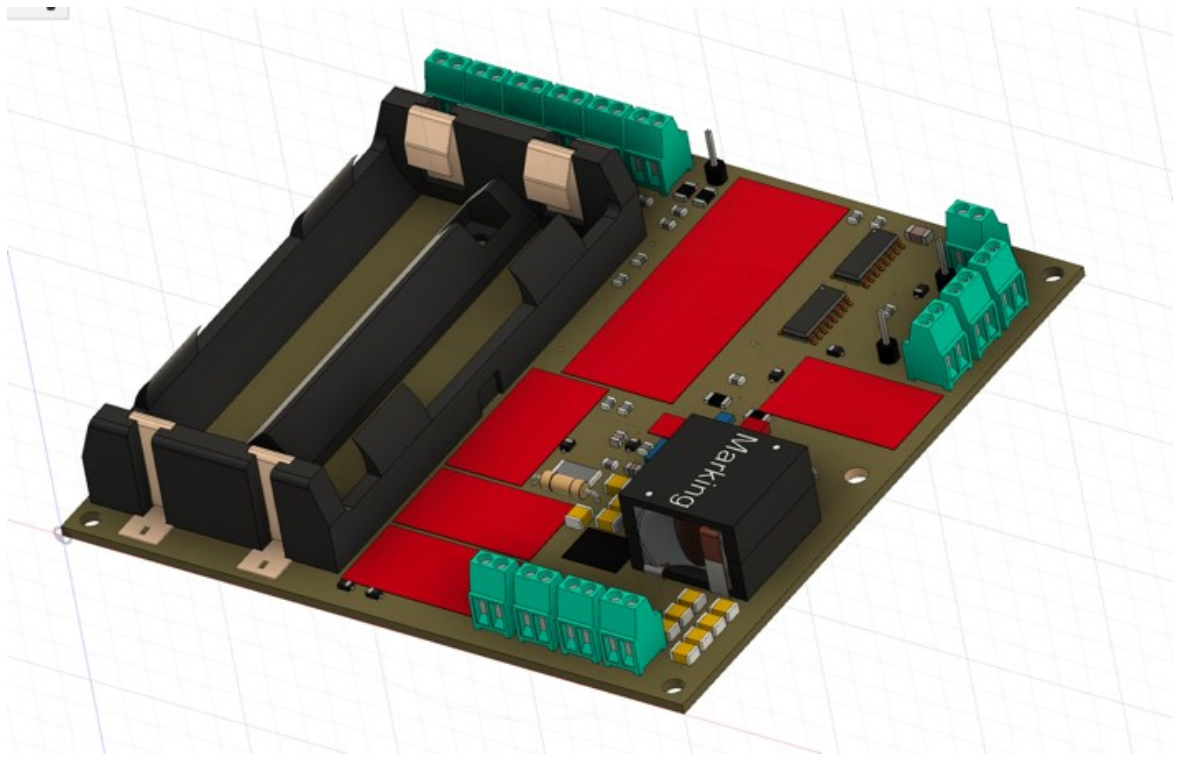
Obrázek 30: Návrh DPS řízení – TOP (autor)



Obrázek 29: Návrh DPS řízení – BOTTOM (autor)

Navržená DPS v současné verzi splňuje požadavky kladené na zařízení, přesto by bylo možné DPS optimalizovat následujícími vylepšeními:

- Nahrazením výstupních konektorů. Výstupní konektory sice splňují veškeré parametry, ale vhodnější alternativou by byly konektory větší. Důvody pro nahrazení těchto konektorů jsou nutnost používání velmi tenkého šroubováku, slabé uchycení v DPS a možnost připojení silnějších vodičů než 0,75 mm².
- Na DPS přidat popisky s označením jednotlivých pinů konektorů.
- Přidat popisky pro zapojení akumulátorů i na DPS. Použitý držák akumulátorů bohužel disponuje špatně čitelnými popisky pro zapojení.
- Prohodit zapojení výstupního konektoru X9 interních akumulátorů. Na rozdíl od ostatních konektorů je zapojen obráceně. Tento problém vznikl při návrhu z důvodu absence jakýchkoliv informací o držáku akumulátorů – má obráceně vyznačené plus a mínus.
- Upravit návrh DPS dle kapitoly



Obrázek 32: 3D model DPS řízení (autor)



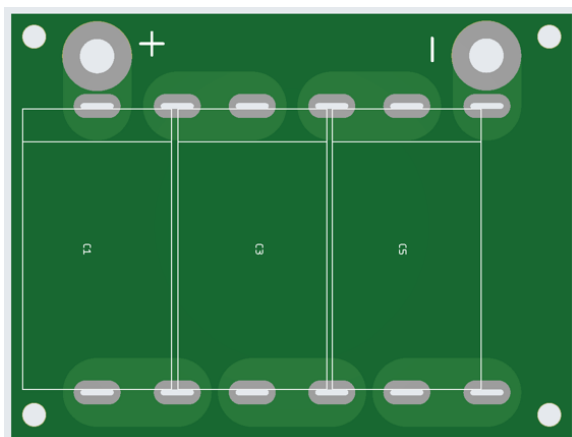
Obrázek 31: Označení čísel pinu na konektoru (autor)

Tabulka 8: Popis konektorů DPS řízení (autor)

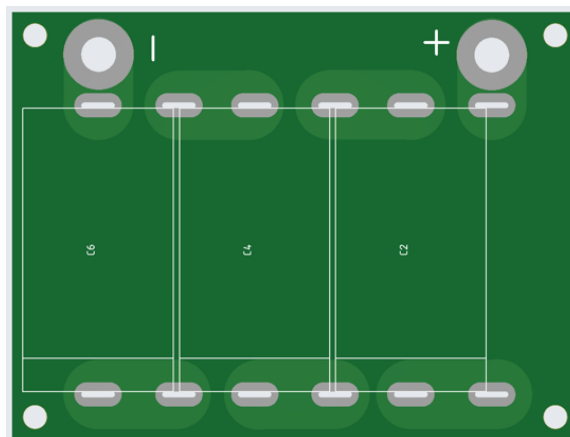
Označení konektoru:	PIN:	Použití:	Poznámka:
X1	1	LCD – SCL	Připojení LCD pomocí sběrnice I ² C
	2	LCD – SDA	
X2	1	+5 V	Výstup pro napájení LCD
	2	GND	
X3	1	+6-15 V	Vstup pro dobíjení z auta
	2	GND	
X4	1	+4,8-15 V	Vstup pro dobíjení z USB
	2	GND	
X5	1	+6-9 V	Konektor neosazen. Slouží k napájení zařízení, i dobíjení z interního akumulátoru
	2	GND	
X6	1	+14,5 V	Výstup pro dobíjení superkapacitorů
	2	GND	
X7	1	+14,5 V	Konektor neosazen. Výstup pro dobíjení interních akumulátorů
	2	GND	
X8	1	GND	Výstup pro spínání hlavního výkonového relátka
	2	+14,5 V	
X9	1	GND	Konektor neosazen. Jedná se o výstup z interních akumulátorů
	2	+6-9 V	
X10	1	IN	Připojení hlavního vypínače zařízení
	2	OUT	
X11	1	+5 V	Připojení tlačítka nahoru
	2	IN	
X12	1	+5 V	Připojení tlačítka dolů
	2	IN	
X13	1	+5 V	Připojení tlačítka OK
	2	IN	
X14	1	+5 V	Připojení tlačítka MENU
	2	IN	

4.6.2. DPS superkapacitorů

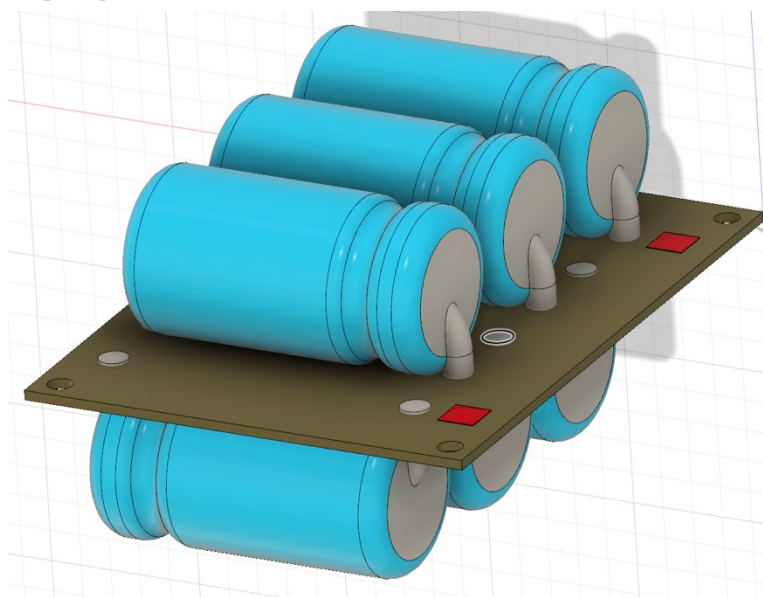
Rozměry desky jsou 98 x 74 mm. Ve finálním výrobku je použito pět těchto desek zapojených paralelně. Deska pouze zapojuje 6 ks superkapacitorů do série. Pro úsporu místa jsou osazeny jak ze strany TOP, tak i BOTTOM. Při konstrukci této desky byl brán hlavní zřetel na vysoké proudy (vyšší stovky ampér), které budou deskou v době startování procházet. Proto jsou cesty zvoleny z obou stran paralelně o šířce 12 mm. Výstup je realizován dvojicí prokovených otvorů pro očka M6. Nechybí ani otvory pro montáž DPS do krabičky.



Obrázek 35: Návrh DPS superkapacitorů – TOP (autor)



Obrázek 34: Návrh DPS superkapacitorů – BOTTOM (autor)



Obrázek 33: 3D model DPS superkapacitorů (autor)

Možné vylepšení této DPS spočívá v doplnění balancéru SC, případně alespoň vytažení všech středů superkapacitorů na konektory pro připojení k externímu balancéru.

S balancováním SC nebylo od samotného počátku počítáno z důvodu pouze krátkodobého nabití, nabíjením na nižší než maximální napětí a setříděním podobných SC do stejné série, zároveň by doplnění o balancér značně prodražilo cenu zařízení. Většina výrobců

SC dovoluje dle datasheetu krátkodobé přebití v řádu desetin Voltu. [32] Jelikož je energie v kondenzátoru závislá mimo jiné na druhé mocnině napětí, je žádoucí, aby byly superkapacitory nabíjeny na maximální napětí. Proto považuji jako významné budoucí vylepšení zařízení o balancér doplnit.

4.7. Firmware mikrokontroleru

Vybraný mikrokontrolér Arduino Nano má jako programovací jazyk Wiring. Pro psaní, editaci a ladění programu bylo použito vývojové prostředí Arduino IDE 2 verze 2.1.1. Program je pro vyšší přehlednost a jednoduchost rozdělen do podprogramů. Některé jsou pomocné a některé zajišťují samotný chod zařízení. Veškeré programy jsou psány ve smyčce, a tak pokud dojde například k poklesu napětí vlivem opětovného odpojení od vozidla, program na to vhodným způsobem zareaguje.

Vlastní program včetně zdrojového kódu je umístěn na přiloženém CD.

Měření napětí je realizováno pomocí volání podprogramů nejdříve Voltage_Read() a posléze Voltage_Convert(). Toto řešení je zvoleno z důvodu přesnosti výsledku a zároveň nám toto řešení poskytuje možnost vybrání délky časového úseku, v kterém je měřeno napětí. Každý vzorek je průměrem deseti měření. Výsledná hodnota napětí je tedy složena z několika vzorků vytvořených po cca 50 ms. Počet vzorků je definován v každém podprogramu. Až do dokončení prvního měření není žádný program vykonáván.

Program používá dvě externí knihovny. <ezButton.h> je určená k obsluze tlačítek. <LiquidCrystal_I2C.h> je určená k ovládání LCD displeje.

Program obsahuje knihovnu definitions.h, která obsahuje globální proměnné i konstanty i vlastnosti HW připojení.

Pomocné podprogramy:

- Voltage_Read() Podprogram slouží k změření hodnoty napětí. Má jeden vstupní parametr sloužící k výběru měřeného napětí. Po zavolání se vybere příslušné měření napětí a následně se provede deset měření. Po dokončení těchto měření dojde k jejich zprůměrování, ukončení podprogramu a vrácení hodnoty napětí jako int.
- Voltage_Convert() Podprogram slouží k převedení hodnoty napětí int na hodnotu ve voltech. Má tři vstupní parametry. Výběr měřeného napětí, součet hodnot napětí jako int a počet měření. Po zavolání se provede výpočet na základě konstanty daného napětí a počtu měření. Následně dojde k ukončení podprogramu a vrácení hodnoty jako float.

- Wait_For_Button() Podprogram pouze vyčká na uživatelské potvrzení tlačítkem OK, a nebo MENU.
- RESET_OUTPUTS() Podprogram resetuje všechny výstupy na základní hodnoty.
- RESET_VARIABLES() Podprogram resetuje vybrané globální proměnné na základní hodnoty.

Podprogramy:

- CHARG_SUPER_CAR() Program určený pro nabíjení superkapacitorů z akumulátoru vozidla. Po spuštění zahájí měření napětí superkapacitorů a zároveň napětí na svorkách pro připojení vozidla. Pokud je svorkové napětí v toleranci, program zahájí nabíjení maximálním proudem. Po dosažení maximálního napětí superkapacitorů program nastaví proud na 0 A, a znovu změří napětí, pokud zůstane napětí maximální, program se ukončí. Pokud napětí není maximální, znovu se zapne dobíjení. Program v případě změny napětí superkapacitorů zobrazí aktuální hodnotu na LCD displeji. Program dále hlídá stisk tlačítka MENU, v případě stisku se program ukončí.
- CHARG_SUPER_USB() Program určený pro nabíjení superkapacitorů z USB. Po spuštění zahájí měření napětí superkapacitorů a zároveň napětí USB. Pokud je napětí USB zdroje v toleranci, program zahájí nabíjení. Nabíjecí proud je vypočítáván, aby nebyl překročen maximální proud z USB 2 A. Tento výpočet se provádí pomocí výpočtu příkonu a výkonu s ohledem na účinnost měniče. Po dosažení maximálního napětí superkapacitorů program nastaví proud na 0 A, a znovu změří napětí, pokud zůstane napětí maximální, program se ukončí. Pokud napětí není maximální, znovu se zapne dobíjení. Program v případě změny napětí superkapacitorů zobrazí aktuální hodnotu na LCD displeji. Program dále hlídá stisk tlačítka MENU, v případě stisku se program ukončí.
- CHARG_SUPER_INT_BAT() Program určený pro nabíjení superkapacitorů z interních akumulátorů. Po spuštění zahájí měření napětí superkapacitorů a zároveň napětí interních akumulátorů. Pokud je napětí akumulátorů v toleranci, program zahájí nabíjení. Nabíjecí proud je vypočítáván, aby nebyl překročen proud interních akumulátorů 5 A. Tento výpočet se provádí pomocí výpočtu příkonu a výkonu s ohledem na účinnost měniče. Po dosažení maximálního napětí superkapacitorů program nastaví proud na 0 A, a znovu změří napětí, pokud zůstane napětí maximální, program se ukončí. Pokud napětí není maximální, znovu se zapne dobíjení. Program v případě změny napětí superkapacitorů zobrazí aktuální hodnotu na LCD displeji. Program dále hlídá stisk tlačítka MENU, v případě stisku se program ukončí.

- `CHARG_INT_BAT()` Program určený pro nabíjení interních akumulátorů. Po spuštění zahájí měření napětí superkapacitorů a zároveň napětí interních akumulátorů a USB. Pokud je napětí USB a superkapacitorů v toleranci, program zahájí nabíjení. Po dosažení maximálního napětí interních akumulátorů a zároveň pokud je vstup o statusu nabíjení v HIGH, program se ukončí. Program v případě změny napětí superkapacitorů zobrazí aktuální hodnotu na LCD displeji. Program dále hlídá stisk tlačítka MENU, v případě stisku se program ukončí.
- `Set_Start()` Program určený k nastartování vozidla. Po spuštění zahájí měření napětí superkapacitorů a zároveň napětí na svorkách pro připojení vozidla. Pokud jsou superkapacity nabitý, program vyčkává na připojení k vozidlu. Po připojení k vozidlu program čeká na pokles napětí vozidla o minimálně 1 V za 100 ms. Pokud dojde k tomuto poklesu, program zavolá program `Starting()`.
- `Starting()` Program určený k nastartování vozidla. Po spuštění se sepne relé propojující superkapacity s vozidlem. Zároveň se spustí 10 s časovač maximální délky sepnutí, po uplynutí této doby se program ukončí. Současně se provádí měření napětí na superkapacitorech a elektrické soustavy vozidla. Pokud napětí na superkapacitorech klesne pod 2 V, program se ukončí. Pokud po dvou a více sekundách dojde k většímu napětí elektrické soustavy vozidla než 13 V, program se ukončí.

Mezi možné vylepšení programu mikrokontroleru lze uvést:

- Doplnit program o možnost uživatelské změny parametrů. Například nastavení času a změny napětí pro zahájení programu `Starting()`. Tato možnost může mít i zjednodušenou formu a uživatel může pouze vybrat, jaké auto hodlá nastartovat (vznětové, zážehové). Tato funkce zároveň může sloužit i pro zohlednění žhavicích svíček u vznětových motorů. V tomto režimu je potřeba, aby startovací zdroj sepnul až na startování, nikoliv na pokles napětí vlivem odběru žhavicích svíček.
- Doplnit program o možnost startování bez připojeného akumulátoru ve vozidle. Bohužel v tomto programu nelze zajistit ochranu proti přepólování, ani proti připojení k nekompatibilnímu vozidlu.

4.8. Objevené problémy při ožiování DPS řízení

Při ožiování DPS řízení bylo nalezeno několik nedostatků, které se podařilo úspěšně odstranit:

Jeden z největších problémů způsobovali snímacími rezistory proudu R_1 a R_4 . R_1 a R_4 neměly teplotně konstantní odpor, a proto vlivem jejich zahřátí docházelo ke snižování výstupního proudu. Pro rezistor R_1 a proud 10 A vychází maximální odpor pouze 30 m Ω . Je potřeba vzít v úvahu, že dochází k velkým proudovým špičkám vlivem spínání. Na tyto proudové špičky o hodnotě desítek ampér musí být DPS konstruována z hlediska přechodových odporů. Protože dochází k sečtení odporu cest na DPS a snímacího rezistoru, musí být jejich součet výše psaných 30 m Ω . Tento odpor se nepodařilo u GND na DPS dodržet. Proto byl tento problém úspěšně odstraněn pomocí výměny těchto odporů za drátové s konstantním odporem. Ostatně bylo na ně připraveno místo v DPS. U rezistoru R_4 zároveň došlo k rozdělení na dva paralelní z důvodu snížení tepelného zatížení.

Další závažný problém plyne z předchozího problému. Při návrhu bylo velmi podceněno GND, a proto musí být DPS opatřena dodatečnými propojkami jednotlivých GND. To vede ke snížení odporu a tím i k zmenšení rozdílu potenciálů. Jelikož minimální odpor snímacího rezistoru R_1 není stanoven, byl snížen na hodnotu 1 m Ω . Bez těchto úprav DC / DC měnič prakticky nefungoval. Po provedení těchto úprav došlo k plnohodnotnému oživení měniče.



Obrázek 36: Dodatečné propojky DPS (autor)

Posledním problémem byla absence vstupního kondenzátoru na výstupu z interních akumulátorů. Při proudových špičkách docházelo k restartování Arduina (např. sepnutí relé). Proto byl na stranu bottom osazen keramický kondenzátor v pouzdru 2220 o kapacitě 47 μ F.

4.9.Ovládání

Ovládání je zajištěno pomocí čtyř tlačítek a dvouřádkového LCD displeje. Tlačítko MENU slouží pro návrat do hlavní nabídky, kdy zároveň dojde k ukončení aktuálního programu. Tlačítka \uparrow a \downarrow jsou určena pro pohyb v menu směrem nahoru, anebo dolů. Tlačítko OK potvrzuje výběr. V případě jakéhokoliv informování uživatele pomocí LCD displeje, startovací zdroj vyčká na potvrzení od uživatele. Uživatel toto potvrzení provede pomocí tlačítka OK, a nebo MENU.

Zapnutím zařízení provede mikrokontrolér inicializaci, kdy se zároveň zobrazí na LCD displeji „UNIVERZITA PARDUBICE“. Po dokončení inicializace se zobrazí hlavní nabídka, kde má uživatel na výběr, co chce provést.

Hlavní nabídka je složena z těchto položek:

- Nabíjení z auta – k dobití superkapacitorů ze startovacího akumulátoru vozidla
- Nabíjení z USB – k dobití superkapacitorů z USB
- Nabíjení z interního akumulátoru – k dobití superkapacitorů pomocí interního akumulátoru
- Startování – provede uživatele procesem nastartování automobilu
- Nabíjení interního akumulátoru – k dobíjení interního akumulátoru pomocí USB

Všechny režimy jsou pro uživatele maximálně intuitivní a aktuální stav startovacího zdroje je zobrazen na LCD displeji. Startovací zdroj se zapíná a vypíná vypínačem na čelním panelu.

Při výběru některého režimu nabíjení uživatel pouze vyčká na hlášku o dokončení nabíjení. V případě, že uživatel nepřipojil, a nebo odpojil daný zdroj napájení, je vyzván k připojení. Startovací zdroj automaticky hlídá a nastavuje všechny parametry.

V režimu startování startovací zdroj automaticky kontroluje připojení k vozidlu a hlídá dostatečné napětí na superkapacitorech. Po připojení k vozidlu je uživatel informován o možnosti zahájení startování. Po uživatelském zahájení startování je zobrazen nápis STARTUJI a dochází ke startování vozidla za pomoci startovacího zdroje. Je-li vozidlo úspěšně nastartováno, režim se ukončí s hláškou o úspěšném nastartování. Pokud dojde k vypršení času určeného k nastartování, a nebo k vybití superkapacitorů, opět dojde k ukončení režimů s příslušnými hláškami.

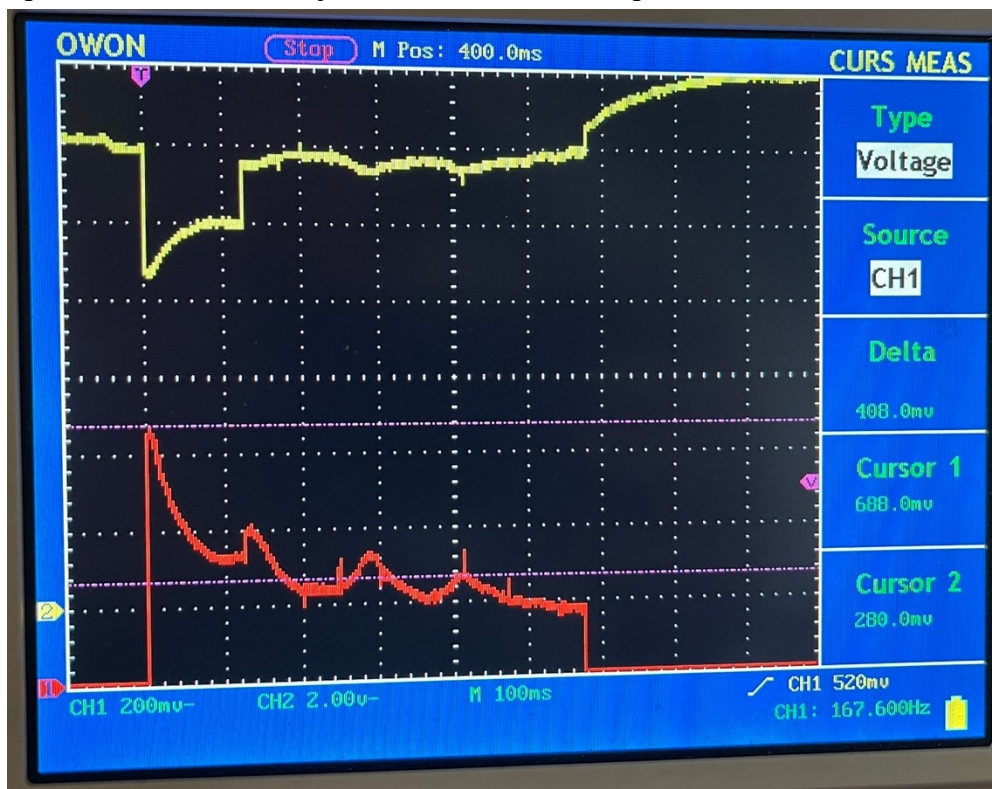
Uživateli je v každém programu zobrazováno v levém dolním rohu LCD displeje napětí superkapacitorů. Výjimku tvoří program pro nabíjení interních akumulátorů, kde je v tomto místě umístěno napětí těchto akumulátorů.

4.10. Měření v reálném provozu

Jelikož z kapitoly 4.1 vyplývá, že vznětová vozidla mají větší nároky na startování, jsou tedy vhodnější pro měření a otestování konstruovaného startovacího zdroje. Měření se provádělo stejnými měřidly, podle stejného schématu zapojení i stejným postupem jako v kapitole 4.1. Jediný rozdíl spočívá v možném připojení startovacího zdroje k akumulátoru vozidla a jeho 100 % nabití z tohoto zdroje.

Nejprve byly prováděny měření na vozidle: Škoda Octavia I kombi tour 1U5 1.9 TDI 66 kW r.v. 2005. Vozidlo standardně obsahuje akumulátor BOSCH S5 008, 77 Ah, startovací proud 780 A.

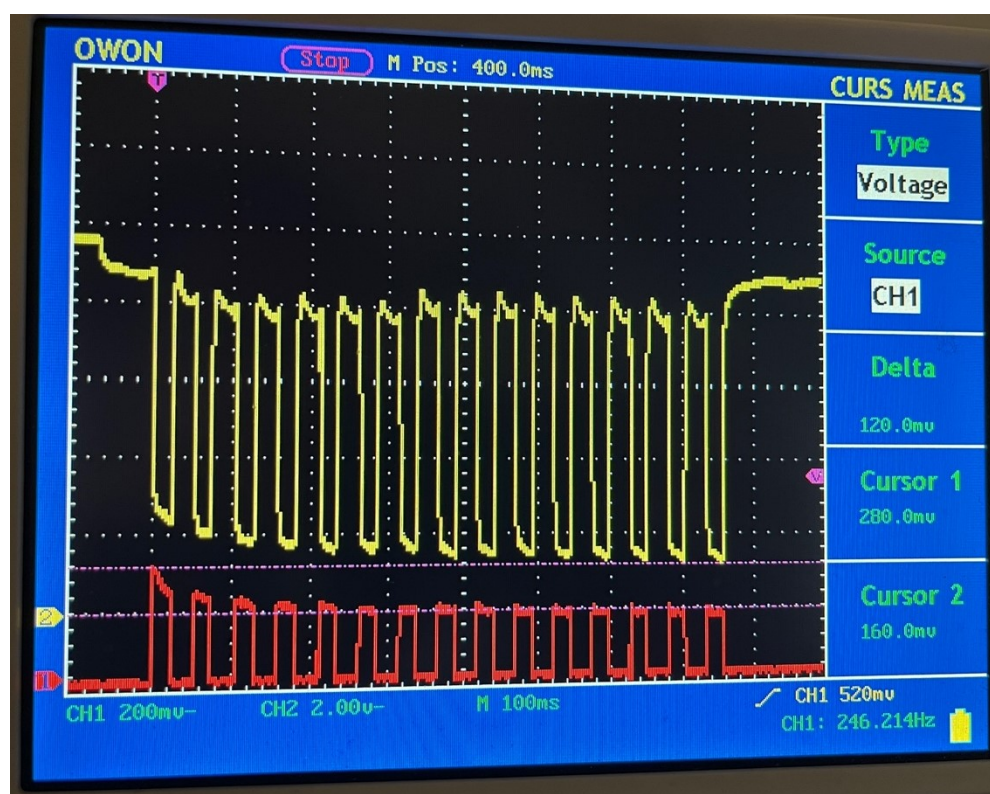
Pro první měření byl zapojen a nabit startovací zdroj k výše popsanému akumulátoru vozidla, následně se startovací zdroj přepnul do režimu startování a poté se provedl pokus o nastartování. Graf tohoto měření zobrazuje Obrázek 37. Na grafu je dobře patrný nárůst napětí vlivem sepnutí startovacího zdroje. Nastartování vozidla proběhlo bez obtíží.



Obrázek 37: Start vozidla Škoda Octavia s předepsaným akumulátorem (autor)

Jelikož však vozidlo nemá problémy se startováním, došlo by k nastartování i bez použití startovacího zdroje. Proto byl vyměněn akumulátor vozidla za devět let starý akumulátor Starter plus 45 Ah, startovací proud 360 A. Tento akumulátor nesplňuje minimální požadavky stanovené výrobcem vozidla pro použití v tomto vozidle [42]. Navíc je silně degradovaný, a proto budou jeho vlastnosti ještě mnohem horší. Vzhledem k těmto skutečnostem můžeme tento akumulátor prohlásit za vadný.

První měření s tímto akumulátorem proběhlo bez využití startovacího zdroje. Graf tohoto měření zobrazuje Obrázek 38. Na grafu jsou vidět pulzy způsobené přitahováním elektromagnetu startéru. K nastartování vozidla pochopitelně nedošlo.



Obrázek 38: Start vozidla Škoda Octavia s vadným akumulátorem 1 (autor)

Pro druhé měření byl zapojen a nabit startovací zdroj, který se následně přepnul do režimu startování. Jelikož akumulátor nebyl v průběhu testování nabíjen, jeho napětí před tímto testem bylo pouze 9,3 V. Graf tohoto měření zobrazuje Obrázek 39. Na grafu jsou vidět výše popsané pulsy, dokud nedojde k sepnutí startovacího zdroje. Poté startovací zdroj zvládne udržovat napětí cca 10 V. Nastartování vozidla proběhlo bez obtíží.



Obrázek 40: Start vozidla Škoda Octavia s vadným akumulátorem 2 (autor)

Jelikož minulé měření ukázalo, že startovací zdroj zvládne bez obtíží nastartovat výše popsané vozidlo i s vadným akumulátorem, bylo pro zjištění limitů startovacího zdroje vyměněno vozidlo za rýpadlonakladač CAT 428B se vznětovým čtyř litrovým přeplňovaným motorem.



Obrázek 39: Start vozidla CAT 428B s vadným akumulátorem

Tento pracovní stroj standartně disponuje akumulátorem 100 Ah se startovacím proudem 880 A. Akumulátor byl opět vyměněn za výše popsany vadny akumulátor, který byl pro tento test dobit. Nejprve bylo vyzkoušeno, že vadny akumulátor bez pomoci startovacího zdroje nedokáže tento stroj nastartovat. Dle předpokladu k nastartování nedošlo. Následně bylo provedeno zajímavější měření se startovacím zdrojem. Ten byl stejně jako v minulých případech zapojen, nabit a následně se přepnul do režimu startování. Graf tohoto měření zobrazuje Obrázek 40. Z grafu už je patrný znatelnější pokles napětí, mnohem větší odběr proudu i delší doba potřebná pro nastartování. Střední hodnota proudu je vysokých 356 A. Energie potřebná k nastartování tohoto vozidla vychází výrazně větší než u osobních vozidel: 1,3 Wh. I přes tyto skutečnosti se nastartování vozidla povedlo bez obtíží.

ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá návrhem a výrobou funkčního zařízení, které lze využít jako pomocný zdroj energie v případě vadného startovacího akumulátoru vozidla se spalovacím motorem. Práce je rozčleněna do teoretické a praktické části.

Teoretická část je zaměřena na analýzu trhu v oblasti startovacích zdrojů a porovnání jejich parametrů. Zároveň je zde představeno rozdělení a vlastnosti superkapacitorů. Poslední část popisuje možnosti napájení startovacích zdrojů a vysvětluje rozdíly mezi jednotlivými napájeními a jejich vlastnosti. Tato část tak může čtenáři pomoci při výběru startovacího zdroje nebo mu může poskytnout přehled o možnostech využití superkapacitorů a jejich parametrů.

Praktická část se pak zabývá vlastní realizací konstruovaného startovacího zdroje. Tato část odpovídá na otázku potřebných startovacích nároků u osobních vozidel. Dále jsou zde řešeny požadavky, zvolená topologie, možnosti napájení i technické řešení jednotlivých částí konstruovaného startovacího zdroje. Je popsáno a řešeno několik objevených problémů při oživování. V neposlední řadě je zde uživatel seznámen s principem ovládání a nechybí ani měření zkonstruovaného startovacího zdroje.

V rámci bakalářské práce vzniklo funkční zařízení splňující všechny požadavky zadání, ba dokonce v některých parametrech jsou tyto požadavky překonány. Do budoucna zkonstruovaný startovací zdroj poskytuje mnoho možností vylepšení jen s drobnými úpravami převážně softwarového rázu.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Intel. How USB Became the Most Successful Interface in Computing History [online]. Santa Clara: intel [cit. 2023-07-19]. Dostupné z: <https://www.intel.com/content/www/us/en/standards/usb-two-decades-of-plug-and-play-article.html>
- [2] USB-IF. USB-IF Announces Publication of New USB4® Specification to Enable USB 80Gbps Performance [online]. Beaverton: USB-IF, October 18, 2022 [cit. 2023-07-19]. Dostupné z: https://www.usb.org/sites/default/files/2022-10/USB-IF%20USB%2080Gbps%20Announcement_FINAL_v2.pdf
- [3] USB Promoter Group. USB Promoter Group Announces USB Power Delivery Specification Revision 3.1 [online]. Beaverton: USB Promoter Group, May 26, 2021 [cit. 2023-07-19]. Dostupné z: https://www.usb.org/sites/default/files/2021-05/USB%20PG%20USB%20PD%203.1%20DevUpdate%20Announcement_FINAL.pdf
- [4] *Common charger: MEPs agree on proposal to reduce electronic waste* [online]. Brusel: European Parliament, 2022 [cit. 2023-07-19]. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20220412IPR27115/common-charger-meps-agree-on-proposal-to-reduce-electronic-waste>
- [5] Understanding the global chip shortage [online]. Swindon: BCS, 03 March 2023n. 1. [cit. 2023-07-26]. Dostupné z: <https://www.bcs.org/articles-opinion-and-research/understanding-the-global-chip-shortage/>
- [6] LT3761 [online]. Wilmington: Analog Devices [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/37611fb.pdf>
- [7] RBQ10RSM65B [online]. Kyoto: ROHM, 2022/05/09 [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/discrete/diode/schottky_barrier/rbq10rsm65bt11-e.pdf
- [8] VFT3045CBP [online]. Malvern: Vishay, 2018 [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/89369/vft345cb.pdf>
- [9] RX3L07BBG [online]. Kyoto: ROHM, 2022 [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/discrete/transistor/mosfet/rx3l07bbgc16-e.pdf>

- [10] IRFZ44NPbF [online]. Neubiberg: infineon, 2010 [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IRFZ44N-DataSheet-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d462533600a40153563b3a9f220d
- [11] G5Q [online]. Kyoto: OMRON [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: https://omronfs.omron.com/en_US/ecb/products/pdf/en-g5q.pdf
- [12] CSC 1224 [online]. Forstinning: KUNZER, 07/18n. 1. [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: https://www.kunzer.de/Key-915cff5ce5b64b6e8e0c8c40dd0cf1eb.pdf?SID=b0881559fe3f45d3b53f2deead626f2f_3
- [13] Kunzer Ultracap CSC 1224 [online]. Praha: Zboží.cz, 2023 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://www.zbozi.cz/vyrobek/kunzer-ultracap-csc-1224/>
- [14] GB150 [online]. Glenwillow: NOCO [cit. 2023-07-29]. Dostupné z: https://no.co/media/nocodownloads/format/g/b/gb150_data_sheet_7.8.2022.pdf
- [15] NOCO BoostPro GB150 [online]. Praha: Zboží.cz, 2023 [cit. 2023-07-29]. Dostupné z: <https://www.zbozi.cz/vyrobek/noco-boostpro-gb150/>
- [16] JSC 2100 [online]. Shenzhen: Autophix, 2023 [cit. 2023-07-29]. Dostupné z: <https://www.autophix.com/product/jsc-2100>
- [17] Autophix JSC 2100 [online]. Praha: Zboží.cz, 2023 [cit. 2023-07-29]. Dostupné z: <https://www.zbozi.cz/hledej/?q=autophix%20jsc>
- [18] SPRINTER 6000 START [online]. Villaverla: Telwin, 2023 [cit. 2023-07-29]. Dostupné z: <https://www.telwin.com/intl/en/products/battery-chargers-and-starters/829392-sprinter-6000-start>
- [19] TELWIN SPRINTER 6000 START [online]. Praha: Zboží.cz, 2023 [cit. 2023-07-29]. Dostupné z: <https://www.zbozi.cz/vyrobek/telwin-sprinter-6000-start/>
- [20] Power Booster PB12/24 [online]. Linz: Banner Batterien, 2020 [cit. 2023-07-30]. Dostupné z: <https://www.bannerbatterien.com/cz/Produkty/Příslušenství-pro-osobní-a-užitková-vozidla/661-Power-Booster-PB1224>
- [21] Banner Power Booster PB12/24 [online]. Praha: Zboží.cz, 2023 [cit. 2023-07-30]. Dostupné z: <https://www.zbozi.cz/vyrobek/banner-booster-p12-24-start-truck-evo-max-1220000322-12-24v-50ah-2340a/>

- [22] CARCLEVER HYBRID 800 35970 [online]. Chrudim: AUTIO [cit. 2023-07-30]. Dostupné z: <https://www.autio.cz/90598-jumpstart-hybridni-startovaci-stance-400amp.html>
- [23] Stualarm 35970 [online]. Praha: Zboží.cz, 2023 [cit. 2023-07-30]. Dostupné z: <https://www.zbozi.cz/vyrobek/stualarm-35970/>
- [24] MARYT, Jan. Systémy akumulace elektrické energie ve výkonové elektronice. Plzeň, 2013. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Drábek, Ph.D.
- [25] ARAVINDAN, Vanchiappan, Joe GNANARAJ, Yun-Sung LEE a Srinivasan MADHAVI. Insertion-Type Electrodes for Nonaqueous Li-Ion Capacitors. Chemical Reviews [online]. 2014, 2014-12-10, 114(23), 11619-11635 [cit. 2023-07-30]. ISSN 0009-2665. Dostupné z: doi:10.1021/cr5000915
- [26] M.S. Halper and J.C. Ellenbogen, Supercapacitors: A brief overview, MITRE Report, MP 05W0000272, Mar. 2006
- [27] KABIR OYENIRAN, Oyedotun. Synthesis and characterization of carbon-based nanostructured material electrodes for designing novel hybrid supercapacitors. Hatfield Pretoria, 2018. DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD.) IN PHYSICS. University of Pretoria. Vedoucí práce Prof. N. I. Manyala.
- [28] Arduino [online]. Milán: Arduino, 2023 [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc>
- [29] LIBICH, Jiří, Josef MÁCA, Jiří VONDRÁK, Ondřej ČECH a Marie SEDLAŘÍKOVÁ. Supercapacitors: Properties and applications. Journal of Energy Storage [online]. 2018, 17, 224-227 [cit. 2023-08-06]. ISSN 2352152X. Dostupné z: doi:10.1016/j.est.2018.03.012
- [30] ČERNÝ, Michal. Superkondenzátory místo akumulátorů? [online]. Robodoupě, 2015 [cit. 2023-08-08]. Dostupné z: <https://robodoupe.cz/2015/superkondenzatory-misto-akumulatoru-4/>
- [31] Supercapacitor. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2023-08-08]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor>
- [32] 2.7V 450F ULTRACAPACITOR CELL: Datasheet [online]. San Diego: Maxwell, 2019 [cit. 2023-08-08]. Dostupné z: https://maxwell.com/wp-content/uploads/2021/08/2.7V-450F_ds_3003113-EN.3_20200908.pdf

- [33] HS/HSL Supercapacitors [online]. Cleveland: EATON, 2021 [cit. 2023-08-08]. Dostupné z: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/electronic-components/resources/data-sheet/eaton-supercapacitor-hybrid-cylindrical-cells-data-sheet.pdf>
- [34] SCC LE Series [online]. Fountain Inn: Kyocera-AVX [cit. 2023-08-08]. Dostupné z: <https://datasheets.kyocera-avx.com/AVX-SCC-LE.pdf>
- [35] Technical Information of LG 18650HG2 (3.0Ah) [online]. Soul: LG Chem, 2014 [cit. 2023-08-09]. Dostupné z: <https://www.nkon.nl/sk/k/hg2.pdf>
- [36] BC Energy Series BOOSTCAP® Ultracapacitors: Datasheet [online]. San Diego: Maxwell [cit. 2023-08-22]. Dostupné z: https://www.anglia.com/Maxwell/datasheets/BC_Cell_Energy_1009473_rev3.pdf
- [37] Capacitor. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2023-08-22]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Capacitor>
- [38] ATmega328P [online]. San José: Atmel, 2015 [cit. 2023-08-23]. Dostupné z: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf
- [39] RIDLEY, Dr. Ray. Analyzing the Sepic Converter [online]. Bradenton: Ridley Engineering, 2006 [cit. 2023-08-24]. Dostupné z: <https://dokumen.tips/download/link/analyzing-the-sepic.html>
- [40] FALIN, Jeff. Designing DC/DC converters based on SEPIC topology [online]. Dallas: Texas Instruments, 2008 [cit. 2023-08-24]. Dostupné z: <https://www.ti.com/jp/lit/an/slyt305/slyt305.pdf#page=18>
- [41] BU-205: Types of Lithium-ion [online]. Vancouver: Cadex Electronics, 2021 [cit. 2023-08-25]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>
- [42] JAKÁ BATERIE DO ŠKODA OCTAVIA? [online]. Ostrava: ABV Baterie [cit. 2023-08-29]. Dostupné z: <https://www.abvb.cz/clanky/jaka-baterie-do-skoda-octavia>

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A: Schéma celkového zapojení

PŘÍLOHA B: Schéma zapojení DPS řízení

PŘÍLOHA C: Schéma zapojení DPS superkapacitorů

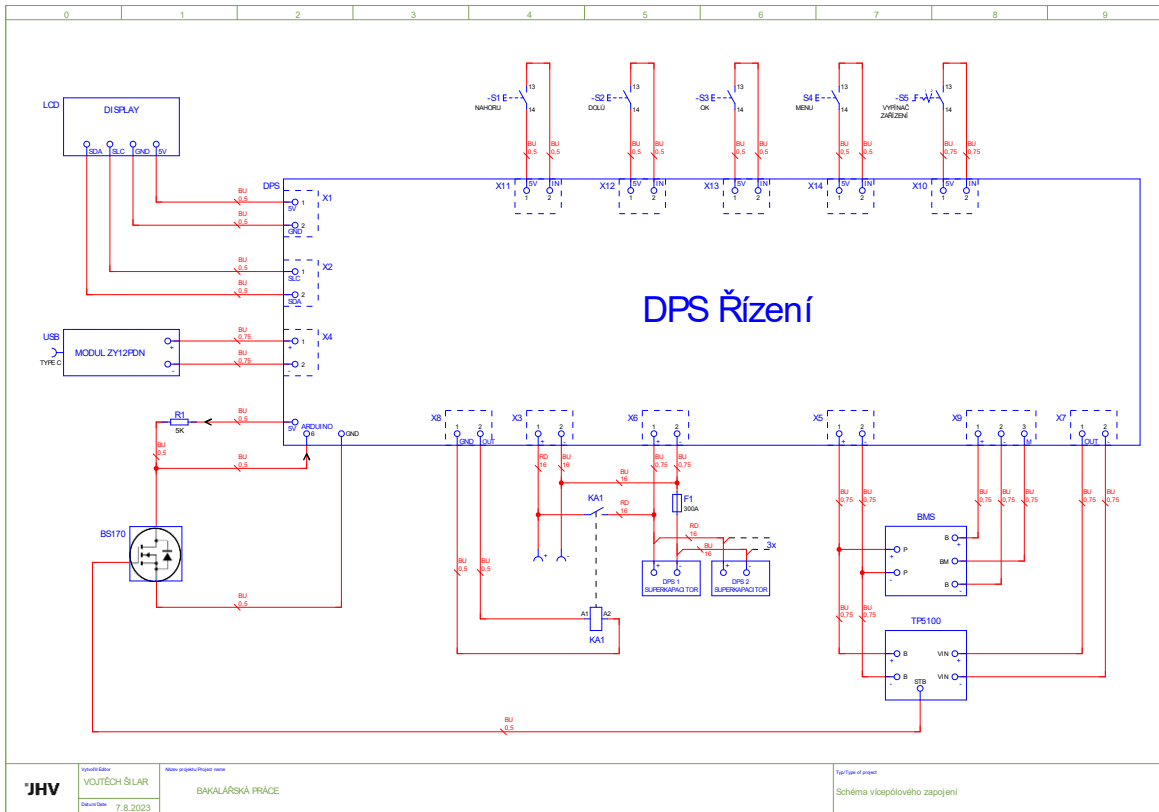
PŘÍLOHA D: Seznam součástek DPS řízení

PŘÍLOHA E: CD s kompletním programem i všemi schémata zapojení v plném rozlišení

PŘÍLOHA A: Schéma celkového zapojení

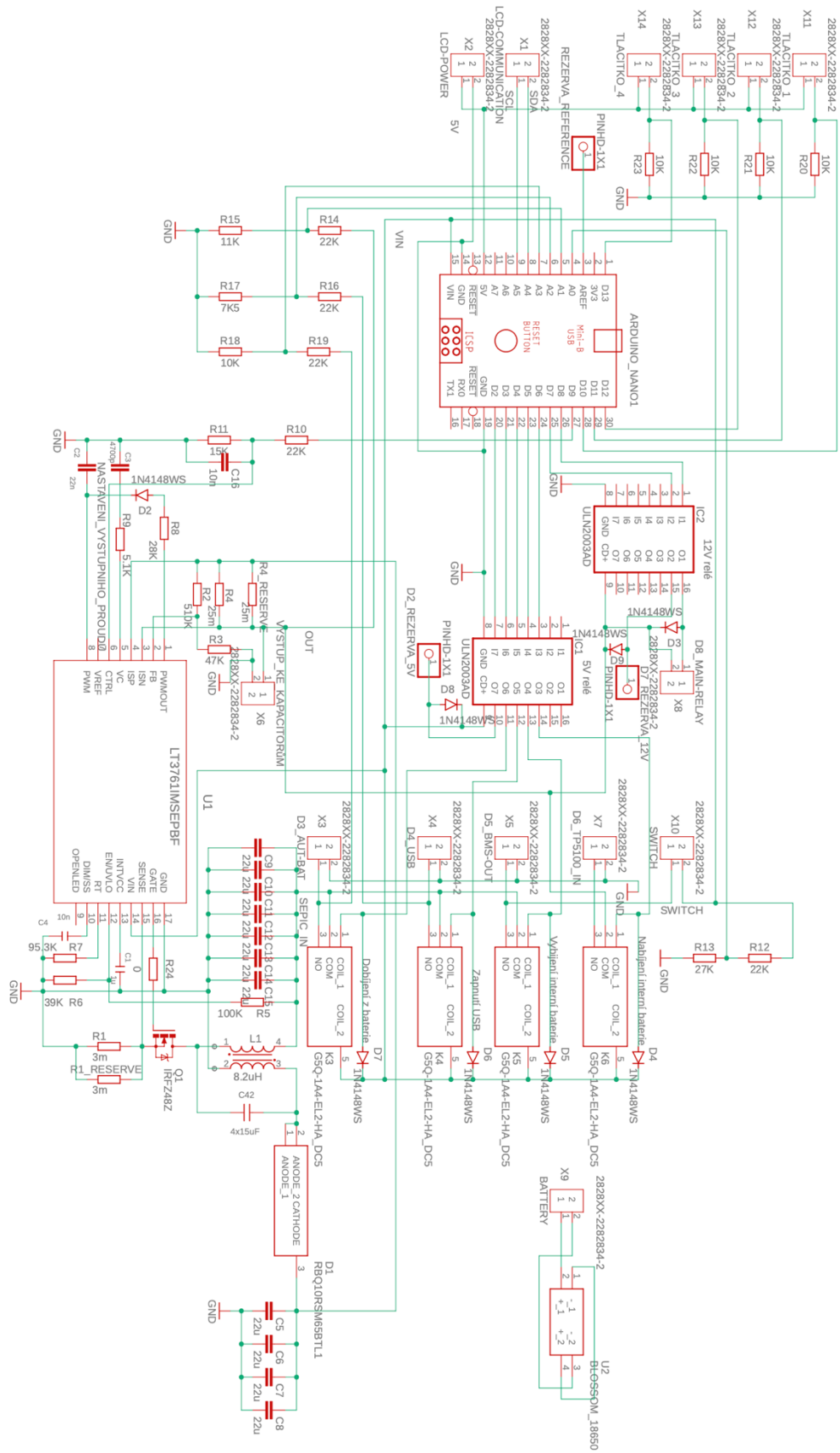
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9																																																																
<p>Zkratky pro barvy dle ČSN IEC 757</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Barva</th> <th>Zkratka</th> <th>Barva</th> <th>Zkratka</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>černá</td> <td>BK</td> <td>fialová</td> <td>VT</td> </tr> <tr> <td>hnědá</td> <td>BN</td> <td>šedá</td> <td>GY</td> </tr> <tr> <td>rudá</td> <td>RD</td> <td>bílá</td> <td>WH</td> </tr> <tr> <td>oranžová</td> <td>OR</td> <td>růžová</td> <td>PK</td> </tr> <tr> <td>žlutá</td> <td>YE</td> <td>tyrkysová</td> <td>TQ</td> </tr> <tr> <td>zelená</td> <td>GN</td> <td>zelenožlutá</td> <td>GRYE</td> </tr> <tr> <td>modrá</td> <td>BU</td> <td>stříbrná</td> <td>SR</td> </tr> </tbody> </table>										Barva	Zkratka	Barva	Zkratka	černá	BK	fialová	VT	hnědá	BN	šedá	GY	rudá	RD	bílá	WH	oranžová	OR	růžová	PK	žlutá	YE	tyrkysová	TQ	zelená	GN	zelenožlutá	GRYE	modrá	BU	stříbrná	SR																																
Barva	Zkratka	Barva	Zkratka																																																																						
černá	BK	fialová	VT																																																																						
hnědá	BN	šedá	GY																																																																						
rudá	RD	bílá	WH																																																																						
oranžová	OR	růžová	PK																																																																						
žlutá	YE	tyrkysová	TQ																																																																						
zelená	GN	zelenožlutá	GRYE																																																																						
modrá	BU	stříbrná	SR																																																																						
<p>BARVY ŽIL KABELU</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>VÝKON NÁVLAKU/AC</th> <th>ČERNÁ / BK</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>400V/230V AC</td> <td>ČERNÁ / BK</td> </tr> <tr> <td>N</td> <td>SVĚTLÉ MODRÁ / LBU</td> </tr> <tr> <td>0/1 NEUTR</td> <td>ORANŽOVÁ / OR</td> </tr> <tr> <td>0/1 NÁVĚTI</td> <td></td> </tr> <tr> <td>24V DC</td> <td>TMAVÉ MODRÁ / BUI</td> </tr> <tr> <td>0V DC</td> <td>MODROBÍLÁ / BLWH</td> </tr> <tr> <td>0/1 NEUTR</td> <td></td> </tr> <tr> <td>0/1 NÁVĚTI</td> <td></td> </tr> <tr> <td>24V DC</td> <td>ŽILNO ŽLUTÁ / GNYE</td> </tr> </tbody> </table>										VÝKON NÁVLAKU/AC	ČERNÁ / BK	400V/230V AC	ČERNÁ / BK	N	SVĚTLÉ MODRÁ / LBU	0/1 NEUTR	ORANŽOVÁ / OR	0/1 NÁVĚTI		24V DC	TMAVÉ MODRÁ / BUI	0V DC	MODROBÍLÁ / BLWH	0/1 NEUTR		0/1 NÁVĚTI		24V DC	ŽILNO ŽLUTÁ / GNYE																																												
VÝKON NÁVLAKU/AC	ČERNÁ / BK																																																																								
400V/230V AC	ČERNÁ / BK																																																																								
N	SVĚTLÉ MODRÁ / LBU																																																																								
0/1 NEUTR	ORANŽOVÁ / OR																																																																								
0/1 NÁVĚTI																																																																									
24V DC	TMAVÉ MODRÁ / BUI																																																																								
0V DC	MODROBÍLÁ / BLWH																																																																								
0/1 NEUTR																																																																									
0/1 NÁVĚTI																																																																									
24V DC	ŽILNO ŽLUTÁ / GNYE																																																																								
<p>Na všechny lané vodiče použít dutinku.</p> <p>Všechny vodiče dle, které jsou i při vypnutí hlavním vypínači pod napětím, se musí zakrýt proti kontaktu.</p> <p>Všechna datová vedení musí být v zásadě odstíněná.</p> <p>Výkonová a signální vedení jsou zásadně vedeny odděleně.</p> <p>Nesmí se používat hvězdicové pospojování, pod jeden šroub se může dát jen jeden drát.</p>																																																																									
<p>Ověření teplotní rozvaděče dle požadavků normy ČSN EN 61439. Maximální teplota vně rozvaděče Ta: 30 °C Maximální teplota uvnitř rozvaděče Tt: 40 °C</p> <p>značení prvků = XX+ YY-ZZ XX - označení zařízení YY - označení místa instalace ZZ - označení prvku</p>																																																																									
<p>LEGENDA PRVKŮ na základě normy ČSN EN 61346-2</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>jistíci 230/400V</td> <td>BG</td> <td>sníhač</td> </tr> <tr> <td>FC</td> <td>el. jističní 24V</td> <td>KH</td> <td>magnetický ventil</td> </tr> <tr> <td>Q</td> <td>Motorový spouštěč</td> <td>X</td> <td>svorkovnice</td> </tr> <tr> <td>TB</td> <td>zdroj</td> <td>XD</td> <td>základna zástrčka konektor</td> </tr> <tr> <td>EA</td> <td>osvětlení</td> <td>OCQ</td> <td>hlavní vypínač</td> </tr> <tr> <td>QA</td> <td>výkonový stykač</td> <td>0FD</td> <td>jistíci před hl. vypínačem</td> </tr> <tr> <td>KA</td> <td>pomocná relé, ovládané z PLC</td> <td>PH</td> <td>ovládací panel</td> </tr> <tr> <td>KN</td> <td>bezpečnostní relé</td> <td>XG</td> <td>stříbový box</td> </tr> <tr> <td>QA</td> <td>stykač bezpečnostní relé</td> <td>QO</td> <td>ventilátor</td> </tr> <tr> <td>SF</td> <td>tlačítko volič klíček</td> <td>BK</td> <td>kamera</td> </tr> <tr> <td>SN</td> <td>tlačítko nouzového zastavení</td> <td>XF</td> <td>Ethernet switch</td> </tr> <tr> <td>OQ</td> <td>spínač zájora pro ochranná zařízení</td> <td>T</td> <td>řazení pro motory</td> </tr> <tr> <td>BG</td> <td>ident systém - žetka</td> <td>FA</td> <td>přepřívová ochrana</td> </tr> <tr> <td>KF</td> <td>PLC</td> <td>A</td> <td>součásti PLC externí celky</td> </tr> <tr> <td>KFI</td> <td>diq.výstupy</td> <td>RF</td> <td>filtr</td> </tr> <tr> <td>KFO</td> <td>diq.výstupy</td> <td>LH</td> <td>skříň pro el. zařízení</td> </tr> </tbody> </table>										F0	jistíci 230/400V	BG	sníhač	FC	el. jističní 24V	KH	magnetický ventil	Q	Motorový spouštěč	X	svorkovnice	TB	zdroj	XD	základna zástrčka konektor	EA	osvětlení	OCQ	hlavní vypínač	QA	výkonový stykač	0FD	jistíci před hl. vypínačem	KA	pomocná relé, ovládané z PLC	PH	ovládací panel	KN	bezpečnostní relé	XG	stříbový box	QA	stykač bezpečnostní relé	QO	ventilátor	SF	tlačítko volič klíček	BK	kamera	SN	tlačítko nouzového zastavení	XF	Ethernet switch	OQ	spínač zájora pro ochranná zařízení	T	řazení pro motory	BG	ident systém - žetka	FA	přepřívová ochrana	KF	PLC	A	součásti PLC externí celky	KFI	diq.výstupy	RF	filtr	KFO	diq.výstupy	LH	skříň pro el. zařízení
F0	jistíci 230/400V	BG	sníhač																																																																						
FC	el. jističní 24V	KH	magnetický ventil																																																																						
Q	Motorový spouštěč	X	svorkovnice																																																																						
TB	zdroj	XD	základna zástrčka konektor																																																																						
EA	osvětlení	OCQ	hlavní vypínač																																																																						
QA	výkonový stykač	0FD	jistíci před hl. vypínačem																																																																						
KA	pomocná relé, ovládané z PLC	PH	ovládací panel																																																																						
KN	bezpečnostní relé	XG	stříbový box																																																																						
QA	stykač bezpečnostní relé	QO	ventilátor																																																																						
SF	tlačítko volič klíček	BK	kamera																																																																						
SN	tlačítko nouzového zastavení	XF	Ethernet switch																																																																						
OQ	spínač zájora pro ochranná zařízení	T	řazení pro motory																																																																						
BG	ident systém - žetka	FA	přepřívová ochrana																																																																						
KF	PLC	A	součásti PLC externí celky																																																																						
KFI	diq.výstupy	RF	filtr																																																																						
KFO	diq.výstupy	LH	skříň pro el. zařízení																																																																						
<p>JHV Vytvořil: VOJTECH ŠILAR Město projektu: Projekt name BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Schéma celkového zapojení</p>																																																																									

Obrázek A. 1: První strana schématu celkového zapojení (autor)



Obrázek A. 2: Druhá strana schématu celkového zapojení (autor)

PŘÍLOHA B: Schéma zapojení DPS řízení



Obrázek A. 3: Schéma zapojení DPS řízení (autor)

PŘÍLOHA C: Schéma zapojení DPS superkapacitorů



Obrázek A. 4: Schéma zapojení DPS superkapacitorů (autor)

PŘÍLOHA D: Seznam součástek DPS řízení

Comment	Designator	Footprint	LCSC Part #
1N4148WS	D2 D3 D4 D5 D6 D7 D8 D9	SOD-323	
1u	C1	C1206	
3m	R1	R1210	
5.1K	R9	R0805	
7K5	R17	R0805	
8.2uH	L1	WE-CFWI_1813	
10K	R18 R20 R21 R22 R23	RESC3216X70	
10n	C4	C1206	
10n	C16	C1210	
11K	R15	R0805	
15K	R11	RESC3216X70	
15uF	C42	WCAP-CSGP_2220_H2.0	
22K	R10 R12 R14 R16 R19	R0805	
22n	C2	CAPC2012X110	
22u	C5 C6 C7 C8 C9 C10 C11 C12 C13 C14 C15	C1210	
25m	R4	R2512	
27K	R13	R0805	
28K	R8	R0805	
39K	R6	R0805	
47K	R3	R0805	
95.3K	R7	RESC3216X70	
100	R24	RESC3216X70	
100K	R5	RESC3216X70	
510K	R2	R0805	
4700p	C3	CAPC2012X110	
BLOSSOM_18650	U2		1048
LT3761IMSEPBF	U1	MSOP-16_MSE	
RBQ10RSM65BTL1	D1	RBQ10RSM65BTL1	
ULN2003AD	IC1 IC2	SO16	

Obrázek A. 5: Seznam součástek DPS řízení (autor)