

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2013

Bc. Jakub Latocha

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

**Nabíječka LiFePO₄ akumulátorů spolupracující
s balanční jednotkou Akumon**
**Charging Unit for LiFePO₄ Battery Cooperative
with Balancing Unit Akumon**

2013

Bc. Jakub Latocha

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jakub Latocha**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2612T015 Elektronika
Téma: Nabíječka LiFePO₄ akumulátorů spolupracující s balanční jednotkou
Akumon
Charging Unit for LiFePO₄ Battery Cooperative with Balancing Unit
Akumon

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte teoretický popis akumulátorů, balančních jednotek a měničů pro nabíjení akumulátorů.
2. Navrhněte obvodové řešení měniče pro nabíjení akumulátorů spolupracujícího s balančními jednotkami Akumon.
3. Vytvořte simulační model nabíječe v programu PSpice.
4. Realizujte měnič pro nabíjení LiFePO₄ akumulátorů spolupracujícího s balančními jednotkami Akumon.

Seznam doporučené odborné literatury:

Cenek, M.: Akumulátory od principu k praxi, Praha: FCC Public 2003.
Vondrášek, F.: Výkonová elektronika. Svazek 2 - Měniče s vnější komunikací. Plzeň: ZČU 1994.
Vondrášek, F.: Výkonová elektronika. Svazek 3 - Měniče s vlastní komutací a bez komutace. Plzeň: ZČU 1998.
Wintrich, A.: Application Manual Power Semiconductors. Nuremberg : SEMIKRON International GmbH, 2011.
Davide, A.: Battery Management Systems For Large Lithium Ion Battery Packs. Norwood, Artech House 2010.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Vaculík, Ph.D.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013

Tcep



Gm

doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární
prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 7. 5. 2013


Bc. Jakub Latocha

Poděkování :

Tato práce byla vypracována s podporou projektu Nové kreativní týmy v prioritách vědeckého bádání, reg. č. CZ.1.07/2.3.00/30.0055 podpořeného Operačním programem Vzdělávání pro konkurenceschopnost a spolufinancovaného Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.

Děkuji především panu Ing. Petru Vaculíkovi, Ph.D., za poskytnuté konzultace při přípravě mé diplomové práce.

Abstrakt

Diplomová práce řeší problematiku nabíjení akumulátorových sestav a návrh nabíječe. V první části je proveden přehled základních typů používaných akumulátorů a jejich vlastností a také přehled způsobů jejich nabíjení a balancování. Dále jsou popsány měniče napětí použité při realizaci nabíječe. V následující části jsou na základě požadavků pro nabíjení LiFePO₄ akumulátorů navrženy balanční sestava a samotný nabíječ. V rámci této diplomové práce byly všechny navržené části také realizovány. Závěr realizační části je věnován měření na realizovaném nabíječi.

Abstract

This thesis addresses the issue of charging the accumulator assemblies and design of the charger. In the first part is a review the basic types of accumulators used and their properties and as well overview of the ways charging and balancing. The following describes the voltage converters used in the implementation of the charger. In the following section are based on the requirements for charging LiFePO₄ accumulators designed balancing group and itself charger. In this thesis was all designed parts also implemented. Conclusion The implementation part is devoted to the measurement of the realized charger.

Klíčová slova:

Akumulátor, LiFePO₄, balancování, chlazení, nabíječ, snižující měnič, meziobvod, IGBT

Key words:

Accumulator, LiFePO₄, balancing, cooling, charger, step-down converter, DC link, IGBT

Seznam použitých symbolů a zkratk:

NTC – termistor s negativní charakteristikou

m - počet fází zdroje

U_i - indukované napětí zátěže

T_2 – doba vypnutí spínače

BAL – signál balancování

STYK – signál ovládající stykač

Stř. – střídavé napětí

Ss – stejnosměrné napětí

U_{cc} – napájecí napětí

DPS – deska plošného spoje

BUD – signál přivedený na vstup budiče

IO – integrovaný obvod

$R_{TH(J-C)T}$ - tepelný odpor mezi přechodem a pouzdem tranzistoru

$R_{TH(J-C)D}$ - tepelný odpor mezi přechodem a pouzdem diody

$R_{TH(J-S)}$ - tepelný odpor mezi přechodem a chladičem

GND – zemnicí svorka, nulový potenciál

Obsah

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | Úvod | 10 |
| 2. | Akumulátory | 12 |
| 2.1 | Vlastnosti akumulátorů..... | 12 |
| 2.1.1 | Kapacita..... | 12 |
| 2.1.2 | Samovybitení | 12 |
| 2.1.3 | Poměry nabíjecí/vybíjecí proud | 12 |
| 2.1.4 | Vnitřní odpor | 12 |
| 2.1.5 | Paměťový efekt..... | 12 |
| 2.2 | Nejčastěji používané typy akumulátorů..... | 13 |
| 2.2.1 | NiCd akumulátor..... | 13 |
| 2.2.2 | NiMH akumulátor | 13 |
| 2.2.3 | Pb akumulátor..... | 13 |
| 2.2.4 | Li-Ion akumulátor | 14 |
| 2.2.5 | Li-pol akumulátor | 14 |
| 2.2.6 | Lithium - železo – fosfát (LiFePO ₄) akumulátor..... | 14 |
| 2.2.7 | Porovnání vlastností popsaných akumulátorů..... | 15 |
| 2.3 | Nabíjení akumulátorů..... | 16 |
| 2.3.1 | Pomalé nabíjení..... | 16 |
| 2.3.2 | Zrychlené nabíjení..... | 16 |
| 2.3.3 | Rychlé nabíjení | 16 |
| 2.3.4 | Udržovací nabíjení | 16 |
| 2.3.5 | Nabíjení LiFePO ₄ | 16 |
| 2.4 | Způsoby ukončování nabíjení..... | 17 |
| 2.4.1 | Časové ukončení | 17 |
| 2.4.2 | Napět'ové ukončení..... | 18 |
| 2.4.3 | Proudové ukončení..... | 21 |
| 2.4.4 | Teplotní ukončení | 22 |
| 2.5 | Spojování akumulátorů..... | 23 |
| 2.5.1 | Napět'ové balanční jednotky | 24 |
| 3. | Měníče napětí..... | 27 |
| 3.1 | Obecný popis měničů | 27 |
| 3.2 | Popis funkce jednotlivých měničů..... | 30 |
| 3.3 | Usměrňovače | 31 |

| | | |
|--------|------------------------------------|----|
| 3.4 | Pulsní měniče..... | 37 |
| 3.5 | Řízení pulsních měničů..... | 42 |
| 4. | Návrh a realizace..... | 44 |
| 4.1 | Realizace balanční sestavy..... | 45 |
| 4.2 | Nabíječka..... | 49 |
| 4.2.1 | Požadavky..... | 49 |
| 4.2.2 | Usměrňovač..... | 50 |
| 4.2.3 | Snižující DC/DC měnič..... | 50 |
| 4.2.4 | Čidla napětí a proudu..... | 51 |
| 4.2.5 | Budič IGBT modulu..... | 53 |
| 4.2.6 | Blok řízení..... | 54 |
| 4.2.7 | Návrh chlazení..... | 58 |
| 4.2.8 | Návrh kapacity meziobvodu..... | 62 |
| 4.2.9 | Jištění výkonové části měniče..... | 65 |
| 4.2.10 | Zdroj pro řídicí elektroniku..... | 65 |
| 4.2.11 | Výsledky měření..... | 65 |
| 5. | Závěr..... | 70 |
| 6. | Seznam použité literatury:..... | 71 |
| 7. | Seznam příloh..... | 73 |

1. Úvod

Téměř každý člověk, žijící v civilizované společnosti se setkává s využíváním elektrické energie nashromážděné v akumulátorech. Akumulátory mají různou velikost a různé vlastnosti podle použité technologie výroby. V budoucnu bude využívání akumulátorů čím dál častější v souvislosti s rozvojem využívání obnovitelných zdrojů energie a rozvojem elektrických pohonů napájených z nezávislých elektrických zdrojů. Takové elektrické pohony nalézají velmi široké uplatnění například v oblasti automobilové dopravy nebo v průmyslových aplikacích, ve kterých není možné přerušení procesu při výpadku napájení z rozvodné sítě. S rostoucím využitím akumulátorů zároveň vzrůstají požadavky na jejich cenu, životnost, provozní vlastnosti, dobu nabíjení (zejména v automobilové dopravě). To vede k vyvíjení nových typů akumulátorů. Jedním z těchto nových typů akumulátorů jsou akumulátory LiFePO_4 . V mnoha aplikacích je použití jednoho akumulátoru nedostačující a je nutné spolu propojit více akumulátorů. Tímto propojením vzniká tzv. akumulátorový blok. Následně vzniká požadavek na řízené nabíjení, které prodlužuje životnost a zvyšuje energetickou využitelnost tohoto bloku. K tomu jsou využívány balanční jednotky, které nejen vyrovnávají napětí na akumulátorech během nabíjení, ale také většinou disponují diagnostickými výstupy, které jsou používány ke komunikaci s nabíječkou nebo jiným periferním zařízením. Takovou balanční jednotkou je i AKUMON AKM1, která je použita v této diplomové práci. S rostoucí kapacitou akumulátorů a akumuláčnických bloků se zvyšuje výkon nabíječek těchto akumulátorů. Zejména při nabíjení elektromobilů je podstatné maximálně zkrátit čas nabíjení. Zkrácení nabíjecího času je dosaženo nabíjením maximálním proudem pro daný typ akumulátorů. Výstupní výkon těchto nabíječek se pohybuje v řádu kW až desítek kW.

Cílem této diplomové práce je navrhnout a vyrobit nabíječku akumulátorového bloku složeného z osmi LiFePO_4 akumulátorů, která bude spolupracovat s balančními jednotkami Akumon AKM1. Ke každému akumulátoru je připojena tato balanční jednotka, která monitoruje napětí akumulátoru. Důraz je kladen na zajištění šetrného provozu a nabíjení, a tím také na prodloužení životnosti. V úvodních kapitolách diplomové práce jsou popsány nejdůležitější vlastnosti akumulátorů a běžně používané typy akumulátorů. Popisovány jsou provozní parametry jednotlivých typů akumulátorů, ne však technologie jejich výroby. Následně je provedeno stručné srovnání akumulátorů. Následující kapitoly popisují způsoby nabíjení akumulátorů a s tímto související způsoby ukončování nabíjení. Dále je stručně popsáno spojování akumulátorů do akumulátorových bloků, a s tím související balancování akumulátorů. V dalších kapitolách teoretické části diplomové práce je vytvořen základní přehled měničů napětí. Podrobně jsou popsány pouze dva z těchto měničů, které jsou použity při návrhu a realizaci nabíječky. Podrobně jsou popsány usměrňovače a snižující měnič. V poslední kapitole teoretické části jsou vysvětleny dva způsoby řízení snižujících měničů, které jsou použity k řízení nabíječky. Jedná se o dvouhodnotové řízení proudu a řízení s konstantním kmitočtem.

V části popisující samotný návrh a realizaci jsou uvedeny parametry akumulátorového bloku, který bude nabíjen. Před samotným návrhem nabíječky je popsán návrh balanční sestavy. V rámci návrhu jsou také popsány základní provozní stavy a vlastnosti jednotek Akumon AKM1. Na základě parametrů akumulátorového bloku, výstupních informací z balanční sestavy a tvaru nabíjecí křivky LiFePO_4 akumulátorů, jsou stanoveny požadavky na nabíječku. Na základě požadavků je navrženo schéma silové části nabíječky a její základní koncepce. Následně je popsáno dimenzování a návrh jednotlivých funkčních bloků nabíječky. Těmito funkčními bloky jsou usměrňovač, snižující měnič, napěťový meziobvod, čidlo napětí, čidlo proudu, blok řízení, jištění, chlazení, budič IGBT tranzistoru.

V závěrečné části kapitoly popisující realizaci a návrh jsou uvedeny výsledky měření na RL zátěži a následně průběhy napětí a proudů při nabíjení akumulárního bloku.

V přílohové části jsou uvedena veškerá schémata a předlohy pro výrobu plošných spojů a fotografie výrobků.

Téma diplomové práce jsem si vybral, protože v rozvoji akumulátorových technologií vidím velký potenciál. Seznámení se s novým typem akumulátorů a problematikou spojenou s jejich nabíjením mi přišlo velice zajímavé. Dalším důvodem výběru tohoto tématu diplomové práce byl realizační charakter této práce, v němž jsem viděl způsob jak získat praktické zkušenosti v této problematice.

2. Akumulátory

Akumulátor je zařízení sloužící k opakovanému uchovávání energie, v tomto případě elektrické. Akumulátor je nutné nejdříve nabít a teprve následně z něj lze energii čerpat a použít ho jako zdroj energie. Kvůli tomu se jedná o tzv. sekundární články, protože primární články poskytují energii hned po svém sestavení a zpravidla je není možno nabíjet, například klasická zinkouhlíková baterie.

2.1 Vlastnosti akumulátorů

2.1.1 Kapacita

Kapacita udává, jaké množství elektrického náboje je schopen akumulátor pojmout. Jednotkou kapacity je ampérhodina (Ah) nebo také miliampérhodina (mAh) pro menší články. Pojem kapacita nám říká, jaký proud je schopen akumulátor dodat po určitou dobu, než dojde k vybití a akumulátor již není schopen udržet jmenovité výstupní napětí při daném zatížení. (1)

2.1.2 Samovybíjení

V akumulátoru dochází k chemické reakci, která způsobuje, že se akumulátor vybíjí i bez zatížení. Rychlost samovybíjení závisí na typu akumulátoru a na okolní teplotě. Udává se v procentech a vyjadřuje rozdíl hustoty náboje hned po plném nabití a po určitém čase. (1)

2.1.3 Poměry nabíjecí/vybíjecí proud

Pojmy poměrný nabíjecí a vybíjecí proud vyjadřují velikosti nabíjecího a vybíjecího proudu. Jedná se o charakteristické údaje jedinečné pro každý typ akumulátoru bez ohledu na kapacitu. Udává se v mA nebo A jako násobek kapacity (C). Například je-li článek o kapacitě 10Ah nabíjen (vybíjen) proudem 2C, znamená to, že nabíjecí (vybíjecí) proud je 20A. (1)

2.1.4 Vnitřní odpor

Vnitřní odpor by měl být co nejnižší, jinak nelze zaručit, že když bude akumulátor plně zatížen, udrží stálé výstupní napětí. U některých typů akumulátorů se tento odpor zvětšuje v důsledku častého nabíjení. Nejhůře se z tohoto hlediska jeví akumulátory typu NiMh nejlépe naopak NiCd. (1)

2.1.5 Paměťový efekt

Paměťový efekt vzniká při opakovaném vybíjení akumulátorů (50 až 100x) na malou, ale stejnou hloubku vybití. Jeho podstatou je změna krystalové struktury záporné elektrody. Tento jev je reverzibilní a odstranitelný úplným vybitím akumulátoru. Paměťový jev se projevuje vznikem tzv. druhého vybíjecího stupně, což je pokles napětí článku akumulátoru zhruba o 50 až 100 mV. K poklesu kapacity však nedochází. Tento jev se projevuje především u NiCd článků. Paměťový efekt může také vzniknout častým nabíjením příliš malým proudem (např. 0,2C). (1)

2.2 Nejčastěji používané typy akumulátorů

2.2.1 NiCd akumulátor

Niklo-kadmiový akumulátor je vyráběn se zaplavenými elektrodami a kapalným elektrolytem a také jako hermetizovaný (pro použití v přístrojích např. vrtačky apod.).

Jedna z výhod NiCd akumulátoru je možnost skladování ve vybitém stavu, což zvyšuje odolnost proti hlubokému vybití. Nevýhodou ve srovnání s ostatními typy akumulátorů je nízká měrná kapacita. Problematickým rysem tohoto typu akumulátoru je jedovatost kadmia, ze kterého je složena záporná elektroda. Jako elektrolyt je použit 20-22% roztok hydroxidu draselného (KOH), nebo hydroxidu solného (NaOH) s destilovanou vodou. Kladná elektroda je tvořena oxidem nikelnatým a příměsemi, které zlepšují vodivost elektrolytu. Používanou příměsí je často grafit. Zápornou elektrodu tvoří směs kadmia, železa a oxidů železa. Jmenovité napětí článku je 1,2 V a při plném nabití napětí článku dosahuje 1,35V, naopak vybitý článek má 0,8-1V. (1)

2.2.2 NiMH akumulátor

Nikl-metal hydridový akumulátor patří k nejpoužívanějším druhům akumulátorů. V porovnání s NiCd akumulátorem má asi dvojnásobnou kapacitu. Důvody častého požití tohoto typu akumulátoru jsou poměrně velká kapacita a schopnost dodat velký proud. Omezující je však nízké napětí jednoho článku (1,2 V), což je méně než u jednorázových baterií (1,5 V). Jednou z předností tohoto typu akumulátoru je absence paměťového efektu, naopak nevýhodou zůstává horší výdrž při nízkých teplotách, tepelné ztráty při nabíjení a vyšší úroveň samovybíjení (15-30% při pokojové teplotě za měsíc). Existuje také typ NiMH akumulátoru s nízkou úrovní samovybíjení (LSD = Low Self-Discharge). (1)

Kladná elektroda má stejné složení a konstrukci jako kladná elektroda NiCd akumulátoru. Elektrochemicky aktivní látkou záporné elektrody je kovová slitina, která je schopná při nabíjení a vybíjení navazovat a uvolňovat vodík. Slitina může obsahovat například tyto prvky Pb, Ti, Zr, Ni, Cr, Co, Sn, Fe a další. (1)

2.2.3 Pb akumulátor

Omezení olověného akumulátoru spočívá v tom, že při vybití (i částečném) trvajícím delší dobu dochází na jeho elektrodách k nevratným změnám, tzv. sulfataci, která trvale snižuje jeho kapacitu. Kvůli tomu je nutné akumulátor po použití brzy dobít. Sulfatace je jev, při kterém se přeměňuje síran olovnatý, který vznikl vybíjením na kladné elektrodě z oxidu olovičitého, který za celkem krátkou dobu přechází do nerozpustné formy a dále se nezúčastňuje nabíjecího procesu a tím klesá kapacita akumulátoru. Olověné akumulátory vykazují velice dlouhou životnost (5-15 let) a velice nízký samovybíjecí proud (2 – 3% kapacity za měsíc). Nevýhodou však zůstává nemožnost úplného vybíjení (maximálně 30 – 40% kapacity). (1)

Při nabitém stavu je aktivní hmota záporné elektrody tvořena houbovitým olovem (Pb), u kladné elektrody oxidem olovinčítým (PbO₂). Elektrolytem v Pb akumulátorech je destilovaná vodou zředěná kyselina sírová (H₂SO₄) s koncentrací 35%. Roztok je z technických důvodů ve formě

ztuženého gelu nebo nasáknutý do vaty ze skelných vláken. Při vybíjení se aktivní hmoty kladné i záporné elektrody mění na síran olovnatý (PbSO_4) a elektrolyt je zbavován kyseliny sírové a naopak obohacován vodou. (1)

2.2.4 Li-Ion akumulátor

Lithium-iontový akumulátor je běžně používán ve spotřební elektronice, hlavně v mobilních telefonech a podobných aplikacích. Pro přenosná zařízení se výborně hodí kvůli vysoké energetické hustotě vzhledem k objemu. Chemický princip je podobný jako u lithium-polymerových akumulátorů. Anoda je z uhlíku a katoda je z oxidu kovu, elektrolytem je lithiová sůl s organickým rozpouštědlem.

Předností tohoto typu akumulátoru je vysoká kapacita (až 3x větší než u NiMH), další výhodou je velice malý samovybíjecí cyklus (asi 5% za rok) a tím i větší životnost. Nevýhodou Li-Ion akumulátoru je, že by se neměl nechat úplně vybit a při nabíjení hrozí výbuch nebo vznícení. Napětí nabitého Li-Ion článku se pohybuje v rozmezí 3,6 -3,7V. Vnitřní odpor je vyšší než u Ni-Cd článků a proto se příliš nehodí pro aplikace s velkým proudovým odběrem. Životnost článků se podle typu pohybuje kolem 500 nabíjecích cyklů, poté kapacita klesá o 10 – 20%. U těchto článků se neprojevuje paměťový efekt, a proto je možné článek dobít z jakékoliv úrovně vybití. Kladnou elektrodu tvoří sloučeniny kovů např. LiCoO_2 , LiMnO_2 , zápornou elektrodu tvoří uhlík. Elektrody jsou na povrchu vysoce porézní a matrice je vytvořena tak, aby snadno rekombinovala ionty lithia. Elektrolytem je lithiová sůl LiPF_6 , LiBF_4 , nebo LiClO_4 a organické rozpouštědlo. Pro ionty lithia je kapalný elektrolyt vodivý a při nabíjení a vybíjení putují mezi kladnou a zápornou elektrodou. Separátory jsou tvořeny tenkou porézní fólií z polyetylenu nebo polypropylenu. Během nabíjení kladné ionty putují k záporné elektrodě, zde se ukládají do volných míst v porézní uhlíkové struktuře. (1)

2.2.5 Li-pol akumulátor

Akumulátory lithium-polymer začínají být v současné době velmi perspektivní pro použití v elektromobilech. Hlavním omezením zůstává nízký počet nabíjecích cyklů (kolem 500). Namísto tekutého je zde použit pevný elektrolyt. Díky tomu není potřeba masivní obal (elektrolyt nemůže vytéct) a ani separátory (elektrolyt vymezuje mezery mezi elektrodami). Katodu tvoří oxid lithia a kobaltu případně lithia, niklu a kobaltu, do jehož struktury jsou vpraveny ionty lithia. Anoda je tvořena uhlíkem. Základní vlastnosti jako napětí článku a způsoby nabíjení jsou shodné jako u Li-ion akumulátorů. (1)

2.2.6 Lithium - železo – fosfát (LiFePO_4) akumulátor

Principiálně se jedná o Li-ion akumulátor, který má katodu tvořenou materiálem LiFePO_4 a anodu tvoří sloučeniny lithia. Za účelem zvýšení elektrické vodivosti (snížení vnitřního odporu) je do katody přimíšeno malé množství uhlíku (grafitu). Akumulátory LiFePO_4 mají mnoho společných vlastností s jinými Li-ion akumulátory. Výraznými výhodami při srovnání s LiCoO_2 jsou: vyšší bezpečnost díky větší odolnosti vůči tepelnému přetížení, delší životnost, větší nabíjecí a vybíjecí proudy. Železo a fosfor použité k výrobě katody jsou levnější než kobalt a zároveň nemají takový dopad na životní prostředí. Energetická hustota je nižší než u klasických Li-ion akumulátorů, tato nevýhoda se však přibližně po roce smazává. Důvodem je fakt, že LiFePO_4 ztrácí kapacitu pomaleji než Li-ion akumulátory a v dalších letech používání je díky tomu kapacita LiFePO_4 akumulátoru vyšší

než u Li-ion akumulátoru. Zvýšená odolnost proti explozím je zajištěna chemickou vazbou Fe-P-O, která je pevnější než Co-O. Při zkratu a přehřátí je těžší z vazby odstranit kyslíkové atomy a až při extrémní teplotě nad 800 °C dochází k havárii. (1)



12V 40Ah

Obrázek 1. ukázka LiFePO₄ akumulátoru

2.2.7 Porovnání vlastností popsanych akumulátorů

Tabulka 1 shrnuje a porovnává základní vlastnosti výše uvedených akumulátorů.

| | NiCd | NiMH | Li-Ion | Pb | LiFePo ₄ |
|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------------|
| Jmenovité napětí článku [V] | 1,2 | 1,2 | 3,6 | 2 | 3,2 |
| Hustota energie [Wh/kg] | 70 | 100 | 180 | 40 | 150 |
| Nabíjecí proud [C] | 1 až 5 | 1 až 2 | 1 | <1 | 1 až 5 |
| samovybíjení při 20 °C [%/měsíc] | 20 - 25 | 15 - 30 | 2 - 5 | 10 - 15 | 2 - 3 |
| Počet nabíjecích cyklů | 1000 | 800 | >1500 | 500 | <2000 |
| Optimální proudová zatížitelnost [C] | 1 | 0,5 | 5 | 0,2 | 0,5 |
| Provozní teploty [°C] | -40 až 50 | -10 až 40 | -20 až 50 | -20 až 50 | -30 až 70 |
| Životnost [rok] | >5 | 3-4 | >10 | 5-15 | >10 |

Tabulka.1. Srovnání akumulátorů (1)

2.3 Nabíjení akumulátorů

V této kapitole budou popsány způsoby nabíjení akumulátorů a také nabíjení LiFePO_4 akumulátorů.

Akumulátory lze nabíjet různými proudy, velikost těchto proudů ovlivňuje rychlost nabití. Doba nabíjení se může pohybovat od několika minut až po hodiny. Velikost nabíjecího proudu udává výrobce akumulátoru, tedy maximální nabíjecí proud článku. Existují čtyři způsoby nabíjení. (1)

2.3.1 Pomalé nabíjení

Mezi bezpečné a spolehlivé metody nabíjení akumulátorů patří pomalé nabíjení. Nabíjecí proud dosahuje maximálně $1/10$ kapacity nabíjeného článku (např. pro článek s kapacitou 20Ah je nabíjecí proud 2A). Z velikosti nabíjecího proudu ($1/10$ kapacity) lze snadno odhadnout dobu nabíjení, při tomto typu nabíjení se pohybuje od 10 do 16 hodin. Tento typ nabíjení nepotřebuje hlídat konec nabíjení, protože při přebíjení se přebytečný proud mění na teplo, které není velké, a tudíž nepoškodí akumulátor. (1)

2.3.2 Zrychlené nabíjení

Tento typ nabíjení je hojně používán u starších typů nabíječek. Nabíjecí proud se pohybuje v rozmezí $1/7C$ až $1/3 C$. Pro tento typ nabíjení je standardní nabíjecí doba od 3 do 7 hodin podle použitého akumulátoru. Při zrychleném nabíjení je vhodné zvážit použití snímačů teploty článků, jelikož při překročení nabíjecí doby se může akumulátor poškodit. (1)

2.3.3 Rychlé nabíjení

Při rychlém nabíjení dosahuje nabíjecí proud velikosti 1-2 C, někdy 1-5 C podle typu baterie. Akumulátory nabíjené rychle by měli být opatřeny teplotním čidlem kvůli případné úpravě nabíjecího proudu. Mnohdy je problém teploty článků řešen přímo nabíječkou, která hlídá teplotu článků a upravuje nabíjecí proud. Toto nabíjení se nedoporučuje ukončovat časovačem. (1)

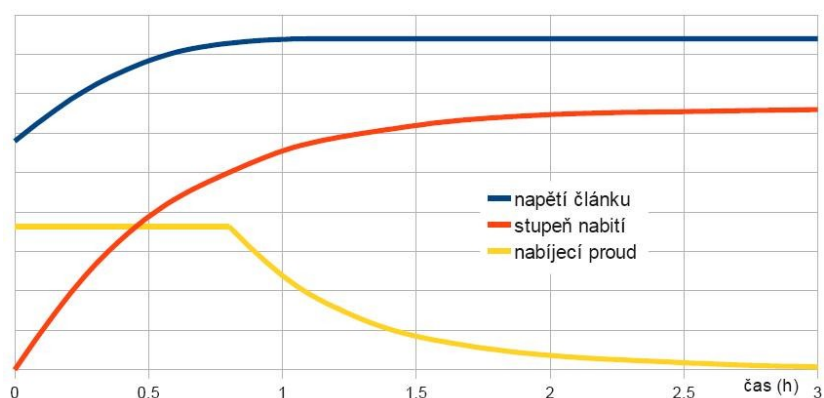
2.3.4 Udržovací nabíjení

Udržovací nabíjení je používáno ke kompenzaci samovybití po úplném nabití akumulátoru a udržuje ho plně nabitý. Udržovací proud se pohybuje ve velikosti od $1/20$ do $1/50$ kapacity a je doporučen výrobcem akumulátoru. Inteligentní nabíječky tento režim podporují. (1)

2.3.5 Nabíjení LiFePO_4

Nabíjení lze rozdělit na dvě fáze. V první fázi se velikost nabíjecího proudu pohybuje v jednotkách C. Během této fáze není žádný požadavek průběhu proudu, pouze velikost proudu nesmí překročit maximální hodnotu. Při nízké hodnotě nabíjecího proudu trvá nabíjení déle, ale nemůže dojít k poškození a zvýšenému opotřebením akumulátoru. S postupným nabíjením se zvyšuje napětí článku až na hodnotu nabíjecího napětí. Když napětí akumulátoru dosáhne konečného napětí (nabíjecího napětí) je nabíjení dokončeno ze 70 až 90% (70% při předchozím úplném vybití). Během druhé fáze je

hodnota napětí konstantní a velikost proudu klesá až k zlomkové hodnotě počátečního proudu (např. 0,05 C). V tomto stavu je článek nabit. Při dalším nabíjení by hodnota nabíjecího proudu klesla až k nule ale kapacita by se již nezvýšila. Není potřeba hlídat dobu nabíjení, jelikož nabitý akumulátor ponechaný připojený k nabíječce není poškozovaný. Naopak, pokud není akumulátor delší dobu používán, je vhodné ho nechat připojený k nabíječce, tím se vyloučí vliv samovybití. U nových akumulátorů není doporučeno hluboké cyklování (vybití pod 33% kapacity). Výrobci také doporučují různě dlouhou pauzu po prvních 20 nabíjecích cyklech. (2)



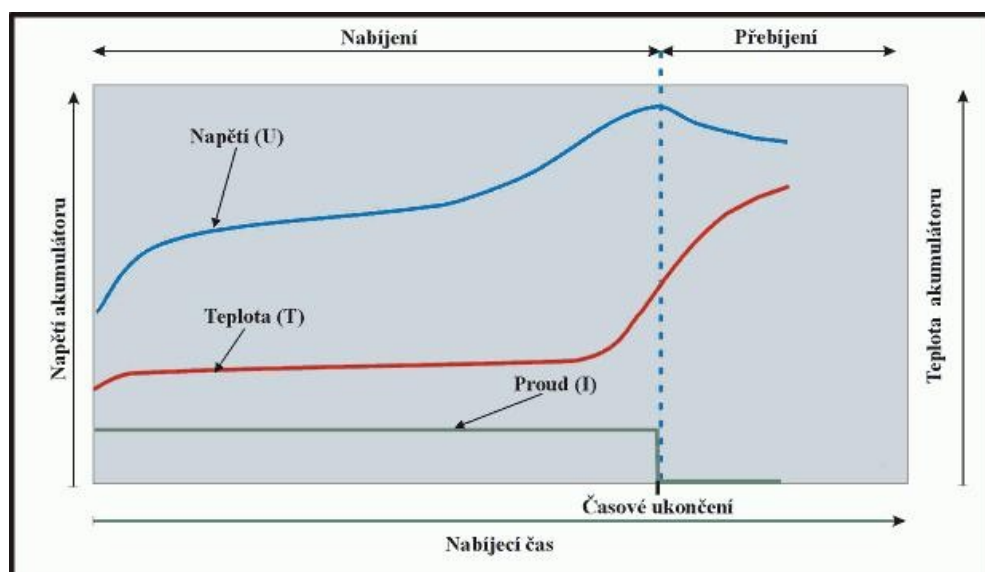
Obrázek 2. Nabíjecí charakteristika lithiového článku (2)

2.4 Způsoby ukončování nabíjení

Jak již bylo uvedeno v dřívějších kapitolách, je důležité ukončit nabíjení ve vhodný okamžik, aby nedocházelo k poškozování akumulátorů, především pokud se nabíjí většími proudy. Aby nedocházelo ke snižování životnosti akumulátoru a také aby nedocházelo ani k přebíjení, jsou používány 4 základní metody ukončování nabíjení.

2.4.1 Časové ukončení

Dříve nejčastěji používaná metoda nabíjení, která dnes nachází uplatnění především u levných nabíječek. Princip této metody spočívá v tom, že se po určitý časový interval (mezi 14 – 16 hodinami) spustí nabíjení konstantním proudem. Délka časového intervalu je předem dána kapacitou článku. To znamená, že článek s větší kapacitou je odpojen příliš brzy a nenabije se zcela a naopak článek s menší kapacitou je přebíjen. Tato metoda není vhodná pro nabíjení pomocí velkých proudů, jelikož může snadno dojít k destrukci akumulátoru. Další nevýhodou této metody je situace, kdy nabíjíme článek s ideální kapacitou (doba nabíjení přesně nastavena), který ovšem není zcela vybitý. Poté v pozdější fázi nabíjecího cyklu dochází k přebíjení. Kvůli těmto nevýhodám a omezením se u této metody používají nabíjecí proudy do 0,2 C (nedochází k přílišnému poškozování článků). Tato metoda je tedy použitelná pouze pro pomalé nabíjení. (3)



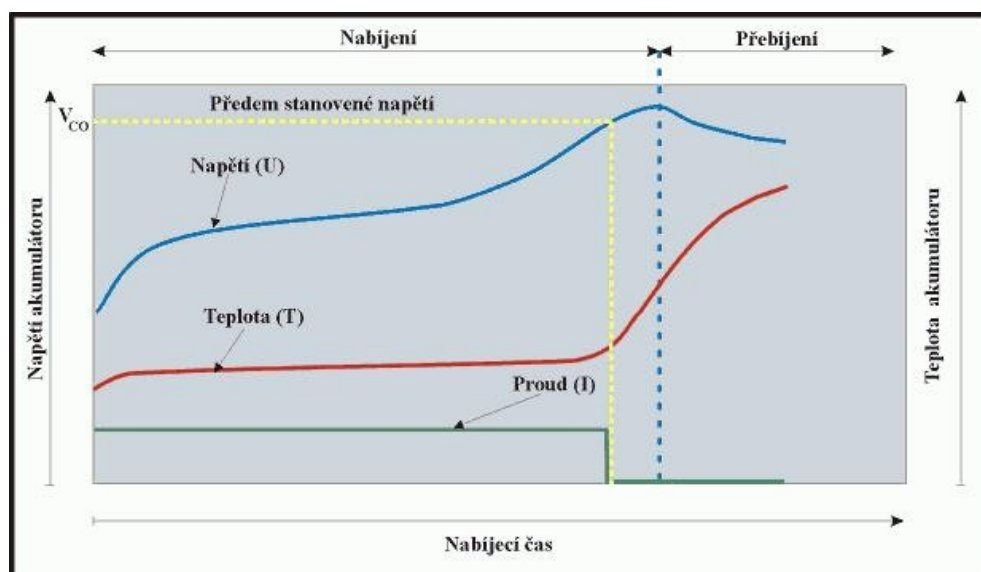
Obrázek 3. Metoda časového ukončování (3)

2.4.2 Napěťové ukončení

Tato metoda je používána v převážné většině dnešních nabíječek. Samotný princip vychází ze znalosti průběhu napětí článku v závislosti na čase. Tedy přesněji jak se mění napětí článku během nabíjení. Pro ukončování jsou dále používány tyto metody: (3)

Metoda V_{CO}

Při této metodě je nabíjení ukončeno při dosažení stanoveného napětí článku. Toto napětí se označuje jako V_{CO} (CO = cut-off). Toto napětí je předem dáno pro daný akumulátor a bývá stanoveno podle nabíjecích křivek v katalogových listech. Tento systém má nevýhodu v tom, že napětí článku se v průběhu nabíjení mění také teplotou, nabíjecím proudem a druhem akumulátoru. Tato metoda se tedy používá pouze jako dodatková k dalším metodám. Nejčastěji je tato metoda používána pro NiCd akumulátory. (3)

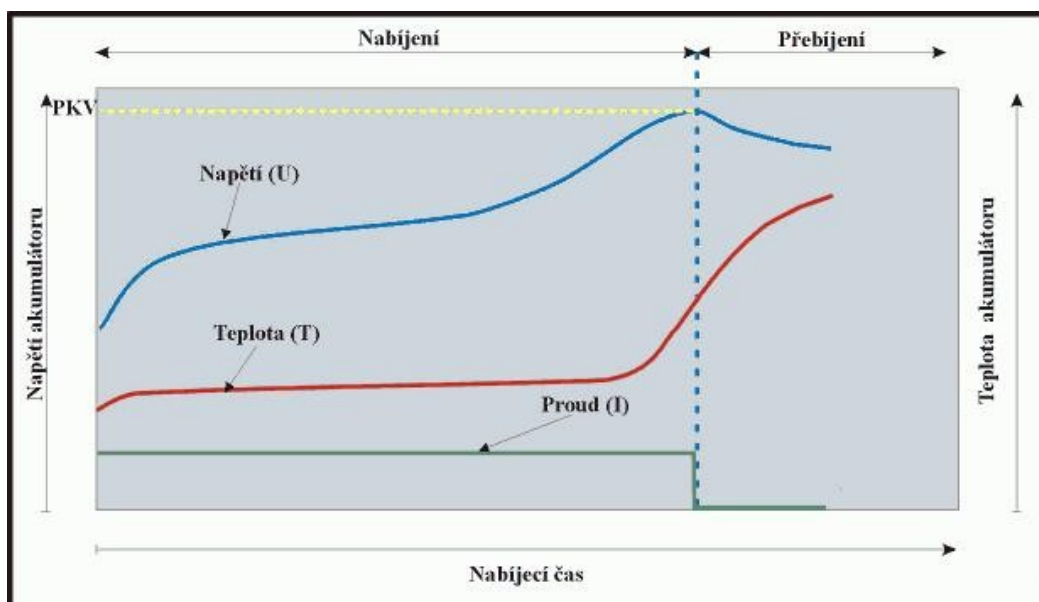


Obrázek 4. Metoda napětového ukončení V_{co} (3)

Metoda PKV

Další způsob ukončení nabíjení je ukončení po dosažení vrcholu napětí článku (peak voltage detection). Tento vrchol napětí je označován jako PKV. K ukončení nabíjení dojde ve chvíli dosažení nejvyššího napětí. Tato metoda je používána pro režim rychlého nabíjení, tedy pro nabíjecí proudy 1 až 2 C. Pro menší proudy je velice obtížné stanovit PKV, při větších nabíjecích proudech je metoda zkrusována zahříváním akumulátoru a následným poklesem napětí ve chvíli oteplování akumulátoru. Z tohoto důvodu se metoda nepoužívá pro nabíjení při vyšších teplotách než pokojových (20-25°C).

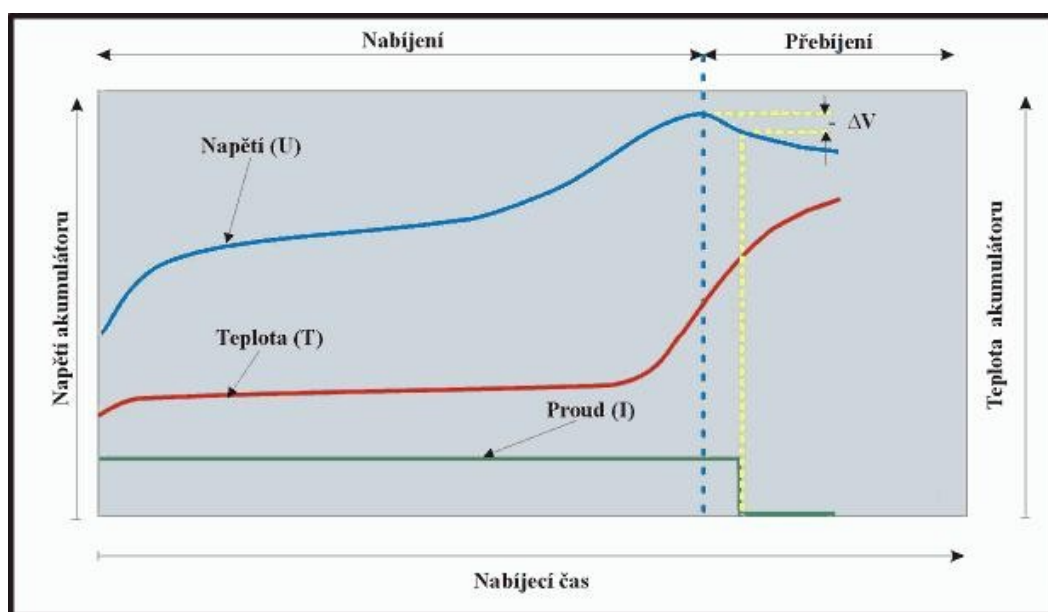
(3)



Obrázek 5. Metoda napětového ukončení PKV (3)

Metoda $-\Delta V$

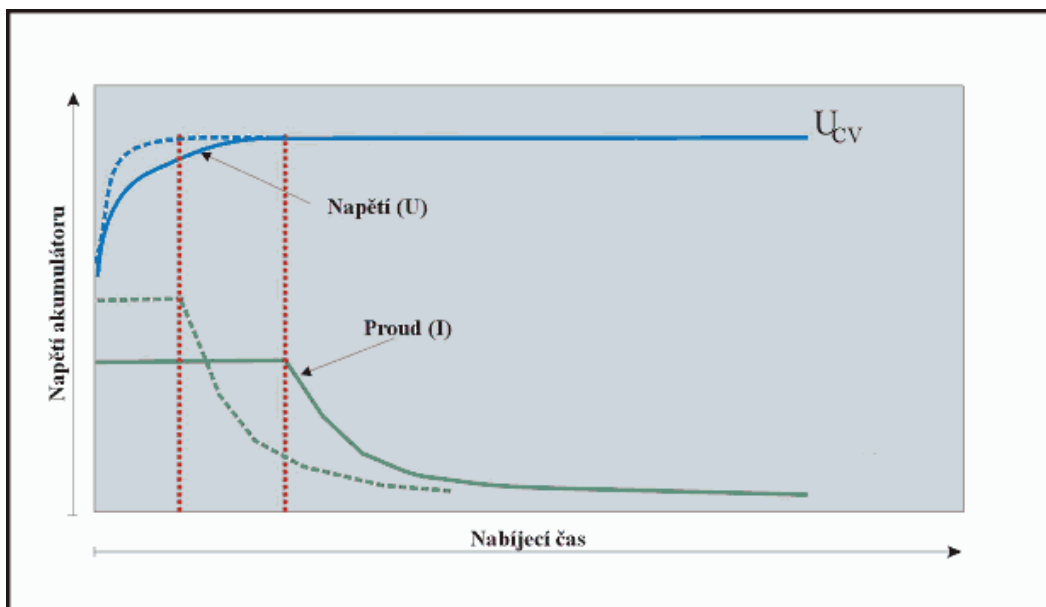
Tato metoda je založena na indikaci poklesu napětí během konce nabíjení. Nabíjení je ukončeno, když napětí článku poklesne o 10 mV (pro NiCd akumulátory) a 5 mV (pro NiMH akumulátory). Přesto že je tato metoda nejčastěji používána má i své nevýhody. První z nevýhod je omezení použitelnosti pro nabíjecí proudy o velikosti 1 až 2 C, tedy pro rychlé nabíjení. Při nabíjecím proudu nižším než 0,5 C nedochází k poklesu napětí. Naopak při ultrarychlém nabíjení dojde k poklesu napětí až když je článek plně nabitý a dojde k němu následkem zvýšení teploty článku. Dochází tedy ke krátkodobému přebíjení, což následně snižuje životnost akumulátoru. Metoda je nejčastěji používaná u komerčních nabíječek s režimem rychlého nabíjení. (3)



Obrázek 6. Metoda napěťového ukončení $-\Delta V$ (3)

Metoda CCCV

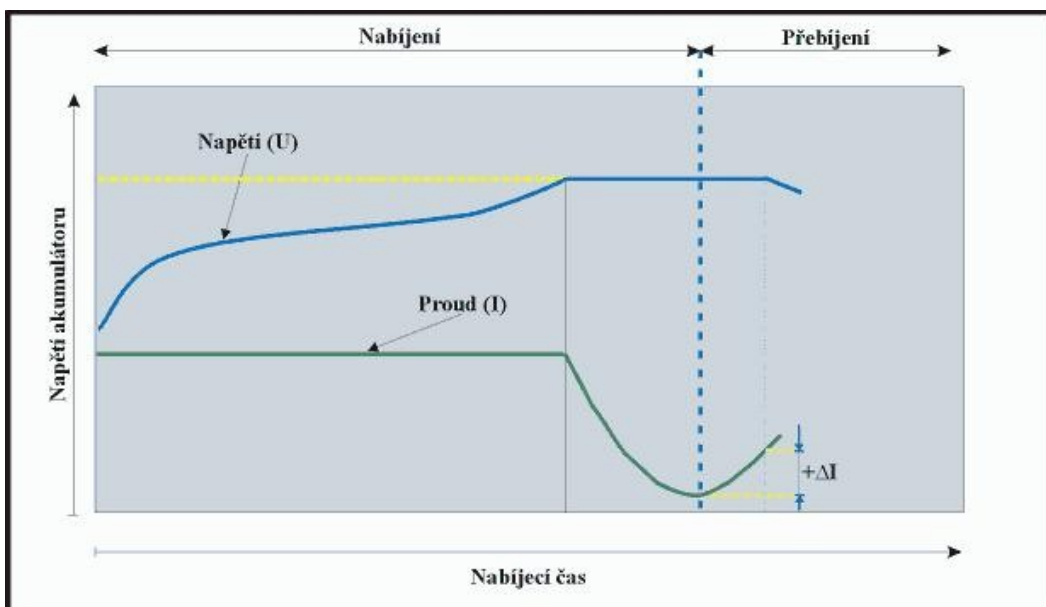
Jedná se o nabíjení konstantním proudem, až do doby, než akumulátor dosáhne předem určeného napětí. Poté již probíhá nabíjení konstantním napětím. Nabíjení je ukončeno, když nabíjecí proud poklesne na hodnotu přibližně 1,5 až 2% C. U některých nabíječek již není v druhé fázi nabíjení sledována hodnota proudu, ale nabíjení je ukončeno časovačem. Tato metoda je používána pro nabíjení Li-iontových akumulátorů, a pokud je správně nastaveno maximální nabíjecí napětí nedochází k přebíjení. (3)



Obrázek 7. Metoda ukončení CCCV (3)

2.4.3 Proudové ukončení

Akumulátor je nabíjen konstantním proudem, dokud napětí akumulátoru nedosáhne předem určeného napětí, tehdy nabíjení přejde do režimu nabíjení konstantním napětím. Nabíjení je ukončeno při nárůstu nabíjecího proudu v režimu nabíjení konstantním napětím. Problematické je nabíjení při zvýšené teplotě akumulátorů. Za těchto podmínek se totiž může stát, že akumulátor nedosáhne předem určeného napětí. Podobně se jeví metoda CCCV vhodná pro nabíjení lithiových akumulátorů, u těchto ale nedochází k nárůstu proudu. (3)



Obrázek 8. Metoda proudového ukončení (3)

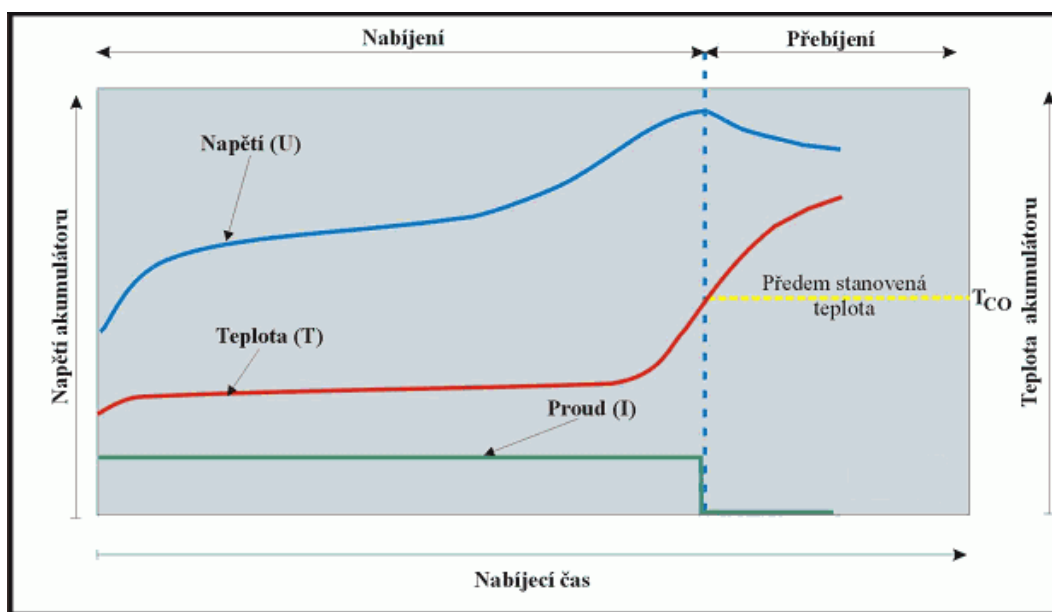
2.4.4 Teplotní ukončení

Metody teplotního ukončení existují dvě. Nejčastěji jsou tyto metody používány v mobilních telefonech, radiostanicích, noteboocích a také při nabíjení akumulátorového nářadí. Teplota je většinou snímána termistorem, který je umístěn na plášti akumulátorového článku. Velice důležité je umístění termistoru, protože termistor, který není v kontaktu s pláštěm, dodává nepřesné nebo zpožděné informace. Používány jsou termistory typu NTC (při zvýšení teploty jejich odpor klesá).

Metoda TCO

Principem této metody je odpojení nabíjecího proudu v okamžiku dosažení maximální přípustné teploty (obvykle 45°C).

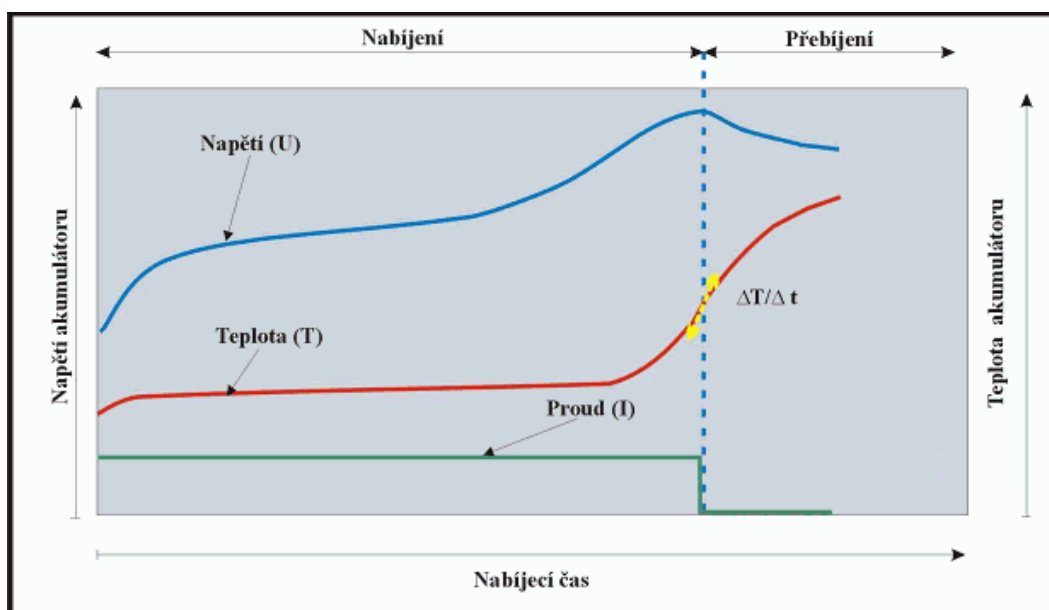
Tato metoda je vhodná pro akumulátory do kapacity 2Ah s nabíjecím proudem 0,5 až 1 C. Pro akumulátory s větší kapacitou je doporučený nabíjecí proud jen kolem 0,3 C. Metoda TCO se nehodí pro nabíjení akumulátorů s nízkou nebo příliš vysokou teplotou. Při příliš nízké teplotě akumulátoru dochází k přebíjení a naopak při příliš vysoké teplotě se akumulátor buď nenabíjí vůbec, nebo se nenabíje na plnou kapacitu. (3)



Obrázek 9. Metoda teplotního ukončení TCO (3)

Metoda $\Delta T/\Delta t$

Tato metoda je založena na vyhodnocování změny teploty v určitém čase (dT/dt). Nabíjení je ukončeno, pokud dojde ke změně teploty o 0,5 - 1°C za minutu. Doporučovaný nabíjecí proud je 0,3 C a teplota do 30° C. Nevýhoda této metody je, že pokud dojde k výpadku elektrické energie nebo je akumulátor ještě teplý po předchozím nabíjení, tak nabíječ čeká další nárůst teploty, aby nabíjení ukončil. (3)



Obrázek 10. Metoda teplotního ukončení $\Delta T/\Delta t$ (3)

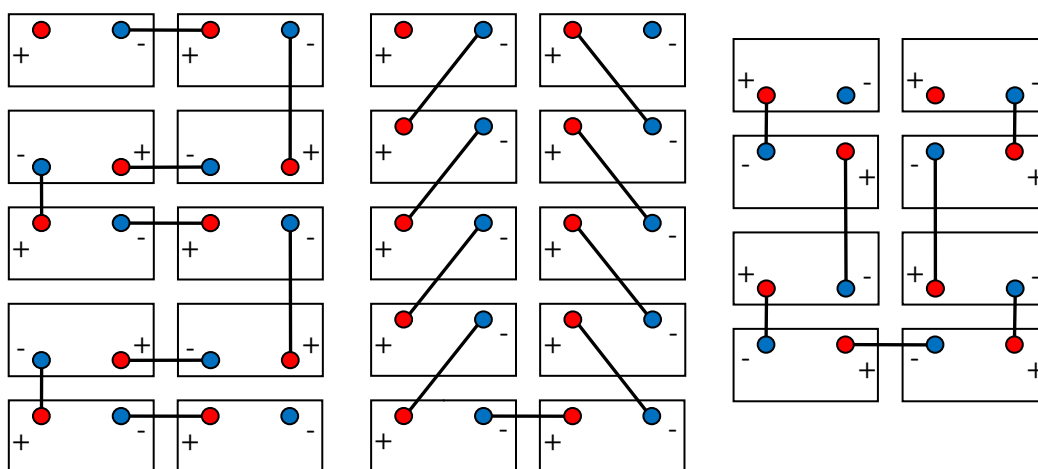
2.5 Spojování akumulátorů

Akumulátor je složen z jednotlivých článků, které jsou sériově zapojeny, a jejich počet je dán požadovaným výstupním napětím akumulátoru. Stejně tak spojením více akumulátorů vznikne tzv. akumulátorový blok pouze s tím rozdílem, že v akumulátorovém bloku mohou být akumulátory spojeny také paralelně.

Jestliže jsou akumulátory zapojeny sériově, má akumulátorový blok oproti jednomu akumulátoru výstupní napětí tolikrát větší, kolik akumulátorů je do série zapojeno. Celková kapacita takového packu zůstává nezměněna a odpovídá kapacitě jednoho akumulátoru. Pokud jsou akumulátory zapojeny paralelně, zvyšuje se kapacita packu tolikrát, kolik akumulátorů je paralelně zapojeno a výstupní napětí zůstává na úrovni jednoho akumulátoru. Třetí možností spojování akumulátorů je sériově-paralelní spojení akumulátorů. Akumulátorový blok má poté tolikrát vyšší výstupní napětí, kolik je akumulátorů zapojeno do série a kapacita je tolikrát vyšší, kolik akumulátorů je zapojeno paralelně. Tohoto zapojení je nejčastěji využíváno u staničních akumulátorových bloků.

(4)

Ukázka možností sériového spojování akumulátorů:



Obrázek 11. Zleva dvě varianty zapojení akumulátorového bloku pomocí deseti akumulátorů (používáno firmou Fulgur-Battman (5)). Vpravo varianta zapojení pomocí osmi akumulátorů (použito při realizaci této diplomové práce).

Při potřebě nabíjení takto vytvořených akumulátorových bloků vyvstává otázka, jakým způsobem docílit optimálního nabíjení u každého jednotlivého akumulátoru. Při paralelním zapojení malého počtu akumulátorů (několika kusů) můžeme do série s každým akumulátorem zapojit proudové omezení. Poté je celkový nabíjecí proud sumou proudů tekoucích jednotlivými větvemi (akumulátory). Dimenzování takového nabíječe, zejména při větší kapacitě akumulátorů (desítky Ah), velmi zvyšuje cenu zařízení a často je konstrukce nerealizovatelná. Proto se většinou volí sériové zapojení akumulátorů. Při sériovém zapojení je výstupní napětí nabíječe dáno sumou napětí všech akumulátorů v bloku a nabíjecí proud je dán dovoleným nabíjecím proudem jednoho akumulátoru. Při spojování akumulátorů je bezpodmínečně nutné dodržet to, aby akumulátory byly stejné, tedy aby měly stejnou kapacitu a jmenovité výstupní napětí. I při dodržení tohoto pravidla v praxi vyvstává problém zejména při sériovém spojování akumulátorů. Jelikož není prakticky možné vyrobit dva akumulátory, které budou mít naprosto shodné tyto parametry, zejména kapacitu, docházelo by k přebíjení a přílišnému vybíjení některých akumulátorů. Tím by postupem času docházelo k nesteromnému stárnutí akumulátorů (ztrátě kapacity) a tím by se tento nepříznivý jev dále prohluboval. To by v konečném důsledku mělo za následek snížení životnosti a neúplné nabíjení celého akumulátorového packu. V extrémních případech by mohlo dojít k destrukci některého z akumulátorů. Řešení tohoto problému spočívá v použití napěťových balančních jednotek.

2.5.1 Napěťové balanční jednotky

Vyrovňování a přerozdělování jsou techniky, které maximalizují kapacitu akumulátorového bloku, umožňují maximální využití energie nashromážděné v akumulátorech a prodlužují životnost akumulátorů. Jednotlivé akumulátory v bloku mají odlišnou kapacitu a také mohou být na různých úrovních nabití. Bez přerozdělování se vybíjení zastaví, když je akumulátor s nejnižší kapacitou vybitý

(i když ostatní akumulátory ještě vybity nejsou), což omezuje energii, která může být z akumulátorového packu vydána nebo přijata. Bez vyrovnávání je akumulátor s nejnižší kapacitou tzv. „slabým místem“ a může být snadno přebíjen nebo příliš vybit, zatím co akumulátory s vyšší kapacitou projdou cyklem pouze částečně. Balanční jednotka tedy chrání „slabší“ akumulátory tak, aby mohly být akumulátory s větší kapacitou plně nabity nebo vybity bez toho, aby docházelo k přebíjení/podbíjení akumulátorů s nižší kapacitou. Balancování (vyvažování) se provádí tím, že je přenášena energie z nebo na jednotlivé akumulátory, dokud stav nabití akumulátorů s nejnižší kapacitou není shodný se všemi akumulátory v bloku. *Přeloženo z (6).*

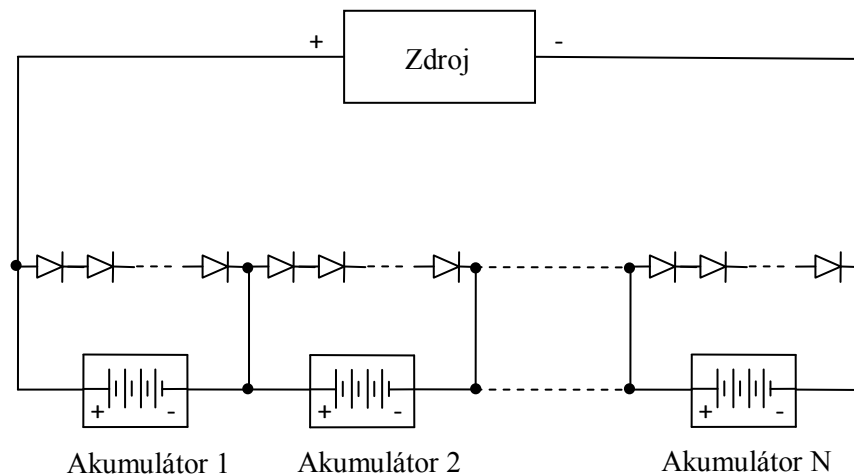
Rozdělení balančních jednotek

- Pasivní – jejich princip je založen na převedení nabíjecího proudu do balanční jednotky, tím je nabíjení ukončeno nebo omezeno, protože akumulátorem neprotéká nabíjecí proud. V podstatě se ale nejedná o balanční jednotku, ale jen o omezovač napětí. Pojmenování balanční jednotka tedy není zcela správné. Nevýhodou je velmi nízká účinnost. Nadbytečná energie je vyzářena ve formě tepla do okolí. Například při nabíjení packu složeného z deseti akumulátorů by těsně před ukončením nabíjení bylo 90% energie dodávané z nabíječe mařeno ve formě tepla. To klade velký důraz na dimenzování balančních jednotek. Výhodou je však jednoduché zapojení a aplikace těchto balančních jednotek.
- Aktivní – aktivní balanční jednotka odpojí nabitý článek od zdroje a tím zamezí dalšímu odebírání energie. (2)

Příklady zapojení

- Pasivní napěťová balanční jednotka s diodami v propustném směru

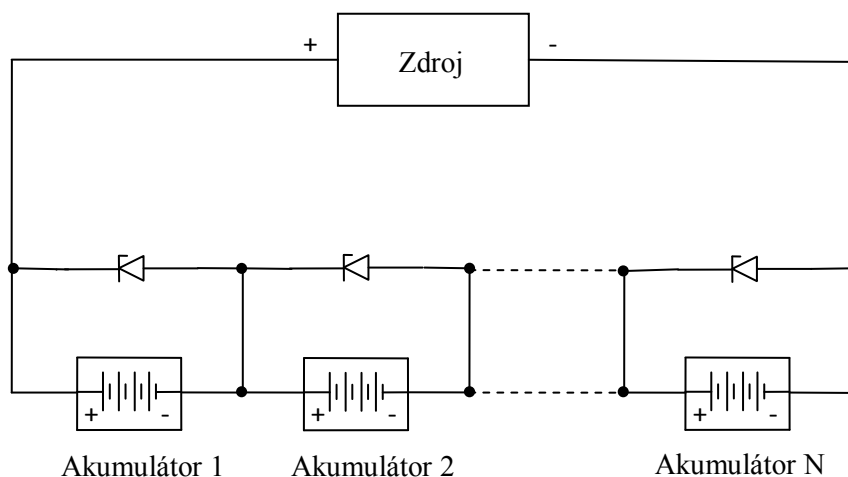
Napětí jednotlivých akumulátorů v bloku je určeno přechodovým napětím diod, tedy počet diod je nutno zvolit tak, aby součet jejich přechodových napětí byl pokud možno stejný jako maximální nabíjecí napětí akumulátoru. Během nabíjení se zvyšuje napětí jednotlivých akumulátorů a postupně tak dochází ke „spínání“ diod. V okamžiku, kdy napětí akumulátoru dosáhne součtu přechodových napětí diod paralelně připojených k akumulátoru, dojde k „sepnutí“ všech diod a nabíjecí proud začne protékat těmito diodami. Jedná se o velmi levné a jednoduché řešení. (2)



Obrázek 12. Pasivní napěťová balanční jednotka s diodami v propustném směru (2)

- Pasivní napěťová balanční jednotka se zenerovými diodami

Během nabíjení se zvyšuje napětí akumulátorů, dokud není shodné se zenerovým napětím paralelně připojené zenerovy diody. Dioda po svém otevření převede proud na sebe. Pokud by hodnota proudu byla příliš vysoká je nutno použít více diod zapojených paralelně. Problém je ovšem s rozptylem Zenerova napětí. Nemusí dojít k rovnoměrnému rozdělení proudů tekoucích diodami a to může způsobit jejich poškození. (2)

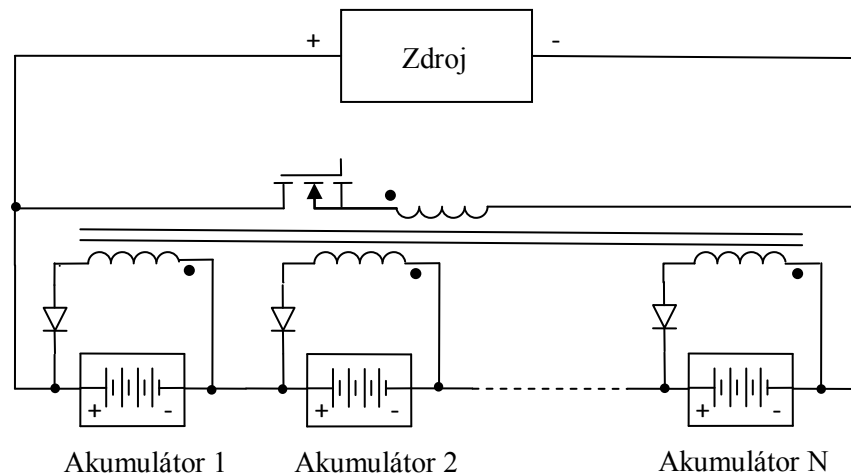


Obrázek 13. Pasivní napěťová balanční jednotka se zenerovými diodami (2)

- Aktivní napěťová balanční jednotka s blokujícím měničem

U této aktivní balanční jednotky, jak je z jeho názvu patrné, nedochází k přeměně přebytečné energie na teplo. Je použit transformátor, který má jedno vinutí primární a počet sekundárních vinutí je roven počtu akumulátorů v bloku. Spínač je v každém z cyklů sepnut a vypnut. Z každého

akumulátoru je odebrán stejný náboj, ale dodaný náboj je závislý na stupni jeho nabití (napětí akumulátoru). U plně nabitého akumulátoru již tedy dál neprobíhá nabíjení. Nevýhodou tohoto způsobu balancování je složitá a nákladná konstrukce. (2)



Obrázek 14. Aktivní napěťový balancer s blokujícím měničem (2)

3. Měníče napětí

3.1 Obecný popis měničů

Měníče napětí slouží k přeměně elektrické energie jednoho druhu nebo velikosti na energii jiného druhu nebo jiné velikosti. Tedy konkrétněji energii střídavou na energii stejnosměrnou a naopak. Následující rozbor bude zaměřen pouze na měniče tzv. napěťového typu. Měníče napěťového typu jsou takové, které jsou napájeny ze zdroje konstantního napětí, nikoliv konstantního proudu.

Základní způsoby rozdělení měničů podle komutace:

- a) s vnější komutací
- b) s vnitřní komutací

Rozdělení měničů podle funkce:

- a) usměrňovač
- b) střídač
- c) střídavý měnič
 - napětí
 - kmitočtu
 - počtu fází
 - impedance

- d) stejnosměrný měnič
 - napětí
 - odporu
- e) stejnosměrný spínač
- f) střídavý spínač

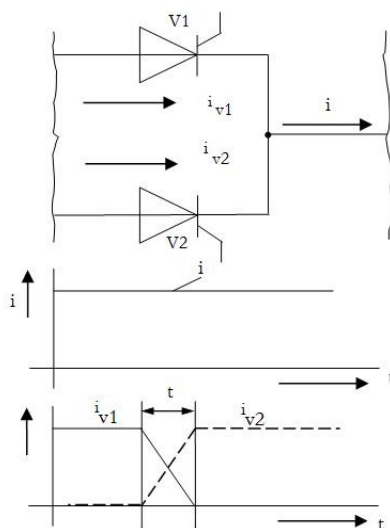
Dále se měniče rozdělují podle řízení toku energie

- a) neřízené (nelze řídit parametry výstupní elektrické energie)
- b) řízené (lze řídit parametry výstupní elektrické energie)

Pojem komutace

Komutace je elektromagnetický děj odehrávající se v obvodu měniče a je charakterizovaný přechodem proudu mezi dvěma větvemi měniče bez přerušení proudu odtékajícího z (nebo přitékajícího do) uzlu větví měniče.

Komutace měniče nemůže být zaměňována za komutaci polovodičové součástky. Ke komutaci standardně dochází při sepnutí polovodičové součástky v jedné z komutujících větví. Komutační napětí, které působí na obě větve, umožňuje sepnutí a nárůst proudu v jedné větvi a naopak pokles proudu a vypnutí polovodičové součástky ve větvi druhé. (7)



Obrázek 15. Komutace (7)

Vnější komutace

Zdroj komutačního napětí je umístěn mimo měnič. Původ komutačního napětí je určován termíny jako síťová komutace, nebo také zátěžová komutace. V praxi se často vyskytuje dříve používaný pojem přirozená komutace.

Vlastní komutace

Zdroj komutačního napětí je umístěn v obvodu měniče. V praxi se můžeme setkat s dříve používaným termínem nucená komutace.

Přímá komutace

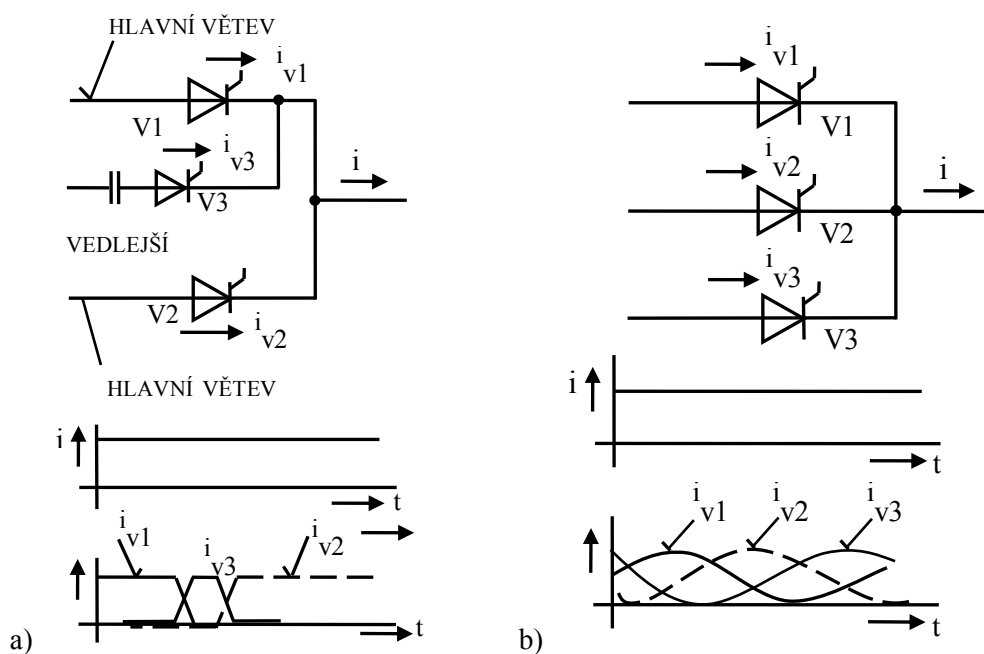
Probíhá přímo mezi dvěma větvemi v jednom taktu komutace. Tuto komutaci lze označit také jako jednostupňovou. Tuto situaci znázorňuje obrázek 15.

Nepřímá komutace

Probíhá ve dvou taktech. V prvním komutačním taktu komutuje proud z hlavní větve na vedlejší větev a až teprve v dalším taktu z větve vedlejší na druhou hlavní větev. Tato komutace je tzv. dvoustupňová nebo i vícešupňová.

Vícenásobná komutace

Při vícenásobné komutaci, na rozdíl od předchozích, dochází k současné komutaci více než dvou větví. (7)

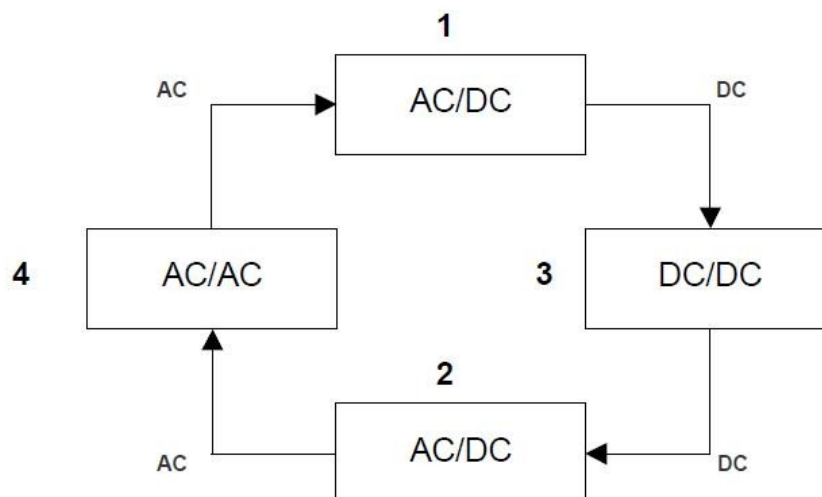


Obrázek 16 a) Dvoustupňová nepřímá komutace, b) dvojnásobná komutace (7)

3.2 Popis funkce jednotlivých měničů

Měniče výkonové elektroniky zpravidla třídíme podle jejich funkce do čtyř dále uvedených základních skupin. Vzájemné vztahy mezi skupinami měničů vyjadřuje obr. 17.

1. **Usměrňovače** (rectifier), označované jako AC/DC měniče mění střídavé vstupní napětí a proud na výstupní stejnosměrné napětí a proud. Nejpoužívanější měniče výkonové elektroniky jsou právě usměrňovače.
2. **Střídače** (invertor), označované jako DC/AC měniče mění stejnosměrné vstupní napětí a proud na střídavé výstupní napětí, proud, kmitočet a počet fází. Na jejich výstup je připojen buď střídavý asynchronní nebo synchronní motor či síťový nízkofrekvenční transformátor. Obvykle pracují v režimu sinusové pulsní šířkové modulace s nosným kmitočtem od 1 do 40 kHz.
3. **Stejnoseměrné měniče** (DC to DC) označované jako DC/DC měniče mění stejnosměrné vstupní napětí a proud na výstupní stejnosměrné napětí a proud jiné velikosti. Stejnoseměrné měniče slouží jako napáječe jiných elektronických zařízení. Na výstup DC/DC měničů je zpravidla zapojen výstupní LC filtr ve tvaru dolní propusti (z důvodu vyhlazení výstupního napětí). Stejnoseměrné měniče pracují v režimu pulsně šířkové modulace PWM (Pulse With Modulation), s nosným kmitočtem od 2 do 600 kHz.
4. **Střídavé měniče** (AC to AC) označované AC/AC měniče cyklokonvertory. Střídavé měniče mění výstupní napětí, proud, počet fází a kmitočet na výstupní střídavou energii stejnosměrným meziobvodem napět'ovým nebo proudovým, typu AC/DC/AC. Název vystihuje skutečnost, že mezilehlý obvod se nachází mezi pulzním DC/AC měničem a výstupním usměrňovačem AC/DC. Stejnoseměrný meziobvod obsahuje filtrační člen, který od sebe impedančně odděluje oba dílčí měniče – AC/DC a DC/AC. Z funkčního hlediska se jedná o obvod typu AC/AC. Vstupní střídavé napětí je usměrněno a následně střídačem DC/AC transformováno opět na střídavé napětí jiných parametrů. (8)



Obrázek 17. Vztahy mezi různými typy měničů (8)

3.3 Usměrňovače

Usměrňovače s vnější komutací

Běžné neřízené usměrňovače jsou měniče s vnější komutací a jsou nejdéle používaným druhem měničů. Praktické využití usměrňovačů je velmi rozmanité. Jsou používány, jako zdroje při elektrochemických procesech (výstupní napětí v desítkách voltů a proud ve stovkách kA), při svařování, pro regulované pohony s výkony až několik MW, pro trakční měnirny a napájení dálkových stejnosměrných vedení atd. Usměrňovače jsou napájeny střídavým napětím zpravidla z rozvodné elektrické sítě. (7)

Usměrněné napětí

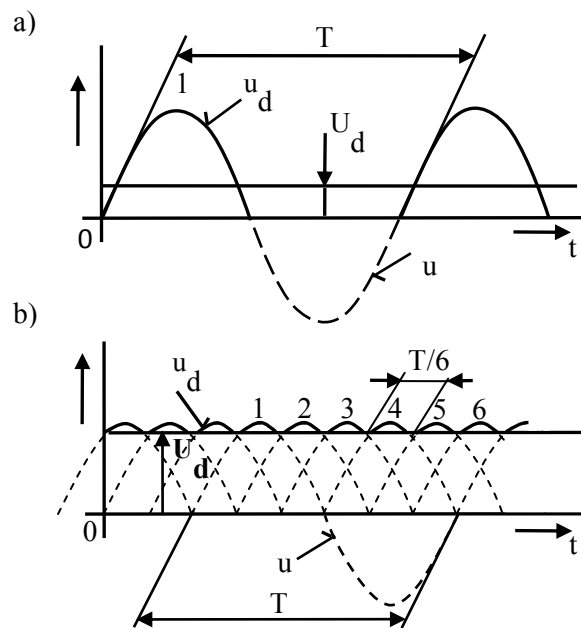
Okamžitá hodnota výstupního usměrněného napětí je označována u_d . V průběhu u_d se projevuje superponovaná střídavá složka, ta je superponovaná na střední hodnotu usměrněného napětí U_d . Tento jev vyplývá z principu usměrňování. Ze střídavého napájecího napětí usměrňovač vybírá jen část jeho křivky, tak aby napětí na zátěži bylo stejnosměrné. Například při jednofázovém střídavém napětí vybírá jen kladné půlvlny. Při usměrnění vícefázového napětí má usměrněné napětí lepší průběh (menší zvlnění). Střední hodnotu usměrněného napětí U_d lze snižovat z maximální hodnoty pomocí řízení. Při použití běžného způsobu řízení se však zvětšuje efektivní hodnota střídavé složky usměrněného napětí. Frekvence 1. harmonické střídavé složky je zachována. Průběh usměrněného napětí charakterizován (podle frekvence pulzace) poměrem. (7)

$$p = \frac{f_\sigma}{f} \quad (3.1)$$

f_σ je frekvence 1. harmonické střídavé složky u_d ,

f je frekvence napájecího (síťového) napětí

Hodnota p je nazývána těmito termíny p -pulsní průběh usměrněného napětí nebo p -pulsní usměrňovač. V praxi jsou používány usměrňovače s hodnotou p v rozmezí 1 až 24.



Obrázek 18. Usměrněné napětí (7)

a) jednopulsního usměrňovače, b) šestipulsního usměrňovače

Usměrněný proud

Okamžitá hodnota výstupního usměrněného proudu je nazývána i_d . Průběh i_d je dán průběhem u_d a typem zátěže.

Neřízené usměrňovače v uzlovém zapojení

Neřízené usměrňovače jsou sestaveny z diod a jejich prostřednictvím není možné řídit napětí na jejich zátěži. Napájecí zdroje u_1 , u_2 , u_3 znázorněné na obrázku 19 poskytují fázová napětí daná vztahy:

$$u_1 = U_m \cdot \sin \omega t \quad (3.2)$$

$$u_2 = U_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (3.3)$$

$$u_3 = U_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \quad (3.3)$$

U_m amplituda fázového napětí

ω úhlový kmitočet nap. Napětí

Obecně napětí n -té fáze m -fázového zdroje popisuje rovnice níže.

$$u_n = U_m \cdot \sin \left[\omega t - (n - 1) \cdot \frac{2\pi}{m} \right] \quad (3.4)$$

Ve schématu jsou fázová napětí a proudy orientovány tak, že obě tyto veličiny vychází kladné, pokud příslušné fáze působí jako zdroje. Orientace usměrňovaného napětí a proudu jsou voleny kladně, pokud se zátěž chová jako spotřebič. Zátěž je obecná R , L , U_i . U usměrňovačů, tedy především záleží na průbězích napájecích napětí. V tomto případě bude použit předpoklad nepřerušovaných proudů tekoucích zátěží. Na obrázku 18 jsou naznačeny průběhy fázových napětí (elektrické sítě). Nejprve sledujeme, která dioda je v intervalu $x_1 < x < x_2$ sepnutá. Předpokládáme-li, že je sepnuta dioda D2, je na této diodě napětí $u_{D2}=0V$. Pro obvod, který je tvořen větvemi diod D1 a D2 podle Kirchhoffova zákona platí:

$$u_1 - u_2 - u_{D1} = 0 \quad \rightarrow \quad u_{D1} = u_1 - u_2$$

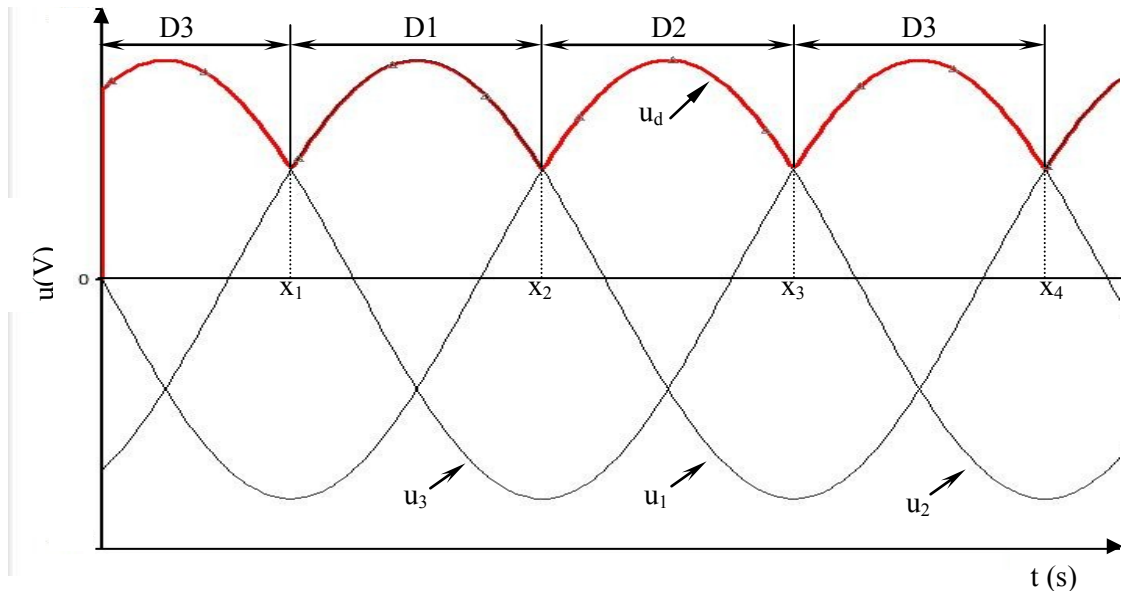
Pokud přihlédneme k okamžitým hodnotám napětí u_1, u_2, u_3 vychází pak $u_{D1} > 0$, to však odporuje vlastnostem diody. Původní předpoklad se tedy může zdát chybný, protože vede ke sporu. Podobný spor vyvolává také předpoklad, že je dioda D3 sepnuta ve sledovaném intervalu. Pokud je totiž sepnutá dioda D1 je napětí $u_{D1}=0$. Podle Kirchhoffova zákona je napětí větvi D1 a D2

$$u_{D1} = u_2 - u_1 < 0 \quad (3.5)$$

A pro větve D1 a D3 platí:

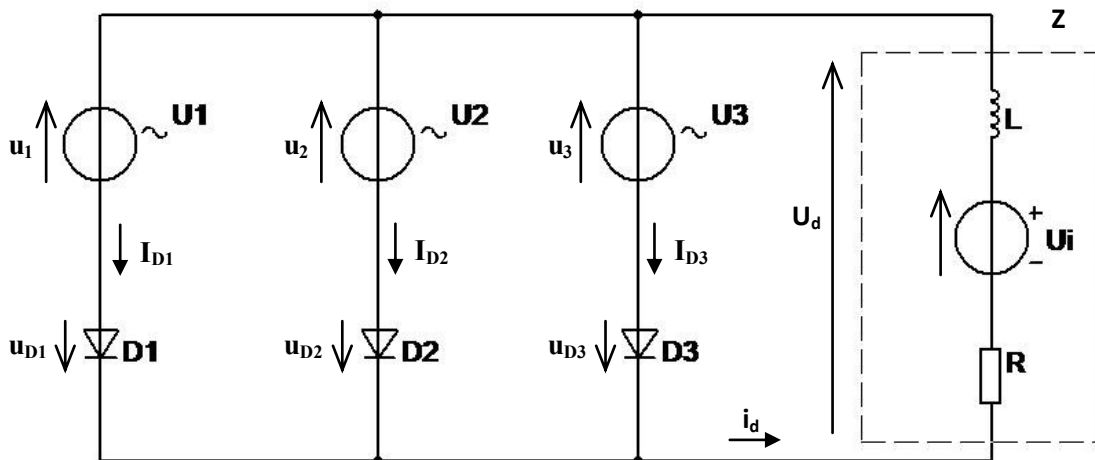
$$u_{D3} = u_3 - u_1 < 0 \quad (3.6)$$

Tyto výsledky jsou ale reálné, protože na vypnutých D2, D3 jsou závěrná napětí. Stejně tak lze prokázat v intervalech (x_2, x_3) a (x_3, x_4) propustný stav diod D2 a D3. Následně lze podle obrázku 19 přijmout pravidlo, že je sepnutá vždy ta dioda, která je připojena k fázovému napětí o nejvyšší okamžité hodnotě. (7)



Obrázek 19. Průběhy napětí třífázového uzlového usměrňovače

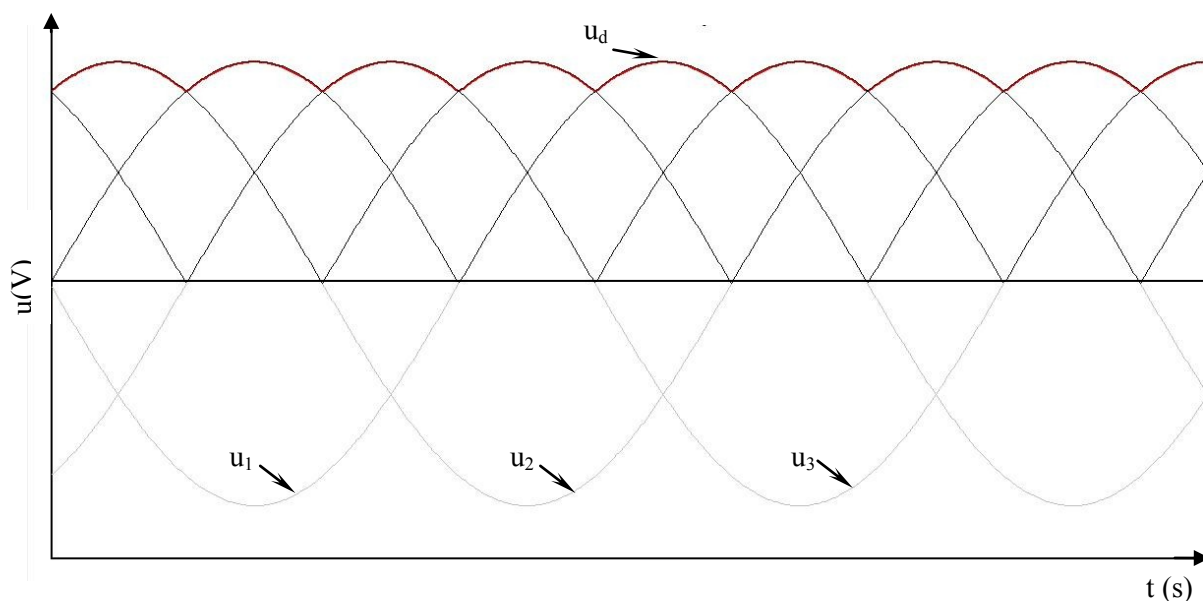
Během trvání každého z intervalů (x_1, x_2) , (x_2, x_3) , (x_3, x_4) atd. se nemění stav žádné diody v propustném nebo závěrném stavu (tedy ve větvích měniče nedochází ke změnám vodivosti), proto je možné tyto intervaly označit za jednotlivé takty chodu usměrňovače. Na obrázku 19 jsou takty pojmenovány stejně jako příslušné sepnuté diody. Na diodě, která je sepnutá, je napětí vždy nulové a na diodě, která je vypnutá, je závěrné napětí shodné se sdruženým napětím. Toto sdružené napětí je rovno rozdílu napětí fáze, ke které je dioda připojena a fázového napětí fáze, ke které je připojena dioda sepnutá. Průběh usměrněného napětí na zátěži je na obrázku 19 zvýrazněn červenou barvou a vychází z faktu, že napětí na zátěži je během každého taktu rovno té fázi, v jejíž větvi je právě sepnuta dioda. Průběh usměrněného napětí u_d lze podle obrázku 19 označit za trojpulsní a tím i usměrňovač ve třífázovém uzlovém zapojení za trojpulsní usměrňovač. Obecně tedy pro uzlová zapojení platí $p = m$. (7)



Obrázek 20. Uzlový třífázový usměrňovač (7)

Neřízené usměrňovače v můstkovém zapojení

U usměrňovače v můstkovém zapojení se jedná v podstatě o dva uzlové usměrňovače spojené do série. Tato můstková spojení mohou být m -fázová v praxi jsou však využívány převážně jednofázová a trojfázová. Z obrázku 21 je patrné, že na rozdíl od uzlových usměrňovačů proud prochází jednotlivými fázemi obousměrně. U usměrňovače na obrázku 21 prochází fází, která je připojena k napětí u_1 , proud. Tento proud prochází diodou připojenou anodou k této fázi. Když se polarita napětí u_1 změní a proud protéká opačným směrem, tak již protéká diodou, která je k tomuto napětí připojena katodou. Název můstkové zapojení je odvozen právě z této vlastnosti, protože připomíná obousměrný provoz na mostě. Hlavní výhodou můstkového zapojení ve srovnání s uzlovým zapojením je výrazně menší pulzace usměrňovaného napětí u_d . Rozdíl je patrný z obrázků 19 a 21. (7)



Obrázek 21. Průběhy napětí třífázového můstkového usměrňovače

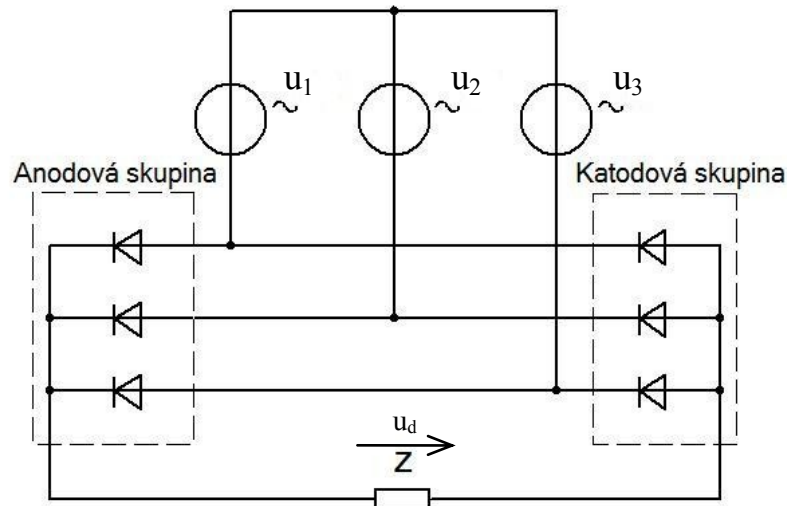
Skupina polovodičových součástek v hlavní větvi měniče, která cyklicky komutuje nezávisle na jiných, se nazývá komutační skupina. Každý z uzlových usměrňovačů, ze kterých je složen můstkový usměrňovač, tvoří jednu komutační skupinu. Uzlový usměrňovač, jehož diody jsou ke střídavému napětí připojeny svými anodami, tvoří anodovou komutační skupinu. Tudiž uzlový usměrňovač, jehož diody jsou ke střídavému napětí připojeny svými katodami, tvoří katodovou komutační skupinu. (7)

Střední hodnota usměrněného napětí naprázdno:

$$U_d = \frac{6}{2\pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} \sqrt{2} \cdot U_s \cdot \sin(\theta) d(\theta) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_s = 1,35 \cdot U_s = 2,34 \cdot U_f \quad (3.7)$$

U_s efektivní hodnota sdruženého napájecího napětí

U_f efektivní hodnota fázového napájecího napětí



Obrázek 22. Můstkový třífázový usměrňovač (7)

Proud odebraný usměrňovačem z napájecí sítě není harmonický, obsahuje větší množství harmonických složek. Tyto složky negativně působí na napájecí síť a snižují kvalitu napájecího napětí. Tvar proudu závisí na parametrech zátěže.

3.4 Pulsní měniče

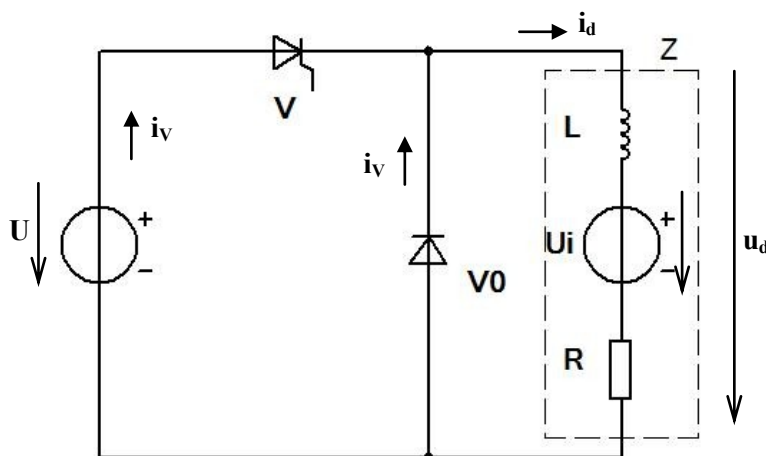
Nebo také stejnosměrné měniče se používají k těmto účelům:

- snižování napětí
- zvyšování napětí
- snižování i zvyšování napětí
- řízení odporu

Ke všem těmto funkcím je v měniči používán polovodičový prvek (spínač), který je periodicky spínán. Však pro úplnost je nutné dodat, že existuje i jiná koncepce stejnosměrného měniče napětí. Princip tohoto řešení spočívá v rozstředění stejnosměrného vstupního napětí, toto napětí je poté znovu usměrněno řízeným usměrňovačem. V porovnání s pulsními měniči je toto řešení finančně náročnější, proto se příliš nepoužívá. V této diplomové práci není tento způsob realizace použit, a proto mu již nebude věnována další pozornost. (9)

Snižování napětí

Snižující měnič je tvořen spínačem V a nulovou diodou V_0 . Zapojení uvedené na obrázku 23 slouží ke snížení (řízení) napětí na zátěži na menší hodnotu než má napětí napájecího zdroje. Zátěž je ve schématu na obrázku 23 označena písmenem Z . Tato zátěž je uvažována jako obecná R, L, U_i . Základním předpokladem funkčnosti je $U_i < U$. (9)



Obrázek 23. Pulsní měnič pro snižování napětí (9)

Při sepnutí V (např. tyristor, IGBT, MOSFET) je napětí na zátěži $u_d = U$. Proud tekoucí zátěží protéká přes spínač V ($i_d = i_v$). Křivka proudu je tvořena částí exponenciály, která narůstá k hodnotě $(U - U_i)/R$. Pokud nestačí proud i_d klesnout k nule během intervalu vypnutí, je nepřerušovaný. Tato situace je zobrazena na obrázku 24. Během intervalu vypnutí je napětí na zátěži $u_d = 0V$. Podle průběhu u_d na obrázku 24 je odvozen vztah pro střední hodnotu napětí na zátěži pro režim nepřerušovaného proudu. (9)

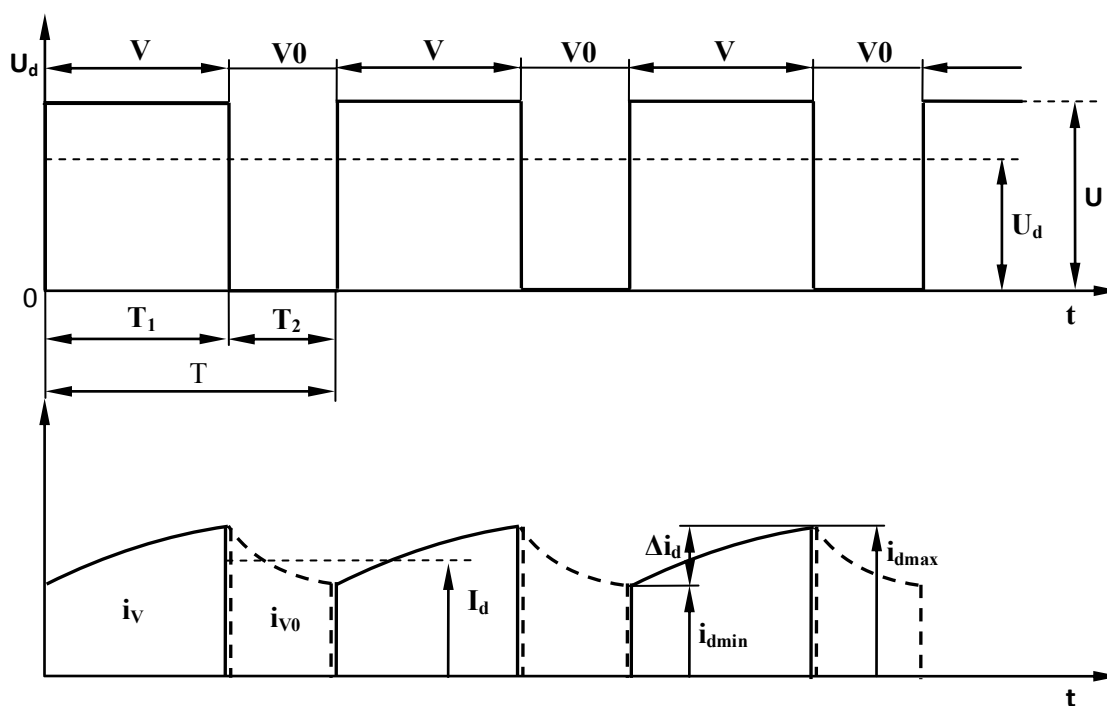
$$U_{di} = \frac{T_1}{T} \cdot U = zU \quad (3.8)$$

z poměrná doba zapnutí (střída)

T_1 doba sepnutí spínače V

T perioda spínání

Index i rozlišuje ideální střední hodnotu od hodnot U_d , které jsou dále určovány s menší idealizací, nebo pro režim přerušovaného proudu. Poměrná doba zapnutí z , je řízena signálem vystupujícím z bloku řízení. Tento signál je připojen na řídicí vstup spínače V. Rozsah z lze řídit v rozmezí $0 \leq z \leq 1$. Tomu odpovídá regulační rozsah napětí $0 \leq U_d \leq U$. Reálný rozsah řízení je ale menší. (9)



Obrázek 24. Průběhy napětí a proudu snižujícího měniče (spojitý proud) (9)

Ze schématu na obrázku 23 lze určit střední hodnotu proudu tekoucího zátěží v ustáleném stavu. Pokud si uvědomíme, že střední hodnota napětí na indukčnosti L je v ustáleném stavu nulová, pak je střední hodnota proudu zátěže rovna:

$$I_d = \frac{U_{di} - U_i}{R} \quad (3.9)$$

Snižujícím měničem, jehož schéma je na obrázku 23 je možné přenášet výkon jen ze zdroje (U) do zátěže (Z). Zátěž přijímá energii ze zdroje, když je V sepnut. Část této energie se akumuluje v L, část je přijata zdrojem U_i a část je mařena na R. Po vypnutí V se energie nahromaděna během předchozího intervalu na L uvolňuje. Částečně tuto energii přijímá U_i a zbývající se ztrácí na R.

V režimu přerušovaného proudu je průběh napětí zátěže odlišný než v režimu nepřerušovaného proudu na obrázku 24. Průběh napětí v režimu přerušovaného proudu je zobrazen na obrázku 25 a střední hodnota tohoto napětí je dána rovnicí (9)

$$U_d = \frac{1}{T} [UT_1 + U_i(T - t_k)] \quad (3.10)$$

Analýza proudu v přerušovaném a nepřerušovaném režimu

Přerušovaný proud

Následující rozbor popisuje měnič zapojený podle schématu na obrázku 23. Po sepnutí spínače V přes něj protéká proud i_d a v obvodu zátěže platí rovnice

$$Ri_d + L \frac{di_d}{dt} + U_i = U \quad (3.11)$$

Řešením získáme

$$i_d = \left[\frac{U - U_i}{R} - i_d(0) \right] \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + i_d(0) \quad (3.12)$$

proud $i_d(0)$ je na začátku ($t=0$) sepnutí spínače V. Časovou konstantu zátěže vyjadřuje τ .

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (3.13)$$

Po vypnutí V se proud i_d začne uzavírat přes V_0 a v obvodu zátěže platí vztah

$$Ri_d + L \frac{di_d}{dt} + U_i = 0 \quad (3.14)$$

vyřešením získáme vztah

$$i_d = i_d(T_1) - \left[\frac{U_i}{R} + i_d(T_1) \right] \cdot \left(1 - e^{-\frac{t-T_1}{\tau}} \right) \quad (3.15)$$

$i_d(T_1)$ proud ve chvíli vypnutí (v čase $t=T_1$)

Pokud je $U_i=0$ proud i_d může být pouze nepřerušovaný. Jestliže je $U_i>0$, může být i_d přerušovaný i nepřerušovaný. Při provozu v režimu přerušovaného proudu nelze použít dvouhodnotové řízení. Princip tohoto řízení je vysvětlen dále v textu.

Přerušovaný proud

Proud začíná narůstat z nulové hodnoty během každého sepnutí V. Na nulovou hodnotu opět klesá po vypnutí V, před jeho dalším sepnutím. Pokud je V sepnuty a platí-li $i_d(0)=0$ je proud i_d dán vztahem.

$$i_d = \frac{U-U_i}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (3.16)$$

Ve chvíli vypnutí ($t=T_1$) je pak dán vztahem

$$i_d(T_1) = \frac{U-U_i}{R} \left(1 - e^{-\frac{T_1}{\tau}}\right) \quad (3.17)$$

Během taktu V_0 , což je interval vypnutí platí vztah (3.15). Po dosazení do tohoto vztahu podle (3.17), získáme

$$i_d = \frac{1}{R} \left(U e^{\frac{T_1}{\tau}} - U + U_i \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} - \frac{U_i}{R} \quad (3.18)$$

Okamžik, ve kterém i_d klesne k nule (konec proudového impulsu) označíme t_k . Po dosazení hodnot $i_d=0$ a $t=t_k$ do rovnice (3.18) můžeme vyjádřit velikost t_k .

$$0 = \frac{1}{R} \left(U e^{\frac{T_1}{\tau}} - U + U_i \right) \cdot e^{-\frac{t_k}{\tau}} - \frac{U_i}{R} \quad (3.19)$$

$$t_k = \tau \log \left[\frac{U}{U_i} \left(e^{\frac{T_1}{\tau}} - 1 \right) + 1 \right] \quad (3.20)$$

Výsledek rovnice (3.20) je platný jen v oblasti $T_1 < t_k < T$. Pokud vychází $t_k \geq T$, proud není přerušovaný. Střední hodnotu tohoto proudu určíme ze vztahu (3.16), kde místo U_{di} dosadíme U_d podle (3.9).

Pro dané hodnoty τ , T_1 , T_2 , U je možné z rovnice (3.18) při mezním nepřerušovaném proudu určit $U_i=U_{ip}$. Pokud zde dosadíme $t_k=T$ a $U_i=U_{ip}$ a vyjádříme U_{ip} získáme

$$U_{ip} = U \cdot \frac{e^{\frac{T_1}{\tau}} - 1}{e^{\frac{T}{\tau}} - 1} \quad (3.21)$$

Střední hodnotu mezního nepřerušovaného proudu lze určit s využitím vztahů (3.8) a (3.9), když dosadíme U_{ip} za U_i podle (3.21)

$$I_{dp} = \frac{U}{R} \cdot \left(\frac{T_1}{T} - \frac{e^{\frac{T_1}{\tau}} - 1}{e^{\frac{T}{\tau}} - 1} \right) \quad (3.22)$$

Nepřerušovaný proud

V taktu V je určen vztahem (3.12) a během taktu V_0 vztahem (3.15). V těchto vztazích chybí určit $i_d(0)$ a $i_d(T_1)$. Tyto určíme při předpokladu ustáleného stavu. V ustáleném stavu má proud tvar vyobrazený na obrázku 25. Hodnota i_{dM} je shodná s hodnotou $i_d(T_1)$ a hodnota i_{dMIN} je shodná s hodnotou $i_d(0)$. Dle vztahu (3.12) musí platit

$$i_d(T_1) = \left[\frac{U-U_i}{R} - i_d(0) \right] \left(1 - e^{-\frac{T_1}{\tau}} \right) + i_d(0) \quad (3.23)$$

stejně tak je $i_d(T)$ podle rovnice (3.15)

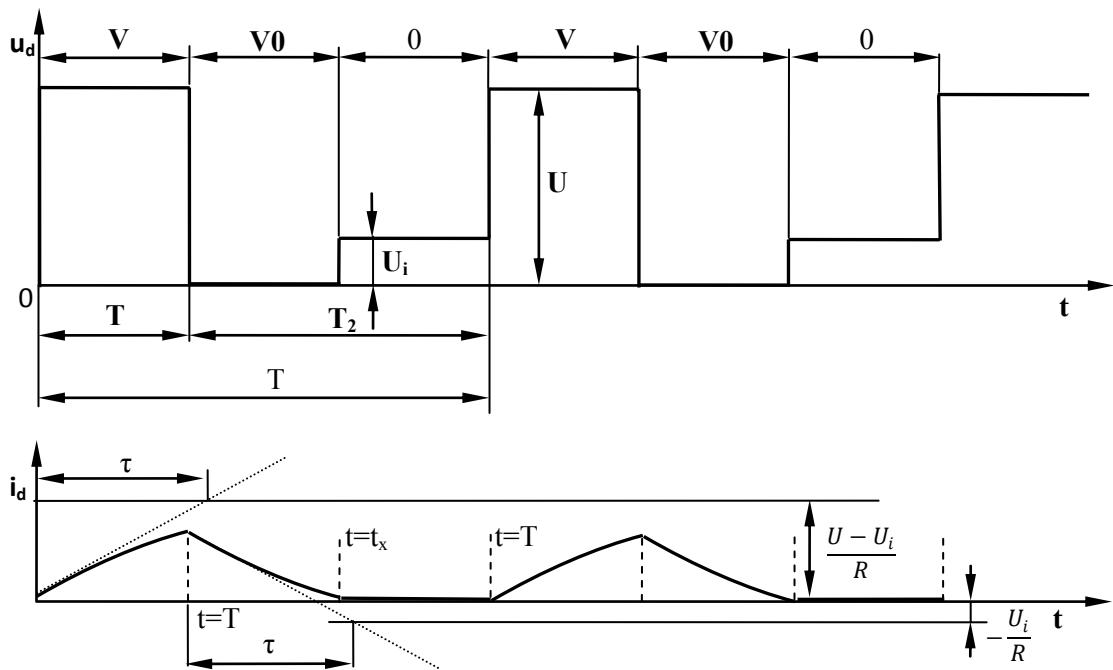
$$i_d(T) = i_d(T_1) - \left[\frac{U_i}{U} + i_d(T_1) \right] \cdot \left(1 - e^{-\frac{T_2}{\tau}} \right) \quad (3.24)$$

Pokud dosadíme za $i_d(T_1)$ do rovnice (3.24) podle (3.23) a uvědomíme-li si, že v ustáleném stavu platí $i_d(0)=i_d(T)$, je možné vyjádřit hodnotu $i_d(0)$.

$$i_d(0) = i_{dMIN} = \frac{U \cdot \left(1 - e^{-\frac{T_1}{\tau}} \right)}{R \cdot \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}} \right)} \cdot e^{-\frac{T_2}{\tau}} - \frac{U_i}{R} \quad (3.25)$$

Zbývající hledanou hodnotu získáme dosazením do vztahu (3.23) dle (3.25). (9)

$$i_d(T_1) = i_{dM} = \frac{U \cdot \left(1 - e^{-\frac{T_1}{\tau}} \right)}{R \cdot \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}} \right)} - \frac{U_i}{R} \quad (3.26)$$



Obrázek 25. Průběh napětí a proudu snižujícího měniče (přerušovaný proud)(9)

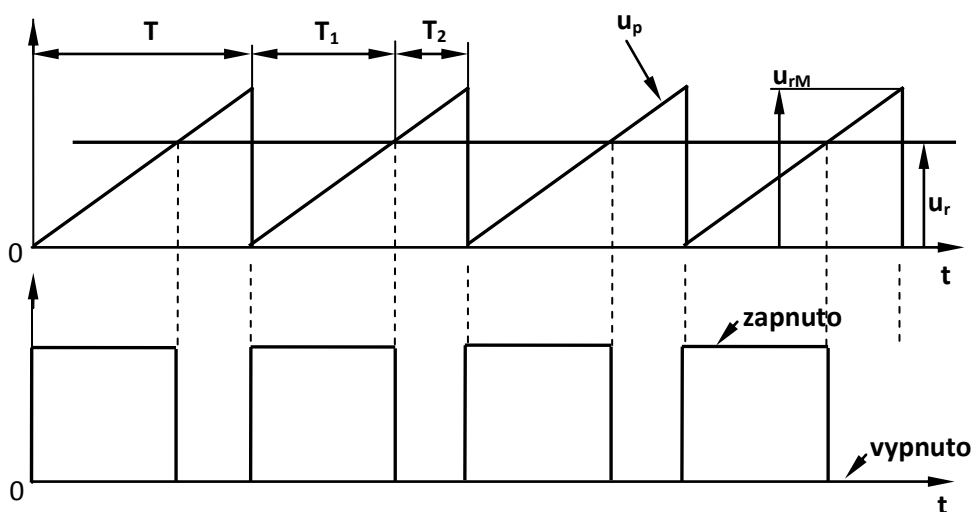
3.5 Řízení pulsních měničů

Z předchozí kapitoly vyplývá, že měniče jsou řízeny pomocí z (poměrná doba sepnutí spínače V). Řízení z je prováděno různými způsoby. Dále v textu budou popsány jen způsoby řízení, které jsou použity při realizaci této diplomové práce.

Způsoby řízení:

- Řízení s konstantním spínacím kmitočtem
- Dvouhodnotové řízení
- Řízení s konstantní dobou sepnutí

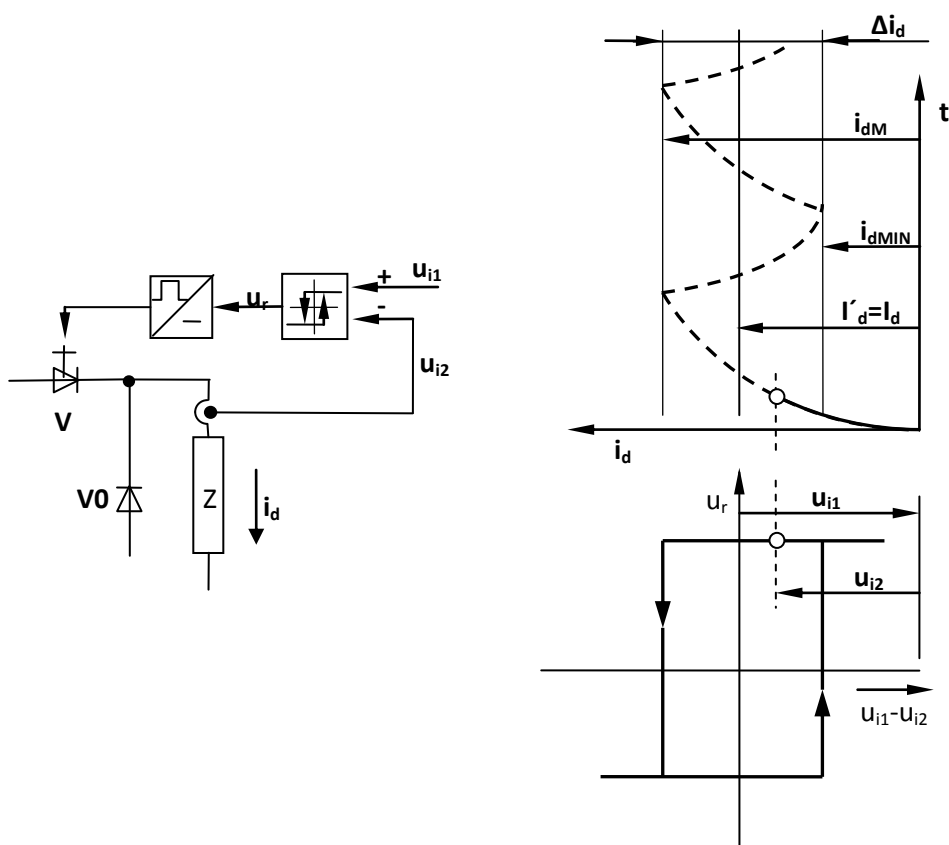
Řízení s konstantním spínacím kmitočtem je prováděno řízením $z=T_1/T$ při neměnné frekvenci spínání $f=1/T$. Princip řízení je znázorněn na obrázku 26. Řídící obvod obsahuje generátor pilovitého napětí, který má konstantní frekvenci f . Při poklesu pilovitého napětí k nule je zapnut spínač V. Do řídicího obvodu vstupuje řídicí napětí u_r . Toto napětí je porovnáváno s pilovitým napětím a v okamžiku rovnosti rostoucího pilovitého napětí a napětí u_r je provedeno vypnutí spínače V. Z tohoto vyplývá, že pokud se změní u_r změní se i z . Tento způsob řízení lze řešit analogově (porovnávání napětí pomocí komparátoru), a také číslicově (pomocí mikroprocesorové techniky). (9)



Obrázek 26. Princip řízení s konstantním kmitočtem(9)

Dvouhodnotové řízení funguje tak, že se udržuje konstantní hodnota Δi_d označena na obrázku 24. Do řídicího obvodu vstupuje signál, který je úměrný hodnotě žádaného proudu $I'_d = \frac{(i_{dM} + i_{dMIN})}{2} = I_d$. Pomocí zpětné vazby se docílí toho, že pokud reálná hodnota proudu zátěže dosáhne stavu $I'_d + \Delta i_d/2$, spínač V je vypnut a proud klesá. Jakmile hodnota proudu klesne na $I'_d - \Delta i_d/2$, spínač V je opět sepnut a proud narůstá. Pokud je udržována konstantní hodnota Δi_d a parametry zátěže se mění, mění se také f a z . Princip tohoto řízení je znázorněn na obrázku 27. Důležitým prvkem řízení je

klopný obvod, který má vstupní necitlivost. Tato necitlivost je úměrná hodnotě Δi_d . Tento klopný obvod je možno realizovat například pomocí komparátoru s hysterezí. Na vstupy klopného obvodu jsou přivedeny signály u_{i1} (žádaná hodnota proudu I'_d) a u_{i2} (skutečná hodnota proudu i_d). Pracovní bod statické charakteristiky klopného obvodu je pak určen z rozdílu těchto signálů. Pracovní bod určuje *sgn* výstupního signálu u_r (obrázek 27). Pokud je $u_r > 0$ je na spínač V vyslán signál, který jej udržuje sepnutý. Pokud je $u_r < 0$ je vyslán signál, který spínač V udržuje vypnutý. K trvalému vypnutí V a tím k zániku proudu dochází, pokud je žádaný proud $I_d = i_d < \Delta i_d / 2$. To znamená, že dvouhodnotové řízení nelze použít pro chod měniče v režimu přerušovaných proudů. (9)



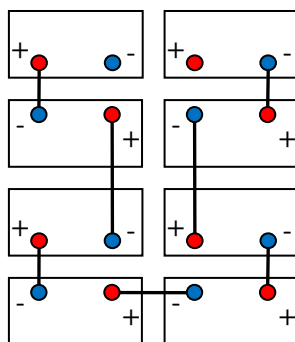
Obrázek 27. Dvouhodnotové řízení pulsního měniče (9)

vlevo blokové schéma

vpravo princip činnosti

4. Návrh a realizace

Ze zadání vyplývá požadavek na vytvoření nabíječe akumulátorů, který bude spolupracovat s balančními jednotkami AKUMON AKM-1. Blok baterií, který bude nabíjen je složen z 8 akumulátorů LiFePO₄. Akumulátory jsou v sériovém zapojení, způsob propojení a konstrukční uspořádání je znázorněno na obrázku 28. Každý z akumulátorů má kapacitu 90Ah a jmenovité napětí 12V. Výsledná kapacita akumulátorového bloku je 90Ah, ale jmenovité napětí je díky sériovému zapojení dáno součtem jmenovitých napětí jednotlivých akumulátorů tedy 96V. Maximální doporučená efektivní hodnota nabíjecího proudu je 50A (údaj výrobce).

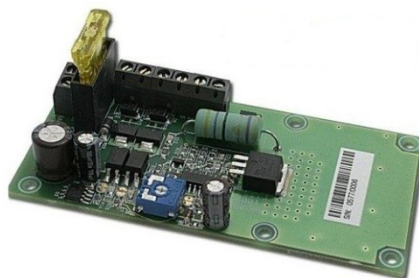


Obrázek 28. Uspořádání akumulátorů v boxu

Balanční jednotka AKM-1

Představuje specializovaný monitorovací a vyrovnávací obvod, který umožňuje snadné řízení lithiových akumulátorů s jmenovitým napětím 12V. Balanční jednotka má tyto základní funkce:

- Monitorování napětí na akumulátoru ve 3 úrovních (nízké napětí – vybitá baterie, vyrovnávání napětí – baterie je plně nabitá, přepětí – napětí baterie vyšší než 17V). Pro signalizaci napěťových úrovní akumulátorů dalším zařízením jsou k dispozici dva signalizační kanály. Těmito signály jsou nízké napětí (typicky pod 10V) a přepětí (nad 17V).
- Vyrovnávání (balancování) akumulátorů, které optimalizuje závěrečnou část nabíjení. Pokud napětí na akumulátoru dosáhne 15V připojí jednotka AKM-1 balanční (zatěžovací) rezistor a začne akumulátor zatěžovat balančním proudem. To způsobí, že se sníží nabíjecí proud protékající akumulátorem. Kromě primárního balančního odporu lze k jednotce připojit externí balanční rezistor a tím zvětšit hodnotu balančního proudu. Přeloženo z (10).



Obrázek 29. Jednotka AKUMON AKM1

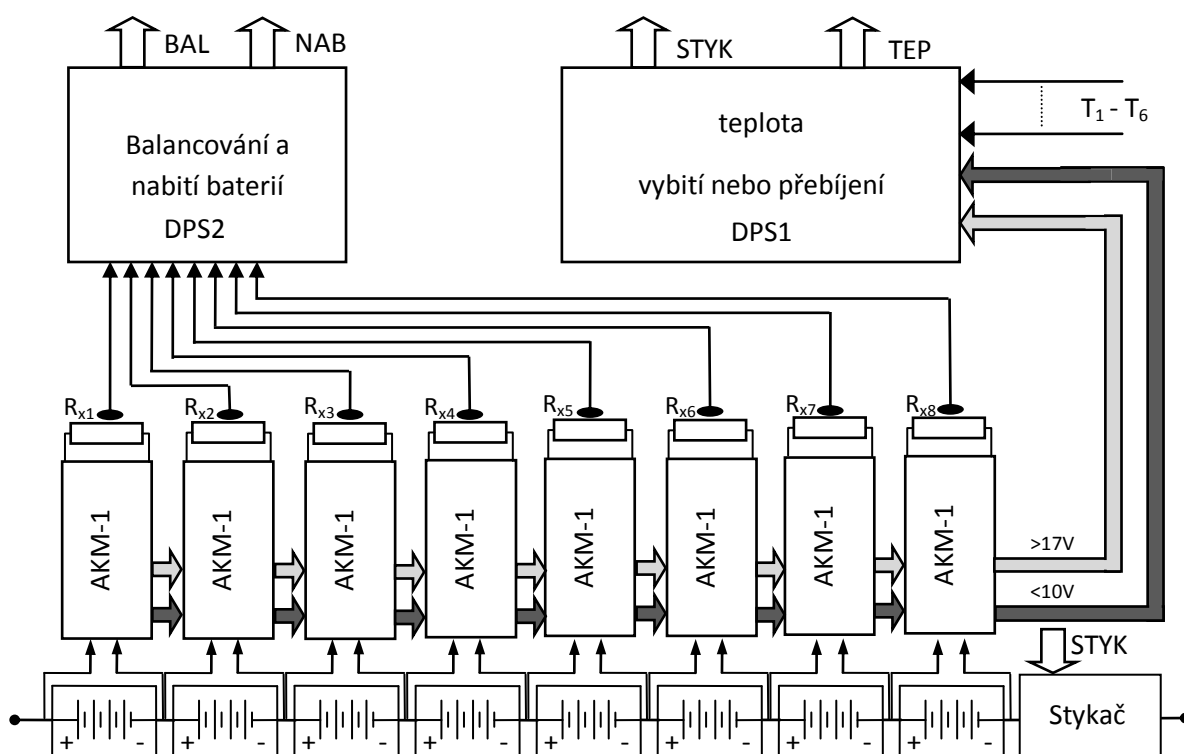
4.1 Realizace balanční sestavy

Pro účely monitorování, balancování a zabezpečení akumulátorové sestavy byla vytvořena tzv. „balanční sestava“. Tato sestava se skládá z osmi jednotek AKM1, které jsou připevněny přes izolační teplovodivou podložku k chladiči EZK CHL37E. K tomuto chladiči jsou připevněny také externí balanční rezistory ARCOL HS506R8J. Jedná se o drátové rezistory s radiátorem o hodnotě 6,8Ω. Pomocí těchto rezistorů byl zvýšen balanční proud na 2,9A při ztrátovém výkonu 42W pro každý z rezistorů (hodnoty uváděné výrobcem jednotky AKM). Velikost balančního proudu (do 3A) byla zvolena podle údaje od výrobce tak, aby nebylo nutné použít aktivní chlazení jednotky AKM1.

| Voltage [V] | Internal resistor [Ohm] | External resistor [Ohm] | Current [A] | Total Power [Watt] | The power of the external resistor [Watt] |
|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------|--------------------|---|
| 17 | 47 | | 0,4 | 6 | 6 |
| 17 | 47 | 47 | 0,7 | 12 | 29 |
| 17 | 47 | 10 | 2,1 | 35 | 35 |
| 17 | 47 | 8,2 | 2,4 | 41 | 35 |
| 17 | 47 | 6,8 | 2,9 | 49 | 42 |
| 17 | 47 | 5,6 | 3,4 | 58 | 52 |
| 17 | 47 | 4,7 | 4,0 | 68 | 61 |
| 17 | 47 | 3,9 | 4,7 | 80 | 74 |
| 17 | 47 | 3,3 | 5,5 | 94 | 88 |
| 17 | 47 | 2,7 | 6,7 | 113 | 107 |

Tabulka 2. Hodnoty při použití externích rezistorů (10)

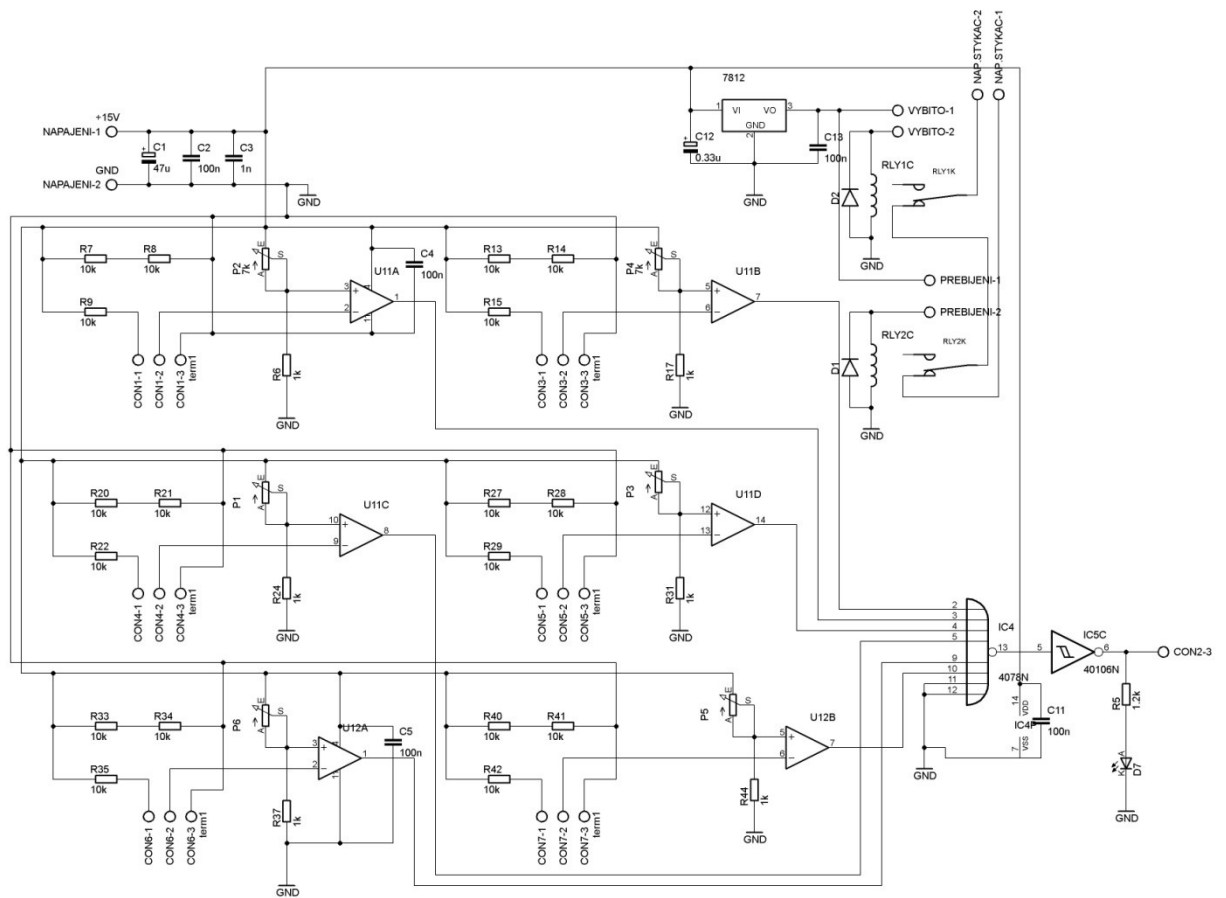
Dále se tato sestava skládá ze dvou DPS, které jsou pomocí distančních sloupků připevněny k chladiči. Tyto dvě DPS vyhodnocují údaje o teplotě akumulátorů a provozní stavy jednotek AKM1, dále také zajišťují komunikaci mezi balanční sestavou a samotnou nabíječkou. Na obrázku 30 je znázorněno blokové schéma celé sestavy. Každá z jednotek AKM1 je paralelně připojena k jednomu akumulátoru a snímá jeho napětí. Pokud napětí klesne pod 10V je generován signál <10V, tento stav znamená, že je akumulátor vybitý a nesmí již být dále zatěžován. Signál je zpracován DPS1 a pomocí relé je rozpojen obvod ovládací cívky stykače, tím dochází k rozpojení stykače a odpojení zátěže. Ke stejné situaci dojde, pokud napětí jednoho z akumulátorů překročí 17V a hrozilo by trvalé poškození v důsledku přebíjení. Blok DPS1 má za úkol také hlídání teploty akumulátorů, aby nedocházelo k jejich nabíjení, pokud jsou přehřáté. Termistory ve funkci teplotních čidel dávají pomocí signálů T₁ až T₆ informaci o teplotě do DPS1, pokud teplota mezi akumulátory překročí 70-80°C je pomocí signálu TEP blokováno nabíjení. Blok DPS2 snímá napětí na externích balančních rezistorech R_{x1-8}. Pokud se na rezistoru objeví napětí (15V), znamená to, že akumulátor dosáhl maximálního nabíjecího napětí. Blok DPS2 následně signalizuje pomocí signálu BAL do nabíječky tuto informaci (způsobí přechod z nabíjení konstantním proudem do režimu nabíjení konstantním napětím). Jestliže balancují všechny akumulátory je aktivován výstup NAB (nabito) a nabíjení je ukončeno.



Obrázek 30. Blokové schéma balanční sestavy

Popis DPS1

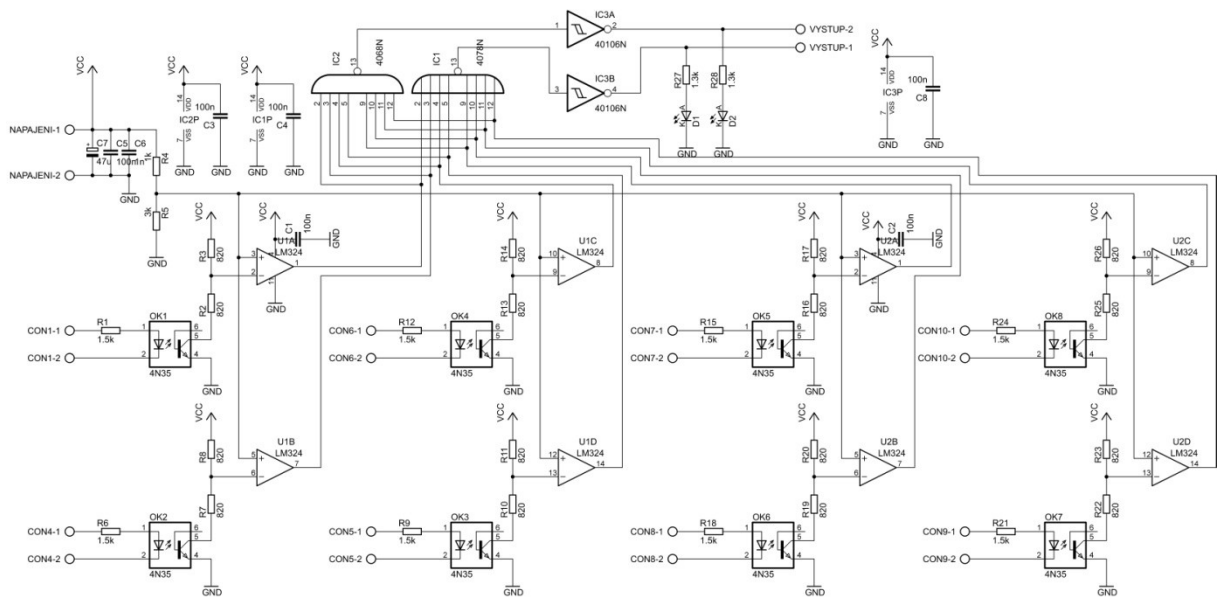
Na obrázku 31 je podrobné schéma bloku DPS1. V levém horním rohu schématu se nachází vstup napájecího napětí +15V, GND a blokovací kondenzátory C1, C2, C3. Odtud je napětí 15V vedeno do napěťového regulátoru 7812, který slouží k napájení ovládacích cívek dvou přilehlých relé. Tato relé jsou ovládána signály (sepnutím) >17V, <10V z jednotek AKM1. Na kontakty relé je přivedeno napětí 230V stř. z ovládací cívky stykače. Ve střední části schématu se nachází 6 vyvážených odporových můstků a k nim je připojeno 6 komparátorů s nastavitelným komparačním napětím. Ke konektorům CON1, CON3, CON4, CON5, CON6, CON7 jsou připojeny pomocí tří vodičů (teplotní kompenzace) negativní termistory s odporem 10kΩ (při pokojové teplotě). To znamená, že je můstek vyvážený a na invertujícím vstupu komparátoru je napětí $U_{cc}/2$ (7,5V). Po zahřátí termistoru toto napětí klesá, pokud klesne pod nastavené komparační napětí je na výstupu OZ napětí U_{cc} (logická 1). Výstupy z komparátorů jsou přivedeny do osminásobného hradla NOR (4078) a následně do Schmittova invertoru (40106). Výstupní hodnota je indikována LED D7. Kondenzátory C4, C5, C11 slouží jen jako blokovací kondenzátory napájení IO.



Obrázek 31. Schéma DPS1

Popis DPS2

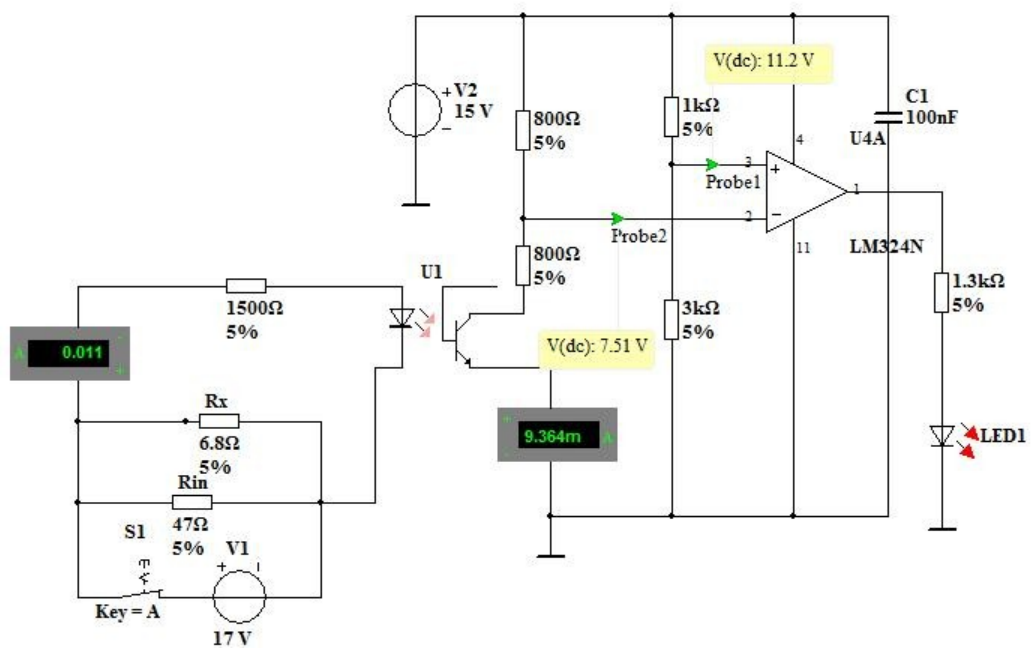
Na obrázku 32 je podrobné schéma zapojení bloku DPS2. V levém horním rohu schématu se nachází napájecí konektor s blokovacími kondenzátory a napájecí vstupy integrovaných obvodů také s připojenými blokovacími kondenzátory. Ve spodní polovině schématu je osm stejných obvodů, které pomocí optočlenů (4N35) a komparátorů (OZ LM324) vyhodnocují, zda došlo k balancování akumulátorů a externím balančním rezistorem protéká proud. Pokud dojde k balancování, protéká přes konektor a vstupní stranu optočlenu proud daný odporem R1. To způsobí sepnutí výstupní části optočlenu a tím je připojen odporový dělič tvořený odpory R2 a R3 na zem (GND). Tímto připojením se sníží napětí na invertujícím vstupu operačního zesilovače U1A z 15V na 7,5V. Jelikož je na neinvertujícím vstupu napětí 11,25V, které je dáno odpory R4 a R5, tak na výstupu komparátoru je napětí blízké napájecímu. Podobně funguje zbývajících sedm komparátorů. Výstup komparátoru je připojen na vstupy obvodů 4078 a 4068, což jsou hradla NAND a NOR s osmi vstupy. Těmito obvody je vyhodnocován signál ze všech komparátorů a výsledek je invertován pomocí Schmidtova invertoru (40106). Použití tohoto invertoru je výhodné zejména kvůli potlačení vlivu rušení vstupního signálu a také kvůli zvětšení strmosti hran výstupního signálu. Výstupní stavy (signály) jsou indikovány LED diodami D1, D2. Použitím optočlenů ke snímání balančního proudu došlo ke galvanickému oddělení výkonových částí sestavy od částí řídicích.



Obrázek 32. Schéma DPS1

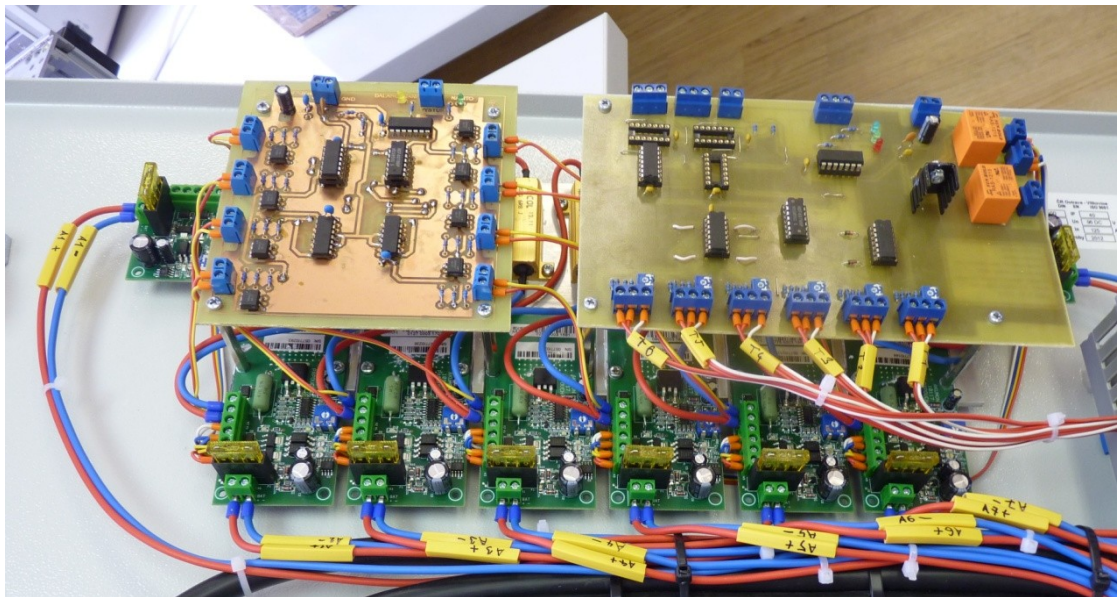
Simulace

Byla provedena simulace jednoho vyhodnocovacího bloku na DPS1. Výsledek simulace je na obrázku 33. Odpor R_{in} představuje interní balanční odpor jednotky AKM1. Odpor R_x je externí (přídavný) balanční odpor. Napětí zdroje V_1 je maximální napětí jaké může mít jednotlivý akumulátor. Zdroj V_2 představuje napájecí napětí. Spínač S_1 spouští balancování (reálná jednotka AKM1 k tomuto používá tranzistor). Zeleným písmem jsou vyjádřeny hodnoty proudů. Hodnoty napětí jsou zobrazeny ve žlutých rámečcích.



Obrázek 33. Simulace indikace balancování v aktivním stavu

Pohled na balanční sestavu



Obrázek 34. Balanční sestava

4.2 Nabíječka

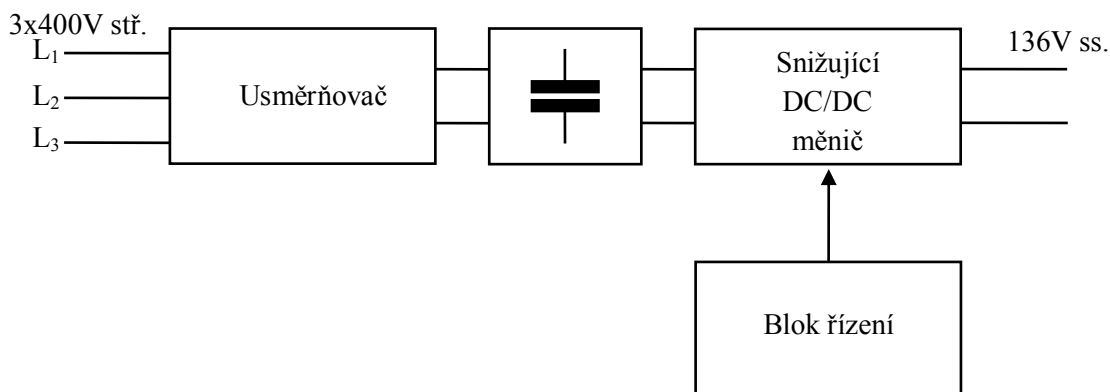
4.2.1 Požadavky

Pro nabíjení akumulátorového bloku byla vytvořena nabíječka splňující několik základních požadavků. Následující kapitoly postupně popisují návrh a realizaci nabíječky.

Základní požadavky:

- Napájecí napětí 3x400V stř.
- Maximální výstupní napětí 136V ss.
- Maximální střední hodnota výstupního stejnosměrného proudu 50A(maximální nabíjecí proud akumulátorů).
- Komunikace s balančními jednotkami AKM1
- Vyhnutí se použití transformátorů a cívek
- Vhodný průběh nabíjení (graf nabíjení LiFePO₄ akumulátorů)

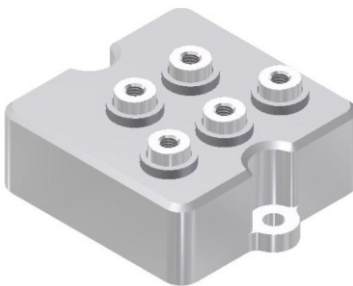
Z těchto požadavků vyplynulo rozhodnutí sestavit jednočinný snižující měnič. Tento měnič má jednoduchou strukturu a ke své činnosti používá minimální množství součástek. Měnič ke své činnosti nepotřebuje transformátor ani cívky (baterie lze nabíjet pulsně). Je snadno říditelný, jelikož obsahuje pouze jeden spínací prvek.



Obrázek 35. Zjednodušené blokové schéma nabíječky

4.2.2 Usměrňovač

Rozhodující parametry pro volbu usměrňovacího modulu případně diod jsou maximální závěrné napětí a maximální propustný proud. Pro realizaci byl použit šestipulsní neřízený usměrňovač v můstkovém zapojení SKD50 vyráběný firmou SEMIKRON. Tento usměrňovač je integrovaný do bezpotenciálového modulu, což umožňuje přímou montáž na chladič bez nutnosti použití izolační podložky. Usměrňovací modul SKD 50 má maximální hodnotu závěrného napětí 1600V a maximální hodnotu výstupního proudu 50A. Tyto parametry jsou dostačující, jelikož závěrné napětí v této aplikaci dosahuje hodnoty 560V a maximální výstupní proud měniče je 50A. Tento modul se již nacházel na VŠB-TUO a nebylo nutné jej tedy kupovat. Hodnoty modulu SKD 50 z (12).

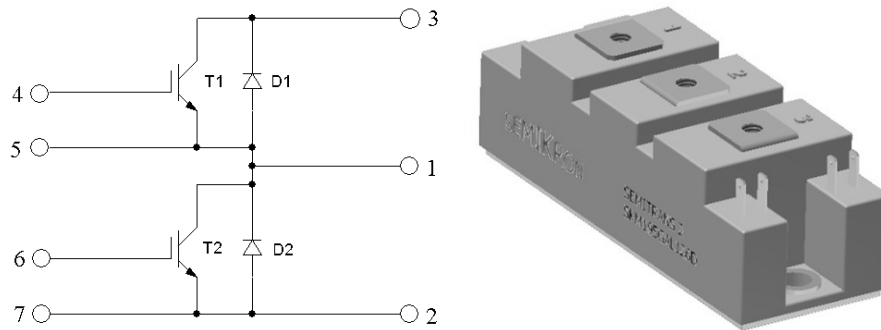


Obrázek 36. 3D model modulu SKD50

4.2.3 Snižující DC/DC měnič

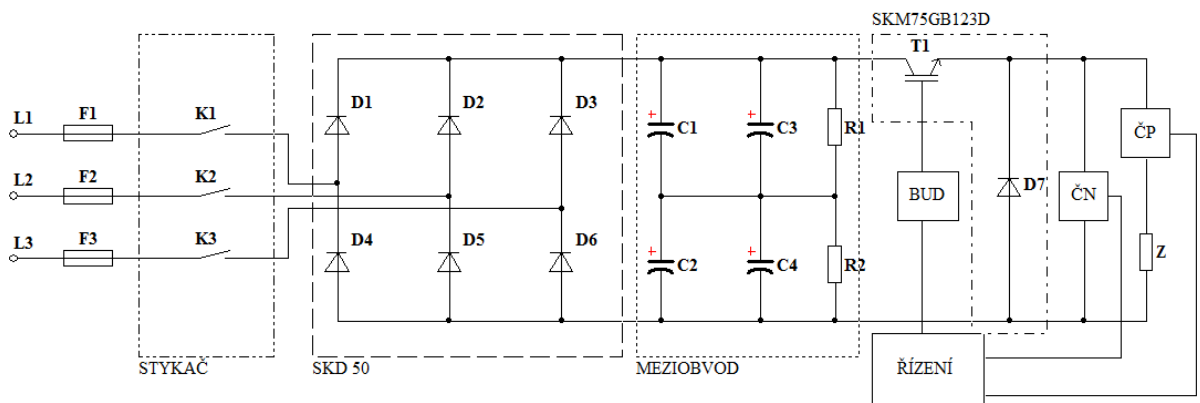
Snižující měnič je složen z jednoho tranzistoru a jedné diody. Rozhodující parametry pro výběr vhodných polovodičových součástek jsou hodnota jmenovitého proudu, ztrátový výkon a blokovací napětí. K realizaci byl použit IGBT modul SKM75GB12BD. Tento modul obsahuje dva IGBT tranzistory a dvě diody. Blokovací napětí modulu je 1200V (12), maximální výstupní proud je

75A (12) a ztrátový výkon je srovnatelný u většiny tranzistorů, takže tento parametr lze zanedbat. Ve funkci snižujícího měniče je využíván pouze tranzistor T1 a dioda D2. Tranzistor T2 je permanentně blokován pomocí napěťové úrovně připojené na pin 6. Dioda D1 se během provozu měniče neprojevuje. Tento modul se také nacházel na VŠB-TUO.



Obrázek 37. Vnitřní zapojení IGBT modulu (11) a jeho 3D model

Na základě znalostí blokového schématu na obrázku 35 a požadavků na nabíječku bylo navrženo schéma znázorněné na obrázku 38.



Obrázek 38. Schéma nabíječky

4.2.4 Čidla napětí a proudu

Čidlo proudu

Při řízení proudu pomocí dvouhodnotové regulace je nutné znát velikost proudu tekoucího zátěží. K tomu bylo použito čidlo proudu CKSR 50-NP firmy LEM. Jedná se o čidlo s napěťovým výstupem a napájecím napětím +5V, GND. Efektivní hodnota vstupního měřeného proudu je 50A. Výstupní napětí je dáno vztahem:

$$V_{out} = G \cdot \theta_p \quad (4.1)$$

G ...citlivost převodníku (V/At)

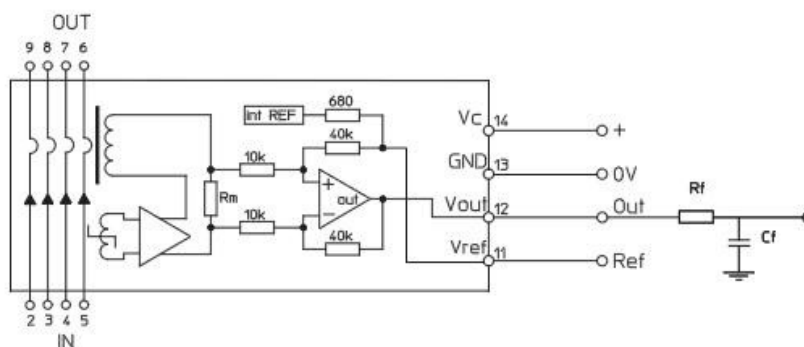
θ_p ... vstupní proudový krok

$$\theta_p = N_p \cdot I_p \quad (4.2)$$

N_p ... počet primárních závitů (dáno zapojením vstupních proudových vývodů)

I_p ... proud tekoucí primárním vinutím

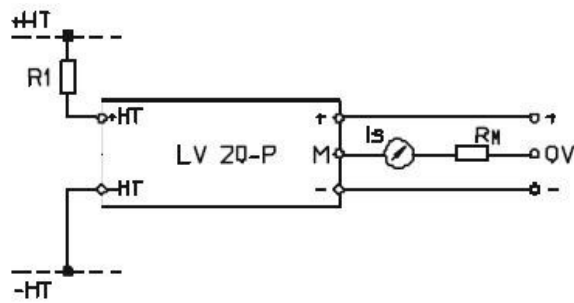
Podle dokumentace byly zvoleny hodnoty $R_f = 100\Omega$ a $C_f = 100\text{pF}$. Vstupní referenční napětí V_{ref} bylo nastaveno pomocí děliče napětí na 1V. Hodnota V_{ref} zvětšuje proudový měřicí rozsah směrem k nulovým, případně záporným hodnotám proudu.



Obrázek 39. Schéma vnitřního zapojení čidla CKSR 50-NP (13)

Čidlo napětí

Výstupní napětí měniče je nutné snímat, kvůli zavedení zpětné vazby do bloku napěťové regulace, dále je hodnota výstupního napětí použita pro vyhodnocování provozních stavů nabíječky. K tomuto účelu bylo použito čidlo LV 20-P, rovněž od firmy LEM. Funkce čidla je založena na principu Hallova jevu a výstupní veličinou je proud. Při měření napětí prochází proud přímo úměrný velikosti měřeného napětí odporem R_1 . Velikost tohoto odporu je volena tak, aby při maximální hodnotě měřeného napětí tekla primárním obvodem čidla proud 10mA. Převod čidla je 2500:1000, to znamená, že pokud primárním obvodem prochází proud 10mA, výstupní proud na sekundární straně čidla je 25mA. K proudovému výstupu M je připojen odpor R_M , úbytek napětí na tomto odporu je vyvolán výstupním proudem čidla. Měřením tohoto úbytku se získává informace o velikosti napětí na vstupní straně čidla. Napájení čidla je symetrické +15V, -15V a GND. Hodnota odporu R_1 byla zvolena 15K Ω , rozsah měřeného napětí je tedy 0-150V. Při dimenzování tohoto odporu je nutné neopomenout výkonovou ztrátu, která na tomto odporu vzniká. Odpor R_M by dle výrobce čidla měl mít hodnotu od 100 Ω do 350 Ω a je volen podle potřebné velikosti výstupního napětí.

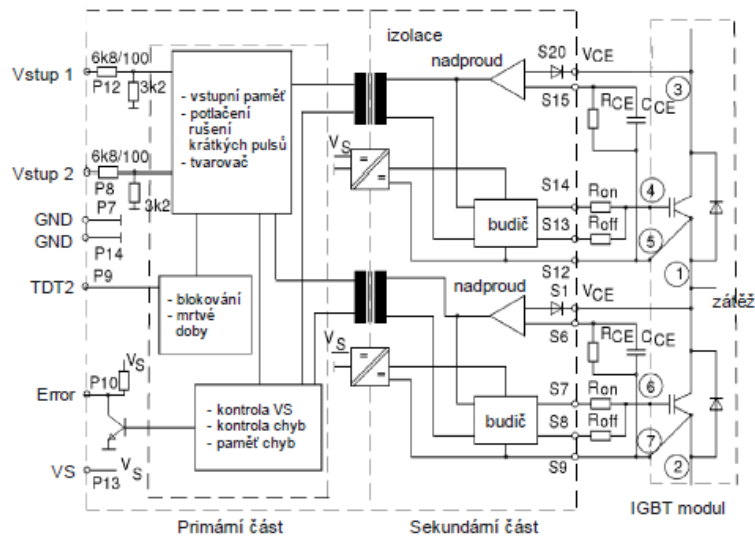


Obrázek 40. Schéma zapojení čidla LV 20-P (14)

4.2.5 Budič IGBT modulu

Budiče jsou obvody tvořící galvanické oddělení výkonové části (IGBT tranzistoru) od řídicí části. Toto oddělení je řešeno buď použitím optočlenu, nebo pulsního transformátoru. Další důležitou úlohou budiče je generování řídicích impulsů pro IGBT tranzistor. Budič zajistí dostatečnou výkonovou úroveň, strmost hran a správný tvar řídicího signálu. Tím, že má řídicí signál IGBT tranzistoru požadované parametry, se docílí minimalizace spínacích ztrát a předejde se vzniku poruchových stavů.

Byl vybrán budič SKHI 22AH4R vyráběný firmou Semikron. Tento budič byl jedním z doporučených (v simulaci Semisel) k řízení IGBT modulu SKM75GB123D. Jedná se o dvoukanálový budič s maximální spínací frekvencí 50kHz. Budič se již nacházel a byl používán na katedře elektrotechniky VŠB-TUO. Autorem DPS budiče je vedoucí této práce Ing. Petr Vaculík Ph.D. Blokové schéma budiče je na obrázku 41.



Obrázek 41. Blokové schéma budiče (15)

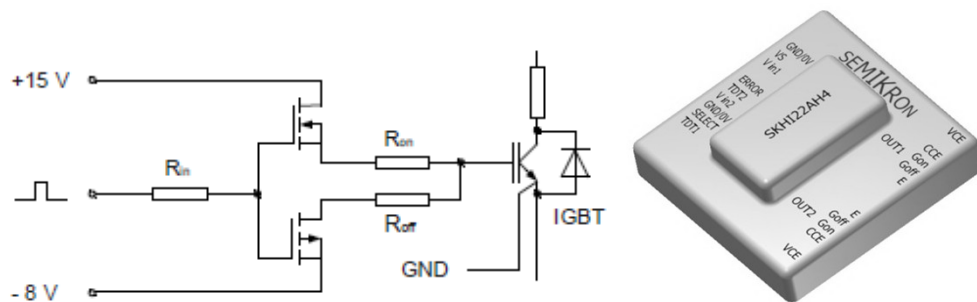
Vstupní část

Vstupy budiče jsou CMOS kompatibilní s inverzní logikou. Pokud je na vstupu budiče log.0 (0V) je IGBT tranzistor sepnut, naopak pokud je na vstupu log.1(15V) je tranzistor blokován. Vstup je

tvořen Schmittovým klopným obvodem, který zajišťuje imunitu vůči rušení. Budič dále obsahuje blok generování mrtvých dob a blokování, jelikož je řízen pouze jeden tranzistor IGBT modulu a druhý z tranzistorů je trvale blokován (přivedením napětí 15V na vstup budiče), není nutné nastavovat tento blok. Blok kontroly chyb vyhodnocuje poruchový stav při poklesu napájecího napětí pod 13V nebo při nadproudu IGBT tranzistoru, který může být způsoben například zkratem na výstupu měniče. Galvanické oddělení je řešeno pomocí pulsního transformátoru a maximální izolační napětí je 4kV.

Výstupní část

Výstup budiče tvoří dva MOSFET tranzistory, které generují výstupní řídicí úrovně +15V pro sepnutí IGBT modulu a -7V pro jeho vypnutí. Odpory R_{on} a R_{off} určují rychlost spínání a vypínání.



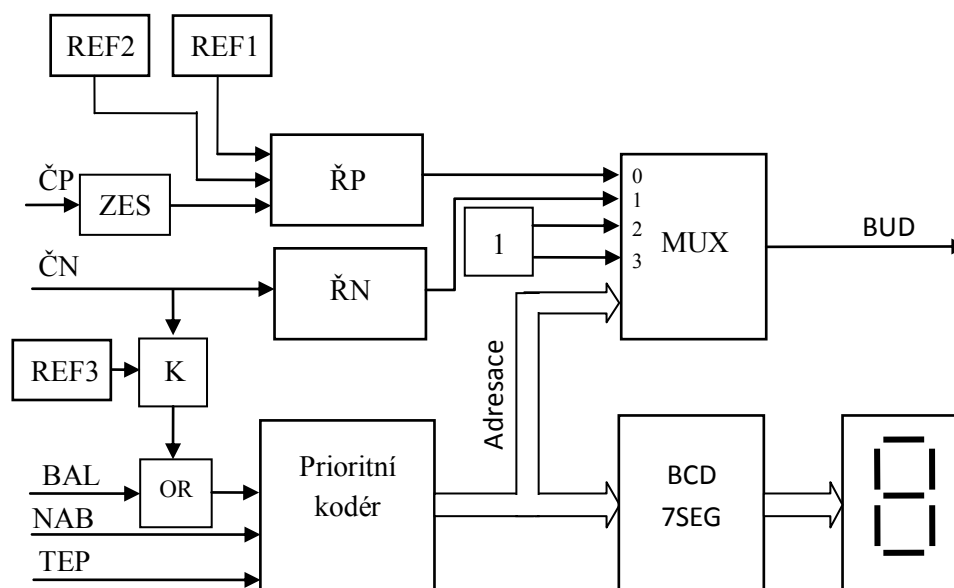
Obrázek 42. Vlevo schéma výstupní části budiče (15), vpravo 3D model budiče

4.2.6 Blok řízení

Řízení měniče je řešeno analogově a probíhá ve dvou základních režimech. Prvním režimem je režim „konstantního proudu“, který je řešen pomocí dvouhodnotového řízení proudu. Princip řízení spočívá v porovnávání velikosti výstupního proudu s hodnotou žádaného proudu (vysvětleno v kapitole 3.5). Druhým režimem je režim „konstantního napětí“, který je řešen pomocí řízení s konstantním spínacím kmitočtem (vysvětleno v kapitole 3.5). Na obrázku 43 je blokové schéma řídicího systému, který bude dále popisován.

Řízení proudu (ŘP) je realizováno pomocí komparátoru s hysterezí. Hodnota z čidla proudu (vstup ČP) je pět krát zesílena (ZES) a přivedena na vstup ŘP. Tato hodnota je následně porovnávána s hodnotou referenčního napětí REF1 nebo REF2. Referenční napětí lze samostatně nastavovat a pomocí přepínače určovat, které z těchto napětí je připojeno na vstup komparátoru v bloku ŘP. Tím je realizována možnost nabíjet akumulátory dvěma proudy (např. rychlé a pomalé nabíjení). Výstupní obdelníkový signál z ŘP je přiveden na vstup 0 multiplexeru (MUX). Vstupní signál z napěťového čidla (ČN) je připojen k bloku řízení napětí (ŘN) a také ke komparátoru (K). Blok (ŘN) je realizován integrovaným obvodem TL494, který pracuje jako PWM modulátor s pevně danou frekvencí a proměnnou střídou. Střída se mění podle signálu ČN, který vytváří napěťovou zpětnou vazbu. Výstupní obdelníkový signál z bloku ŘN je přiveden na vstup 1 (MUX). Bloky ŘN a ŘP pracují neustále a přepínání mezi těmito režimy řízení se provádí pomocí multiplexeru (MUX), tento multiplexer je řízen pomocí výstupních logických úrovní z prioritního kodéru. V obrázku 41 je tato adresní sběrnice označena jako „adresace“. Vstupní signál z ČN je také přiveden do komparátoru (K), zde je porovnáván s napětím nastaveným v bloku REF3. Pokud je výstupní napětí nabíječky menší než nastavená hodnota v bloku REF3 a žádný z akumulátoru nebalancuje, tedy není generován signál BAL

z balanční sestavy, je na výstupu prioritního kodéru hodnota „0“. Tato hodnota má nejnižší prioritu a je na výstupu po celou dobu, dokud není zaznamenán některý ze signálů s vyšší prioritou (BAL, NAB, TEP). Výstupní hodnota „0“ prioritního kodéru znamená, že multiplexer připojí na výstup signál ze vstupu 0. To znamená, že probíhá řízení v režimu „konstantního proudu“. Jakmile výstupní napětí nabíječky dosáhne napětí nastaveného v bloku REF3 (maximální nabíjecí napětí akumulátorového bloku), nebo pokud začne některá z jednotek AKM1 balancovat (BAL), výstupní hodnota z prioritního kodéru se změní na hodnotu „1“. Poté multiplexer na výstup BUD připojí signál z bloku ŘN a řízení začne probíhat v režimu „konstantního napětí“. Pokud je aktivní signál NAB, kterým signalizuje balanční sestava nabití akumulátorů, prioritní kód pomocí hodnoty „2“ připojí na výstup multiplexeru log. 1. To znamená, že budič vypne IGBT tranzistor a nabíjení se ukončí. Nejvyšší prioritu má signál TEP, který znamená přehřátí akumulátoru. Pokud je tento signál aktivní, prioritní kód generuje výstupní hodnotu „3“, která ukončí nabíjení podobně jako v případě aktivního signálu NAB. Výstupní binární hodnota z prioritního kodéru je pomocí kodéru (BCD 7SEG) převedena a zobrazována na sedmi segmentovém displeji. Tím je indikován provozní režim nabíječky, ve kterém se zrovna nachází. Výstupní signál BUD je připojen na vstup budiče.



Obrázek 43. Blokové schéma řízení

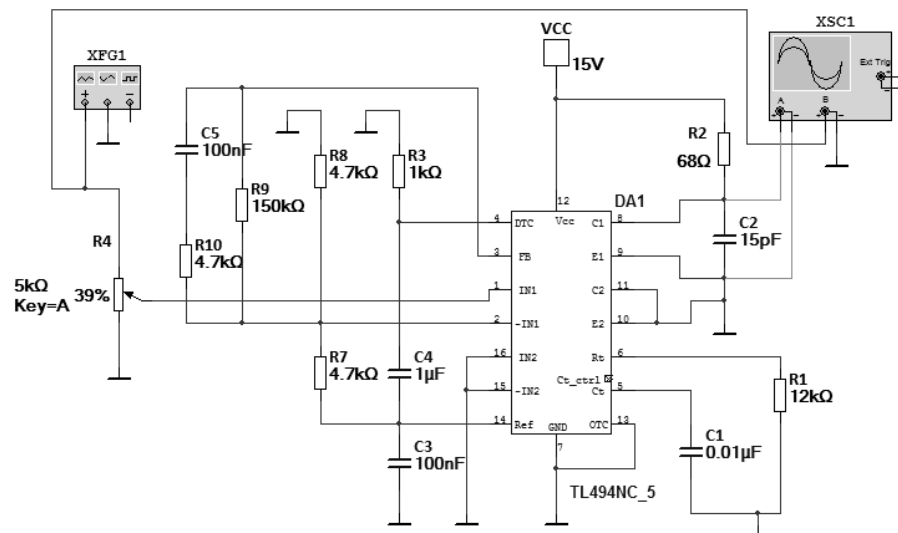
Detailní schéma bloku řízení je přiloženo v přílohách. Kromě funkcí popsaných v předchozím odstavci, má DPS bloku řízení i další funkce, jako například blokování výstupu, pokud není aktivována funkce nabíjení, ovládání stykačů v nabíječce i v balanční sestavě pomocí dvou Relé. Pokud totiž dojde k vybití jednoho z akumulátorů, dojde k rozpojení stykače, který je umístěn v balanční sestavě. Tím dojde k odpojení zátěže, ale také k odpojení nabíječky. Aby bylo možné akumulátory nabíjet, musí být stykač opět sepnut po dobu, než napětí na vybitém akumulátoru nestoupne nad 10V a jednotka AKM1 přestane signalizovat vybití. Tato funkce je zajištěna jedním ze

dvou relé. DPS bloku řízení zajišťuje také napájení ventilátoru. Logická úroveň vstupních signálů BAL, NAB, TEP je indikována led diodami.

Simulace

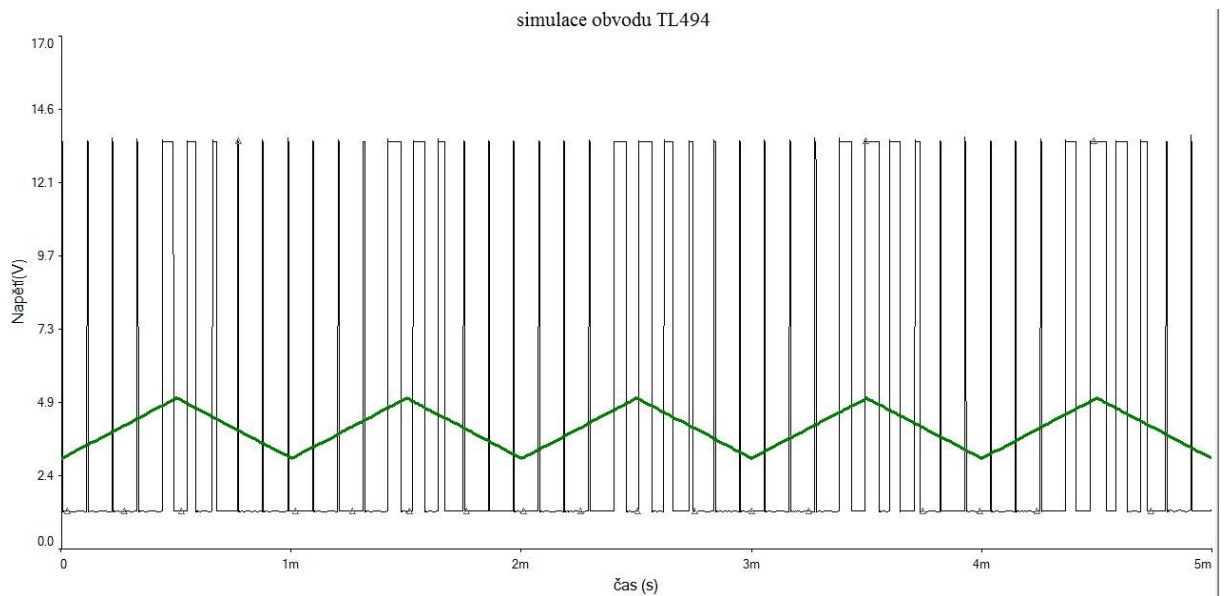
Blok ŘN

V programu Multisim byl nasimulován blok ŘN využívající ke své činnosti IO TL494. Simulací byla ověřena funkčnost obvodového řešení. Na obrázku 44 je znázorněno zapojení, na kterém byla simulace provedena. Vstupní signál z čidla napětí je zde simulován pomocí trojúhelníkového signálu z generátoru XFG1. Výstupní signál je měřen na pinu C1 obvodu TL494. Nastavení frekvence je provedeno pomocí odporu R1 a kondenzátoru C1 na 10kHz. Odporů R7 a R8 tvoří napěťový dělič, který z referenčního napětí 5V vytváří napětí 2,5V. Toto napětí je připojeno ke vstupu $-IN1$ a slouží jako porovnávací napětí pro napětí z čidla napětí, které je připojeno ke vstupu $IN1$. Velikost výstupního napětí resp. střída je nastavována pomocí trimru R4.



Obrázek 44. Simulační schéma bloku ŘN

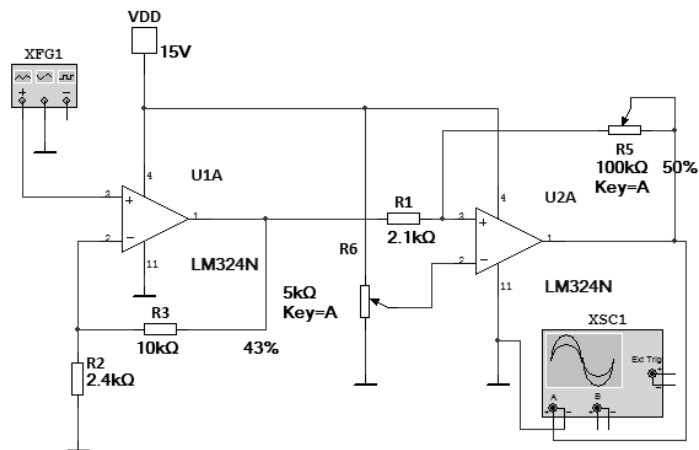
Na obrázku 45 jsou zobrazeny průběhy vstupního a výstupního napětí. Vstupní napětí (zelená barva) nahrazuje signál z čidla napětí. Na výstupním napětí (černá barva) je dobře viditelná změna střídání v závislosti na velikosti vstupního napětí. Jelikož budič sepne IGBT tranzistor je-li na jeho vstupu log. 0, je z průběhu výstupního napětí patrné, že obvod pracuje správně. Pokud je vstupní napětí příliš nízké blok ŘN udržuje tranzistor sepnutý po maximální dobu. Jakmile vstupní napětí stoupne nad nastavenou hodnotu, je střída sepnutí tranzistoru zmenšována. Zákmity výstupního napětí během log. 0 jsou způsobeny minimální mrtvou dobou obvodu TL494 (death time).



Obrázek 45. Průběhy vstupního a výstupního napětí ŘN

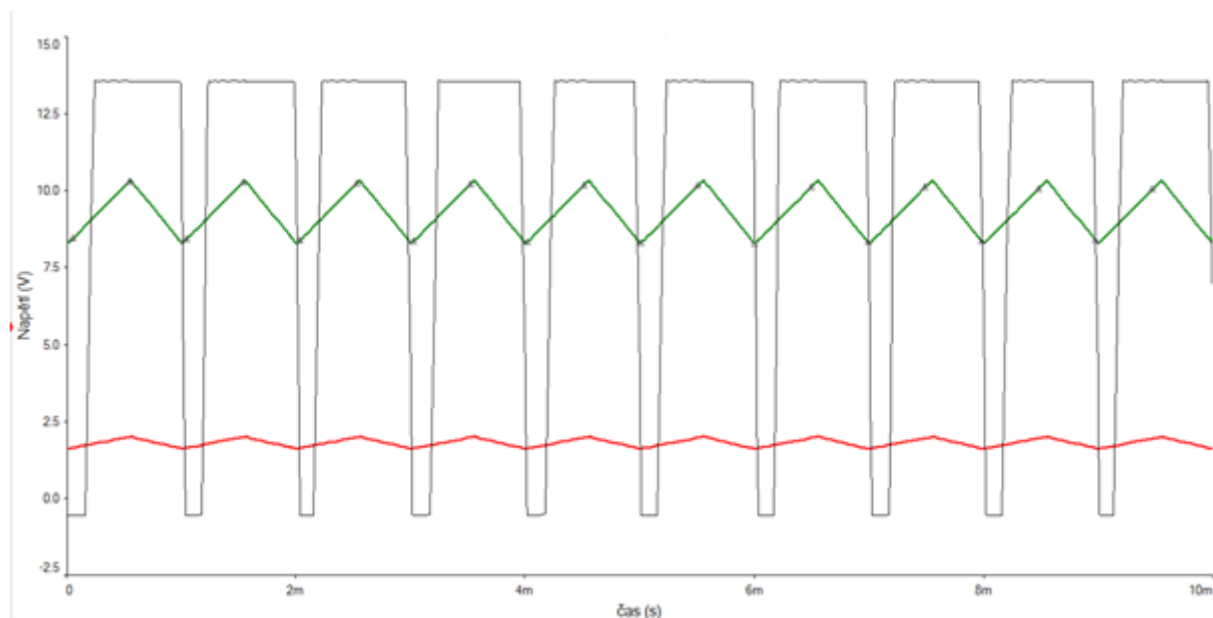
Blok ŘP

Blok ŘP byl rovněž simulován v programu Multisim. Na obrázku 46 je znázorněno schéma, na kterém byla prováděna simulace. Vstupní signál z čidla proudu byl opět nahrazen trojúhelníkovým signálem z generátoru XFG1. Velikost tohoto vstupního signálu je zvolena tak, aby odpovídala reálné hodnotě. Nejprve je vstupní signál zesílen operačním zesilovačem U1A a následně je porovnáván komparátorem s hysterezí U2A.



Obrázek 46. Schéma simulace bloku ŘN

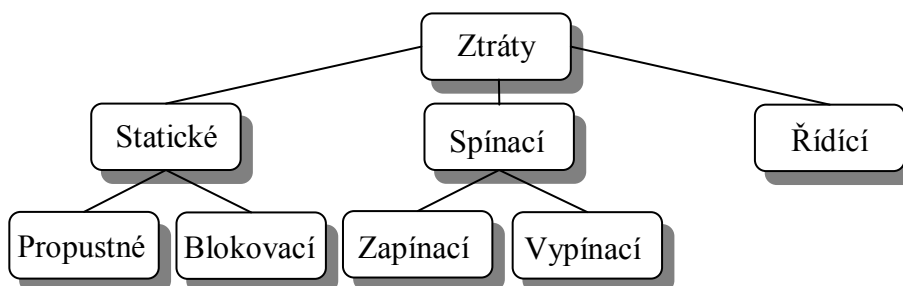
Na obrázku 47 jsou znázorněny průběhy vstupního a výstupního napětí. Vstupní napětí je označeno červenou barvou. Zesílené vstupní napětí je znázorněno zelenou barvou a výstupní napětí je označeno černou barvou. Z průběhů je patrné, že výstupní napětí má stejnou frekvenci jako napětí vstupní. Dále je rozpoznatelná správná funkce tohoto zapojení a také je patrný vliv hystereze.



Obrázek 47. Průběhy napětí bloku ŘP

4.2.7 Návrh chlazení

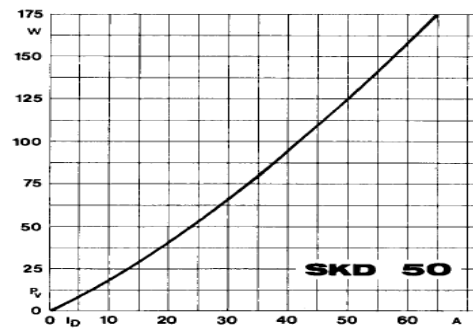
Během činnosti polovodičových součástek, v tomto případě usměrňovače a IGBT tranzistoru se zpětnou diodou, vznikají výkonové ztráty. Tyto ztráty jsou přeměněny na teplo a jsou označovány jako ztrátový výkon. Celkový ztrátový výkon měniče je složen ze tří částí (statické, dynamické, řídicí). Nejvíce se na oteplování podílí ztráty v propustném stavu a spínací ztráty. Ostatní složky ztrátového výkonu je možné zanedbat, jelikož dosahují velmi malých hodnot.



Obrázek 48. Blokové schéma rozdělení ztrát (2)

Ztrátový výkon usměrňovače SKD 50

Ztrátový výkon tohoto usměrňovače byl určen pomocí grafu, který uvádí výrobce v datalistu (12). Graf na obrázku 49 vyjadřuje závislost ztrátového výkonu na velikosti výstupního proudu usměrňovače. Z grafu vyplývá, že výstupnímu proudu 50A odpovídá výkonová ztráta 125W.

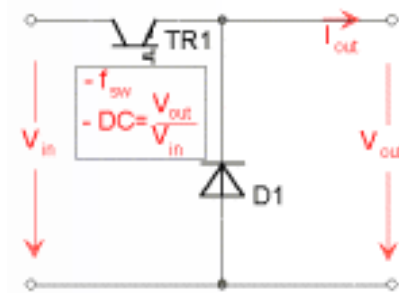


Obrázek 49. Graf ztrátového výkonu usměrňovače SKD50 (12)

Ztrátový výkon IGBT modulu SKM 75GB12V

Zjištění ztrátového výkonu bylo provedeno s pomocí simulačního programu Semisel. Tento simulační program je webovou aplikací a je dostupný na internetových stránkách firmy Semikron. Jako vstupní parametry simulace byly zadány tyto hodnoty:

- Vstupní napětí 540V
- Spínací frekvence 10kHz
- Výstupní napětí 136V
- Výstupní proud 50A
- Střída 0,252
- Doba vedení zpětné diody 0,252



Obrázek 50. Využití IGBT modulu nastavené v simulaci

Byly použity maximální vstupní hodnoty, které lze během provozu nabíječky předpokládat. Doba vedení zpětné diody byla odhadnuta a vzhledem k téměř nulové indukčnosti zátěže této hodnoty ani nedosáhne. Výstupem z provedené simulace byly hodnoty hlavních složek ztrátového výkonu. Celková výkonová ztráta tranzistoru dle simulace činí 112W a výkonová ztráta diody činí 48W. Celková ztráta modulu je dána součtem celkových ztrát tranzistoru a diody, tedy 160W.

Celkový ztrátový výkon měniče je dán vztahem:

$$P_{tot} = P_{IGBT} + P_{usm} = 160 + 125 = 285W \quad (4.3)$$

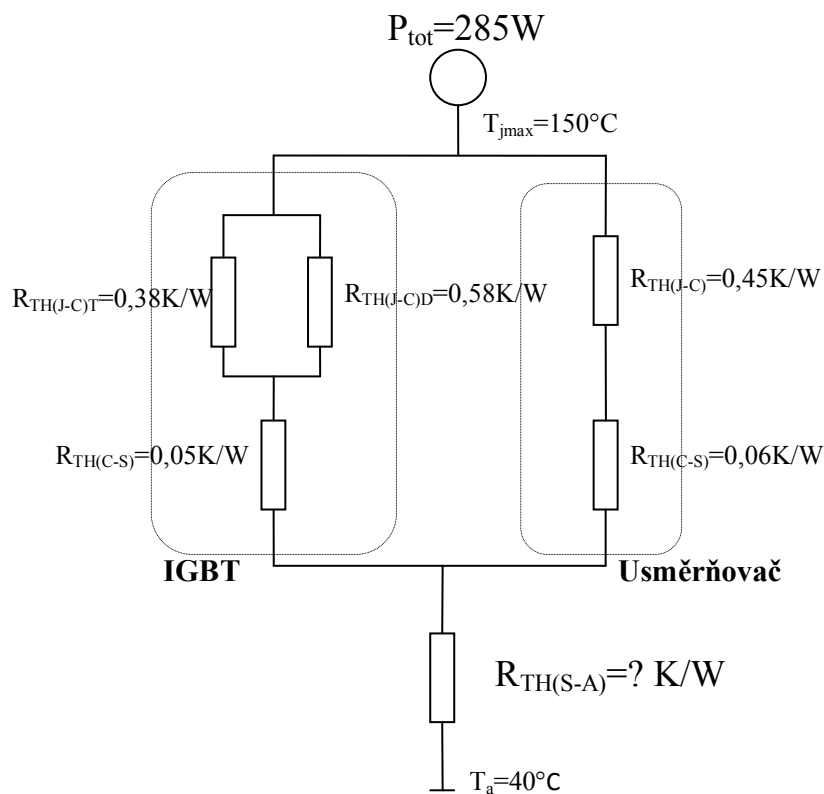
P_{IGBT} ztrátový výkon IGBT modulu

P_{usM} ztrátový výkon usměrňovače

Výpočet chladiče

Výrobce uvádí pro každý polovodičový prvek maximální teplotu přechodu T_{jmax} . Tato teplota nesmí být překročena, jinak dochází k destrukci polovodiče. Proto je nutné pomocí chladiče, který je v přímém kontaktu s polovodičovým prvkem (modul), odvést vzniklé teplo od polovodičového přechodu (jádra). Teplo odvedené z pouzdra polovodiče je nutné následně převést do okolního prostředí.

Z datasheetu výrobce byly zjištěny hodnoty tepelných odporů modulů usměrňovače a IGBT tranzistoru. Následně bylo vytvořeno tepelné schéma měniče.



Obrázek 51. Základní tepelné schéma

Hodnota T_{jmax} na obrázku 51 udává maximální teplotu přechodu usměrňovače. Protože hodnota T_{jmax} IGBT modulu je $175^{\circ}C$ výpočet je proveden pro teplotu nižší tedy $150^{\circ}C$ (maximální teplota modulu

SKD 50). Tepelné schéma a tím i následné výpočty lze zjednodušit úpravou sérioparalelních kombinací tepelných odporů. Práce s tepelnými odpory je obdobou práce s klasickými odpory.

Výpočty pro zjednodušení schématu:

- Pro IGBT

$$R_{TH(J-C)} = \frac{R_{TH(J-C)T} * R_{TH(J-C)D}}{R_{TH(J-C)T} + R_{TH(J-C)D}} = \frac{0,38 * 0,58}{0,38 + 0,48} = 0,256 K/W \quad (4.4)$$

$$R_{TH(J-S)} = R_{TH(J-C)} + R_{TH(J-S)} = 0,256 + 0,05 = 0,3 K/W \quad (4.5)$$

- Pro usměrňovač

$$R_{TH(J-S)} = R_{TH(J-C)} + R_{TH(C-S)} = 0,45 + 0,06 = 0,51 K/W \quad (4.6)$$

Další zjednodušení:

$$R_{TH(J-S)celkove} = \frac{R_{TH(J-S)IGBT} * R_{TH(J-S)USM}}{R_{TH(J-S)IGBT} + R_{TH(J-S)USM}} = \frac{0,3 * 0,51}{0,3 + 0,51} = 0,188 K/W \quad (4.7)$$

Výpočet potřebné hodnoty $R_{TH(S-A)}$ chladiče:

Hodnota rozdílu T_{jmax} a okolní teploty T_a :

$$T = T_{jmax} - T_a = 110^\circ C \quad (4.8)$$

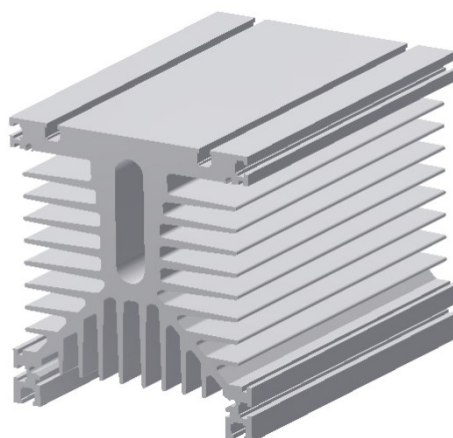
Celkový maximální tepelný odpor:

$$R_{TH} = \frac{T}{P_{tot}} = 0,294 K/W \quad (4.9)$$

Maximální tepelný odpor chladiče:

$$R_{TH(S-A)} = R_{TH} - R_{TH(J-S)celkove} = 0,106 K/W$$

K chlazení měniče byl použit chladič P3 dlouhý 180mm od firmy Semikron s aktivním chlazením ventilátorem SUNON MEC0251V2-A99. Ventilátor má výkon $160m^3/h$, při tomto průtoku vzduchu je hodnota $R_{TH(S-A)} = 0,115 K/W$. To znamená, že sestava s tímto chladičem nespĺňuje požadavky. Pokud se ovšem teplota okolí T_a sníží na $35^\circ C$, maximální přípustná hodnota $R_{TH(S-A)}$ je $0,119 K/W$ a tento parametr již chladič splňuje. Jelikož se nepředpokládá, že bude měnič někdy provozován při teplotě okolního prostředí $40^\circ C$ je možné k chlazení měniče použít tento chladič. Pro zvýšení účinnosti byly na boční strany chladiče vloženy hliníkové plechy, tím byl vytvořen uzavřený profil, který zajišťuje lepší proudění vzduchu okolo žeber.



Obrázek 52. Chladič P3_180

4.2.8 Návrh kapacity meziobvodu

Při regulaci proudu tekoucího zátěží je nutné, aby vstupní usměrněné napětí snižujícího měniče bylo v ideálním případě konstantní nebo aby co nejméně kolísalo. Prakticky se jako mezní hodnota kolísání tohoto napětí považuje 5 %. Potlačení kolísání, neboli zvlnění napětí se provádí paralelním připojením kondenzátorů mezi výstupní svorky usměrňovače a vstupní svorky snižujícího měniče. Tím vznikne tzv. napěťový meziobvod. Hodnota usměrněného napětí na výstupu šestipulsního usměrňovače je dána rovnicí (3.7), tedy při napájecím napětí 3x400V je střední hodnota usměrněného napětí $U_0=540V$. Vlastní frekvence šestipulsního usměrňovače je dána vztahem (4.1).

$$f_{usm} = p \cdot f = 6 \cdot 50 = 300Hz \quad (4.10)$$

p ... počet pulsů usměrňovače

f ... frekvence síťového napájecího napětí

Při 5% zvlnění napětí meziobvodu je maximální a minimální hodnota napětí dána vztahy (4.11) a (4.12).

$$U_{max} = U_0 + (0,025 \cdot U_0) = U_0 + 13,5 = 553,5V \quad (4.11)$$

$$U_{min} = U_0 - (0,025 \cdot U_0) = U_0 - 13,5 = 526,5V \quad (4.12)$$

Určení celkové potřebné kapacity meziobvodu je provedeno dle vztahu (4.14). Pro dosažení je nutné znát výstupní výkon měniče. Výstupní výkon určíme z uvažovaného maximálního výstupního napětí a proudu měniče dle vztahu (4.13).

$$P = U_{výst} \cdot I_{výst} = 120 \cdot 50 = 6000W \quad (4.13)$$

$$C_{min} = \frac{2 \cdot P}{(U_{max}^2 - U_{min}^2) \cdot f_{usm}} = 0,001371F \rightarrow 1,4mF \quad (4.14)$$

Následující výpočty jsou důležité pro správné proudové dimenzování kondenzátorů a následné vytvoření jejich sérioparalelní kombinace. Pokud jsou kondenzátory namáhány příliš vysokou hodnotou nabíjecího a vybíjecího proudu dochází k jejich nadměrnému zahřívání a tím i snižování jejich životnosti. Pro realizaci meziobvodu byly vybrány kondenzátory firmy Aerovox s kapacitou 3,3mF a maximálním napětím 385V. Tyto kondenzátory byly i přes svou zbytečně vysokou kapacitu použity, protože se nacházely v zásobách TUO - Ostrava. Ze čtyř kondenzátorů byla vytvořena sérioparalelním spojením kondenzátorové baterie s výslednou kapacitou 3,3mF. Při použití této kapacity bylo vypočteno zvlnění 2,1%.

Výpočet doby nabíjení:

$$t_c = \frac{\arccos\left(\frac{U_{min}}{U_{max}}\right)}{2\pi f} = 0,00065s \rightarrow 0,65ms \quad (4.15)$$

Výpočet doby vybíjení:

$$t_{DC} = \frac{1}{f_{usm}} - t_c = 0,002682s \rightarrow 2,68ms \quad (4.16)$$

Špičkový proud nabíjení:

$$I_{Cpeak} = C * \frac{(U_{max} - U_{min})}{t_c} = 57,53A \quad (4.17)$$

Špičkový proud vybíjení:

$$I_{DCpeak} = C * \frac{(U_{max} - U_{min})}{t_{DC}} = 13,95A \quad (4.18)$$

Efektivní hodnoty proudu (nabíjecí a vybíjecí):

$$I_{Crms} = \sqrt{I_{Cpeak}^2 * t_c * f_{usm}} = 25,41A \quad (4.19)$$

$$I_{DCrms} = \sqrt{I_{DCpeak}^2 * t_{DC} * f_{usm}} = 12,51A \quad (4.20)$$

Efektivní hodnota proudu zvlnění:

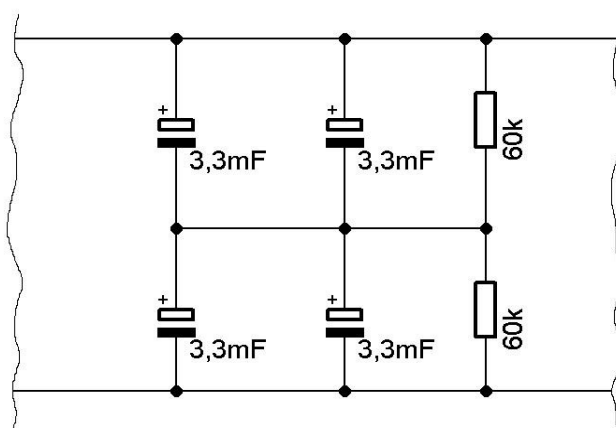
$$I_{rms} = \sqrt{I_{Crms}^2 + I_{DCrms}^2} = 28,33A \quad (4.21)$$

Důležitým parametrem při proudovém dimenzování je efektivní hodnota proudu zvlnění. Výrobce udává pro každý kondenzátor maximální hodnotu tohoto proudu. Protože jsou kondenzátory zapojené podle obrázku 53 v paralelní kombinaci se tento proud rozdělí rovnoměrně mezi paralelní větve. Takže výsledná hodnota proudu zvlnění jedním kondenzátorem je 14,165A. Maximální hodnota proudu udávaná výrobcem pro kondenzátory použité v meziobvodu je přibližně 12A při 85°C. Pro teplotu 50°C uvádí výrobce multiplikátor proudu zvlnění 2,1. To znamená, že pokud nebudou kondenzátory extrémně tepelně namáhány, splňují požadavek proudového dimenzování.

Maximální hodnota napětí na kondenzátoru při sériovém řazení dvou kondenzátorů s tolerancí 20%, které jsou připojeny mezi napětí $U_0=540V$.

$$U_{CAP} = \frac{U_0 * 1,2}{1,2+0,8} = \frac{672}{2} = 336V \quad (4.22)$$

Z výsledku rovnice (4.22) je zřejmé, že použité kondenzátory splňují také požadavek napět'ového dimenzování.



Obrázek 53. Schéma meziobvodu s balančními odpory

4.2.9 Jištění výkonové části měniče

Vstupní část nabíječe je tvořena můstkovým usměrňovačem SKD 50 s jmenovitým proudem 50A a hodnotou maximálního přetěžovacího integrálu $I^2t = 1800 \text{ A}^2\text{s}$ při 150°C. Aby byl usměrňovač ochráněn proti zkratu meziobvodu je nutné použít pojistky s nižší hodnotou I^2t než je maximální hodnota I^2t modulu SKD50. Tento požadavek splňují nožové pojistky firmy OEZ typu P51R06 50A gR s hodnotou $I^2t = 1050 \text{ A}^2\text{s}$ a maximálním trvalým proudem 50A. Každá ze tří fází je jištěna samostatně. Pojistky jsou osazeny v odpínačích nožových pojistkových vložek FH000, které vyrábí také firma OEZ. Modul IGBT tranzistoru SKM75 je jištěn samotným budičem. Pokud dojde na výstupu modulu ke zkratu, budič vyhodnotí proudové přetížení a zablokuje spínání IGBT tranzistoru.

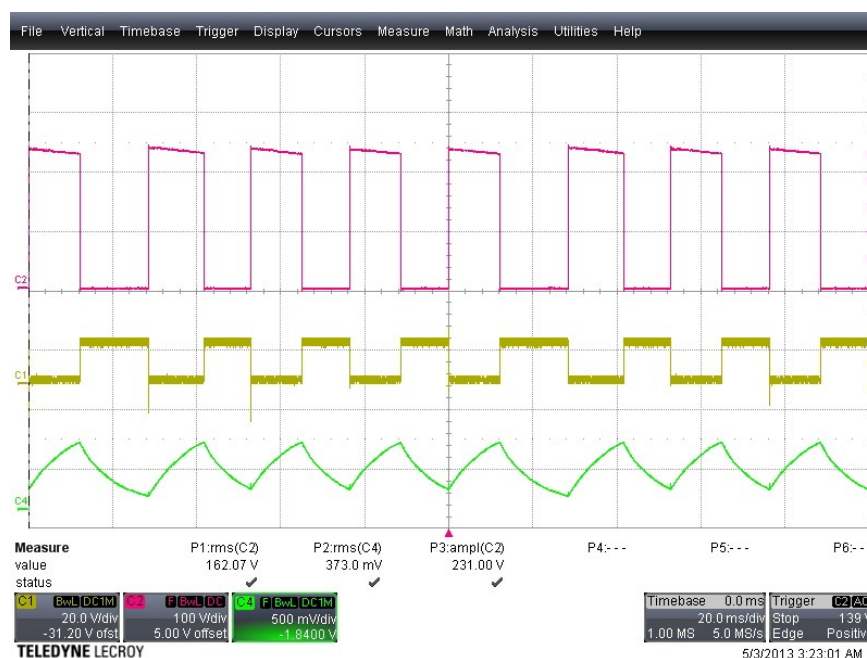
4.2.10 Zdroj pro řídicí elektroniku

K napájení DPS1, DPS2, řídicí části a budiče byl použit klasický zdroj s transformátorem. Tento zdroj se nalézal již hotový na katedře elektroniky a svými výstupními napětími splňoval požadavky na napájení. Výstupní napětí tohoto zdroje jsou: +15V – GND, +5V – GND, +15V – GND – 15V. Výkon transformátoru činí 70VA. Napájecí napětí tohoto zdroje je 230V stř. A je jištěn přístrojovou pojistkou zapojenou sériově s primárním vinutím.

4.2.11 Výsledky měření

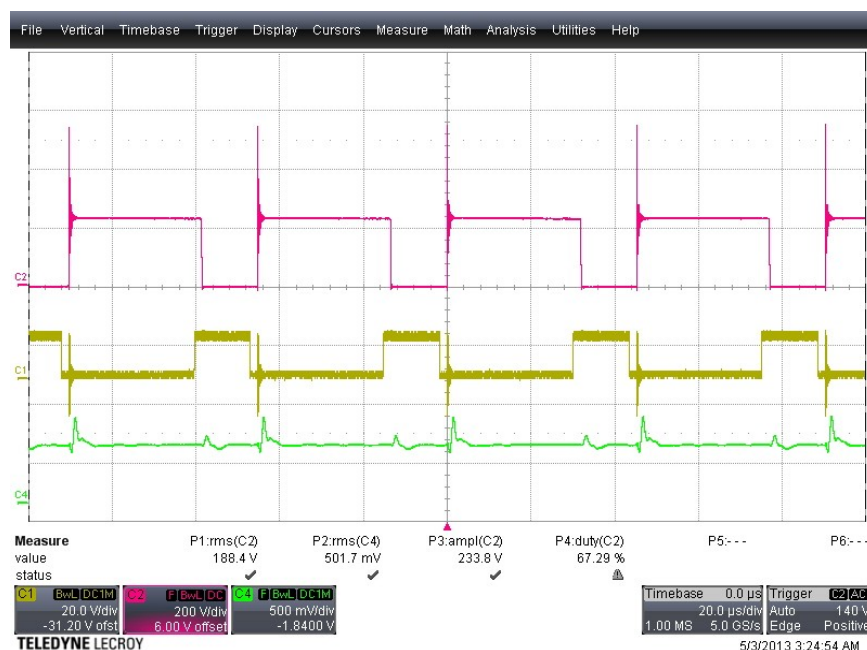
Pro napájení nabíječky byl použit oddělovací transformátor s plynulou regulací výstupního třífázového napětí. Hlavním důvodem pro použití tohoto transformátoru je absence obvodu, který by přednabíjel kondenzátory v meziobvodu. Pokud by došlo k připojení nabíječky přímo k rozvodné síti, nabíjecí proud kondenzátoru by se projevil jako zkratový a došlo by k vybavení ochran rozvodné sítě. Funkčnost nabíječky byla nejprve ověřována na RL zátěži. Odpor zátěže byl 32Ω a indukčnost 3,6mH, přičemž jmenovitý maximální proud odporníku činil 6A.

Na obrázku 54 jsou zobrazeny průběhy napětí a proudů při režimu řízení s konstantním proudem. Průběh napětí na zátěži je znázorněn červenou barvou. Řídicí napětí připojené na vstup budiče je znázorněno žlutou barvou. Průběh proudu tekoucího zátěží má zelenou barvu. Hodnota P1 vyjadřuje efektivní hodnotu napětí na zátěži. Hodnota P2 vyjadřuje hodnotu proudu. Pro měření proudu byla použita proudová sonda s nastaveným převodem 100mV/A. To znamená, že hodnota 373mV vyjadřuje efektivní hodnotu proudu 3,73A. Hodnota P3 je amplituda napětí na zátěži a tato hodnota je shodná s hodnotou napětí meziobvodu.



Obrázek 54. Průběhy při RL zátěži (aktivní proudový režim)

Na obrázku 55 jsou zobrazeny průběhy napětí a proudů při „napětovém režimu“ řízení nabíječky. Barevné označení průběhů je stejné jako na obrázku 54. Nejvíce patrný je rozdíl mezi průběhy proudu. Při řízení v napětovém režimu nedochází k tak výraznému zvlnění proudu, jelikož spínací frekvence je mnohonásobně vyšší než při řízení v „proudovém režimu“. Dále je z obrázku 55 patrné, že požadavek na větší efektivní hodnotu napětí na zátěži při stejném napětí meziobvodu, je realizován zvětšením doby sepnutí IGBT tranzistoru. Samozřejmě, že pokud se zvětší hodnota napětí na RL zátěži, zvětší se také proud tekoucí zátěži.

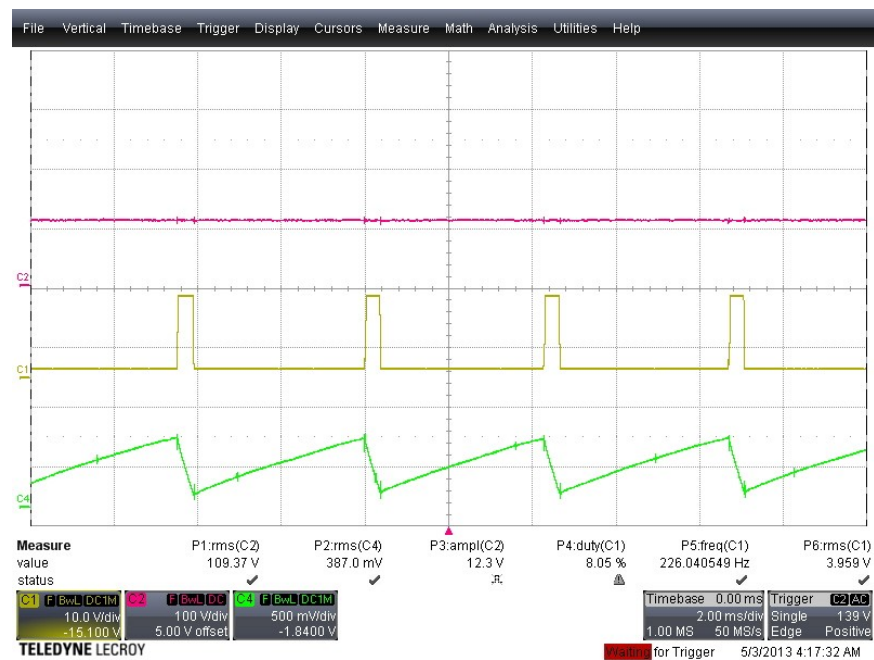


Obrázek 55. Průběhy při RL zátěži (aktivní napětový režim)

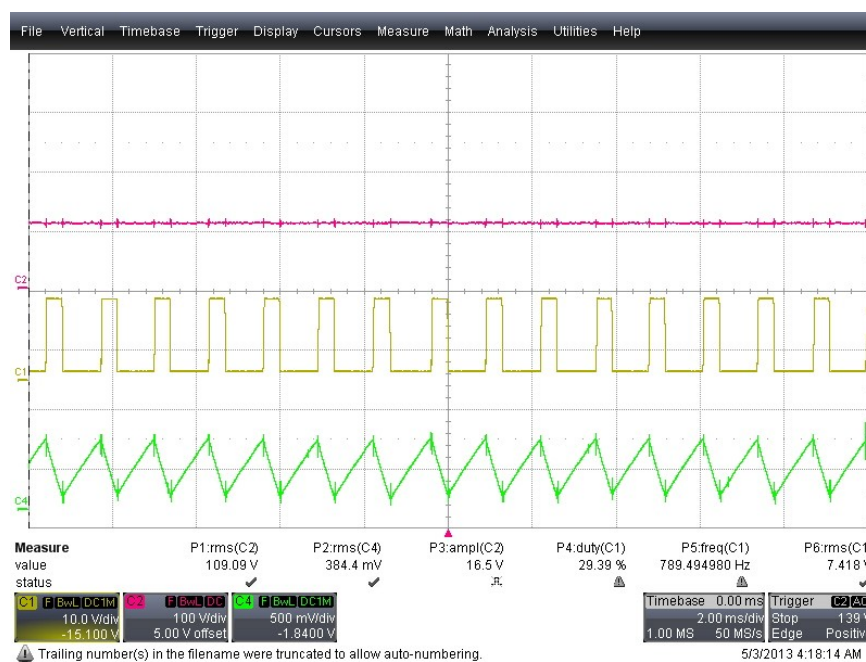
Měření s připojeným akumulátorovým blokem

Měření bylo prováděno na zátěži, kterou tvořil akumulční blok a k tomuto bloku sériově zapojená indukčnost 3,6mH. Z důvodu neprovedení zformování akumulátorů, byly při měření používány nízké nabíjecí proudy a rychlost jejich změn byla omezena již zmíněnou indukčností. Před samotným připojením akumulátorového bloku k nabíječce bylo nutné nabít kondenzátory meziobvodu na hodnotu napětí tohoto bloku. Pokud by se tak nestalo, kondenzátory by se nabíjely z akumulátorového bloku přes nepoužívanou diodu v IGBT modulu (dioda D1 na obrázku 37). Nabíjecí proud by byl na okamžik téměř roven zkratovému proudu akumulátorového bloku. To by vedlo k poškození IGBT modulu nebo samotných kondenzátorů.

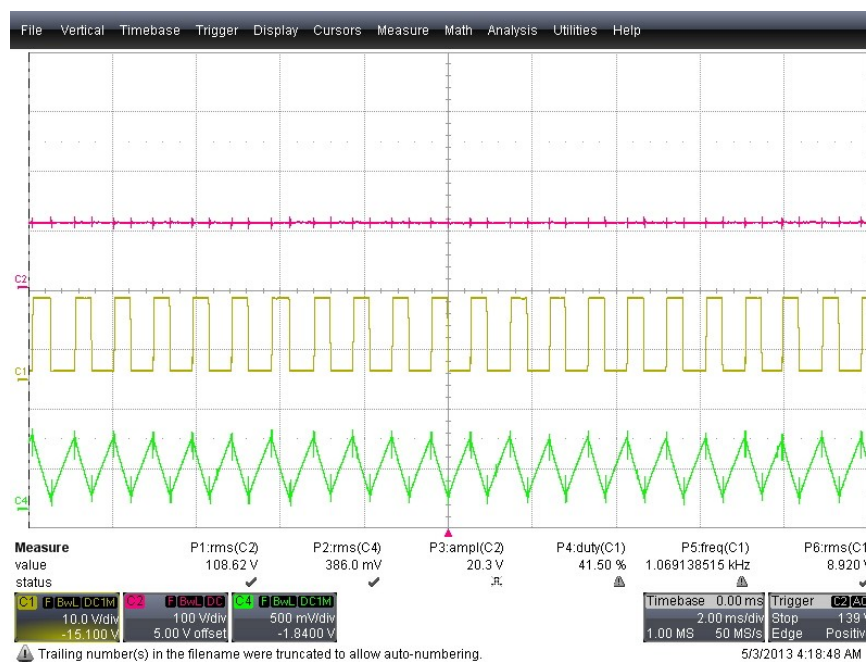
Na obrázku 56 je červeně znázorněn průběh napětí na akumulátorovém bloku (číselnou hodnotu udává P1). Žlutě je znázorněn průběh řídicího napětí (ukazatel P4 zobrazuje hodnotu střídy a P5 zobrazuje hodnotu spínací frekvence). Zeleně je znázorněn průběh proudu tekoucího zátěží (nabíjecí proud akumulátorového bloku). Ukazatel P2 zobrazuje efektivní hodnotu proudu zátěže (387mV odpovídá proudu 3,87A). Barevné značení průběhů a vyjádření hodnot ukazateli platí také pro obrázky 57 a 58.



Obrázek 56. Průběhy napětí a proudů během nabíjení, při napětí meziobvodu 120V.



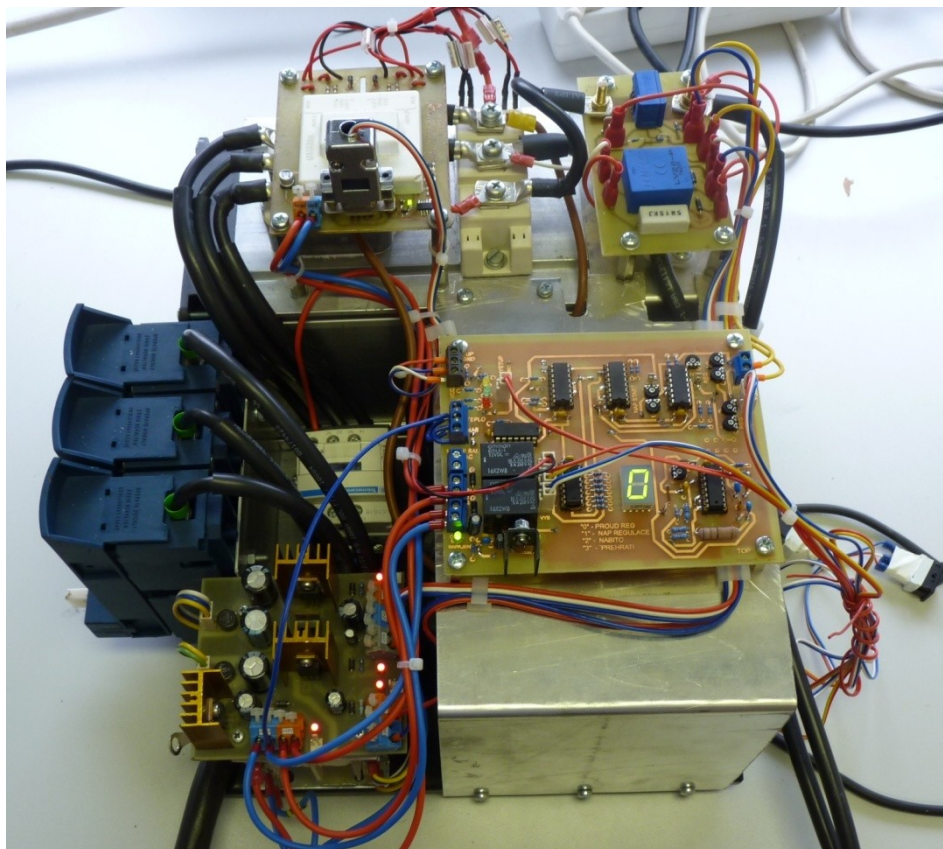
Obrázek 57. Průběhy napětí a proudů během nabíjení, při napětí meziobvodu 150V.



Obrázek 58. Průběhy napětí a proudů během nabíjení, při napětí meziobvodu 200V.

Z obrázků 56, 57 a 58 vyplývá, že efektivní hodnota nabíjecího proudu zůstává na nastavené úrovni i při změnách napětí meziobvodu. S tím také souvisí změna frekvence a střídý řídicího signálu.

Pohled na nabíječku



Obrázek 59. Pohled shora na nabíječku

5. Závěr

Úkolem diplomové práce bylo navrhnout a realizovat nabíječ, kterým bude nabíjen LiFePO_4 akumulátorový blok, a který bude spolupracovat s balančními jednotkami akumon. Pro zajištění této spolupráce bylo nejdříve nutné navrhnout a realizovat balanční sestavu, která zajišťuje chlazení balančních jednotek a zpracování informací o provozních stavech balančních jednotek. Balanční sestava tak tvoří rozhraní mezi nabíječem a samotnými akumulátory. Následně již bylo možné navrhnout a realizovat samotný nabíječ. Ten je tvořen usměrňovačem a snižujícím měničem s napěťovým meziobvodem. Celková koncepce řízení nabíječe a využití funkcí balančních jednotek akumon zajišťují bezpečný provoz akumulátorového bloku s maximálním využitím životnosti akumulátorů. Nabíječ je dimenzován tak, aby mohly být maximálně využity přednosti LiFePO_4 akumulátorů.

Důležité části řídicího systému byly simulovány v programu Multisim 11. Schémata a desky plošných spojů byly kresleny v programu Eagle 5.6.0. Návrh meziobvodu byl podřízen výběru kondenzátorů dostupných ze zásob katedry elektroniky. Chlazení nabíječe je mírně předimenzováno, tudíž je možné nabíječ krátkodobě přetěžovat. Nabíječ i balanční sestava jsou funkční, což dokazují změřené průběhy v poslední kapitole realizační části, avšak nebylo provedeno definitivní nastavení nabíjecích proudů, maximálního nabíjecího napětí a maximální teploty akumulátorového bloku. Za účelem návrhu a následné realizace bylo nutné aplikovat široké spektrum znalostí z oblasti elektroniky. Během vypracování této práce bylo potvrzeno, že realizační část je velmi časově náročná.

Budoucí vývoj tohoto projektu spatřuji ve vyřešení přednabíjení kondenzátorů v meziobvodu a vytvoření krytu nabíječe. S vytvořením krytu nabíječe by bylo nutné také navrhnout uživatelské rozhraní, které by řešilo ovládání a indikaci provozních stavů nabíječe. Tato diplomová práce má spojitost se současně vyvíjenými i již realizovanými měniči pro napájení elektrických pohonů. Akumulátorový blok bude využíván jako napájecí zdroj těchto měničů, který pokryje i vysoké špičkové proudové zatížení, čehož při napájení z klasických stejnosměrných zdrojů nelze dosáhnout.

6. Seznam použité literatury:

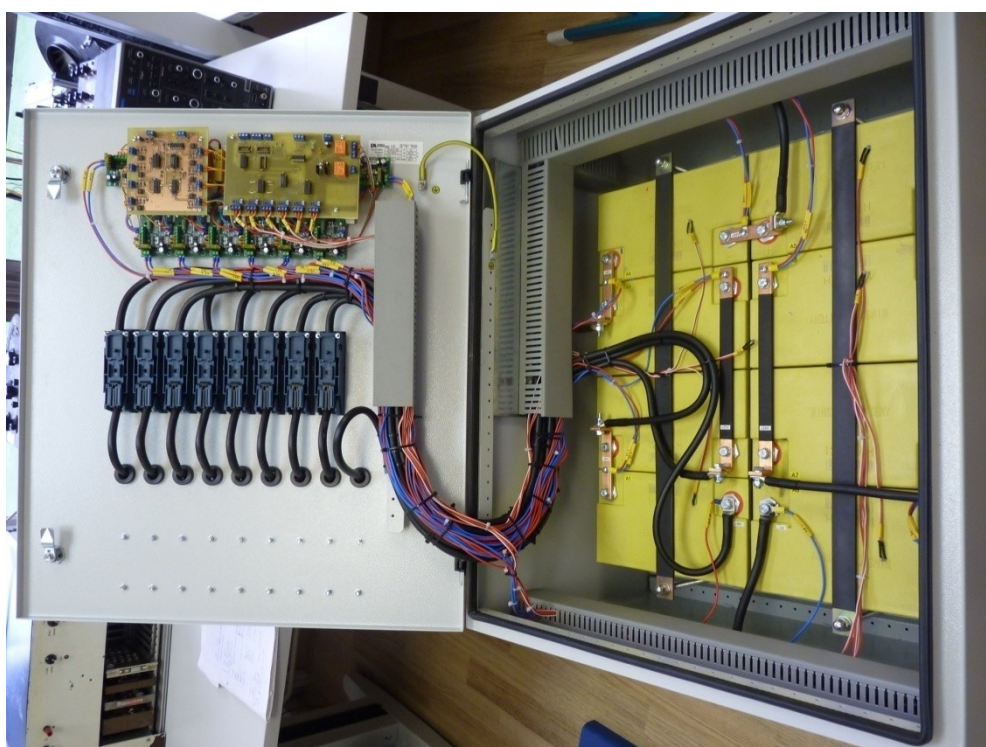
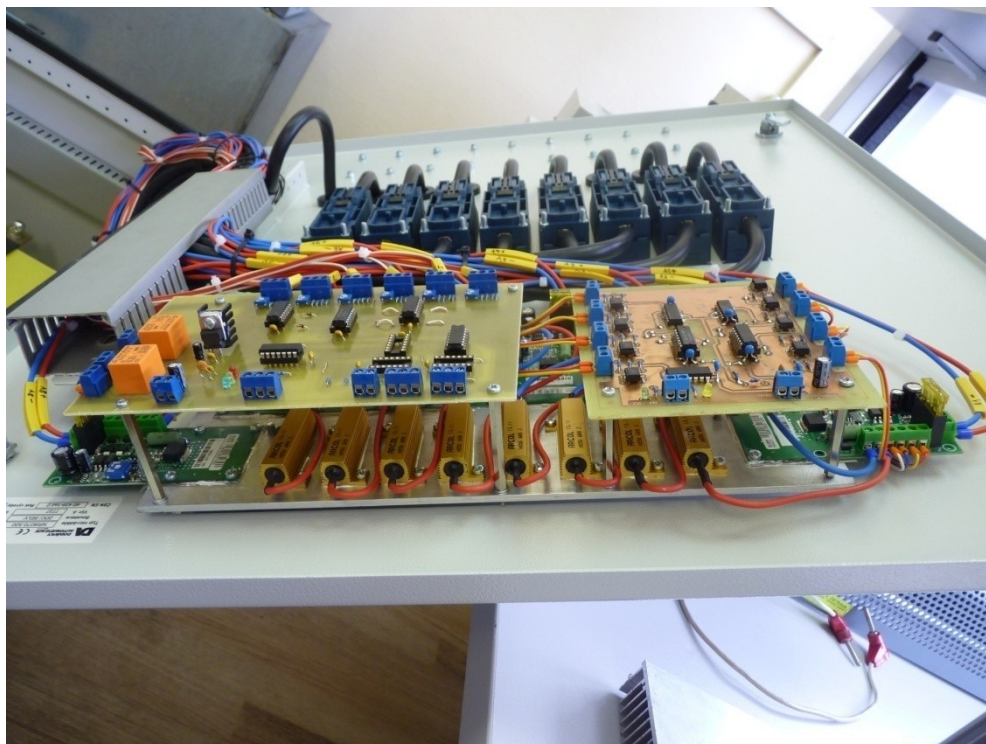
- [1] PAČINEK, David. *Alternativní napájení pro senzorové sítě* [online]. Brno, 2012 [cit. 2013-05-06]. 76 l. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/17518>. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Ondřej Hynčica.
- [2] KRISTEK, Václav. *Nabíjecí měnič bateriového packu LiFePO4* [online]. Ostrava, 2010 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/78570>. Diplomová práce. VŠB-TUO. Vedoucí práce prof. Ing. Petr Chlebiš, CSc.
- [3] BATTEX, spol. s r. o. *Nabíjení hermetických NiCd akumulátorů* [online]. 2009 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://www.battex.info/?id=90>
- [4] CENEK, Miroslav. *Akumulátory od principu k praxi*. Praha: FCC Public, 2003, 248 s. ISBN 80-865-3403-0.
- [5] Katalog. FULGUR BATTMAN, spol. s r.o. [online]. 2010 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://www.fulgurbattman.cz/data/podpora/katalog-fulgur-battman-2012.pdf>
- [6] Battery balancing. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2009 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Battery_balancing#cite_note-2
- [7] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika: měniče s vnější komutací*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1994, 149 s. ISBN 80-708-2137-X
- [8] LATOCHA, Jakub. *Modernizace laboratorních úloh z předmětu Principy zařízení komerční elektroniky*. [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/87443>. Bakalářská práce. VŠB-TUO.
- [9] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika: Měniče s vlastní komutací a bez komutace*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, Elektrotechnická fakulta, 1998, 252 s. ISBN 80-708-2485-9.
- [10] The Akumon 12V LP battery monitor board. [online]. 2011 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://gwl-power.tumblr.com/tagged/Akumon>

- [11] Datalist modulu SKM75GB123D. *WWW.SEMIKRON.COM* [online]. 2009 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://www.semikron.com/products/data/cur/assets/SKM75GAL123D_22890019.pdf
- [12] Datalist modulu SKD 50. [online]. 1998 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://www.datasheets.pl/bridge_rectifiers/SKB50.pdf
- [13] Datalist čidla proudu CKSR 50. *Http://www.lem.com* [online]. 2012 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://www.lem.com/docs/products/cksr%20serie.pdf>
- [14] Datalist čidla napětí LV 20-P. *Http://www.lem.com* [online]. 2002 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/LEM%20USA%20PDFs/LV%2020-P.pdf>
- [15] Vaculik P., Hlavní střídač pohonu elektromobilu s vodním chlazením. VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, Ostrava

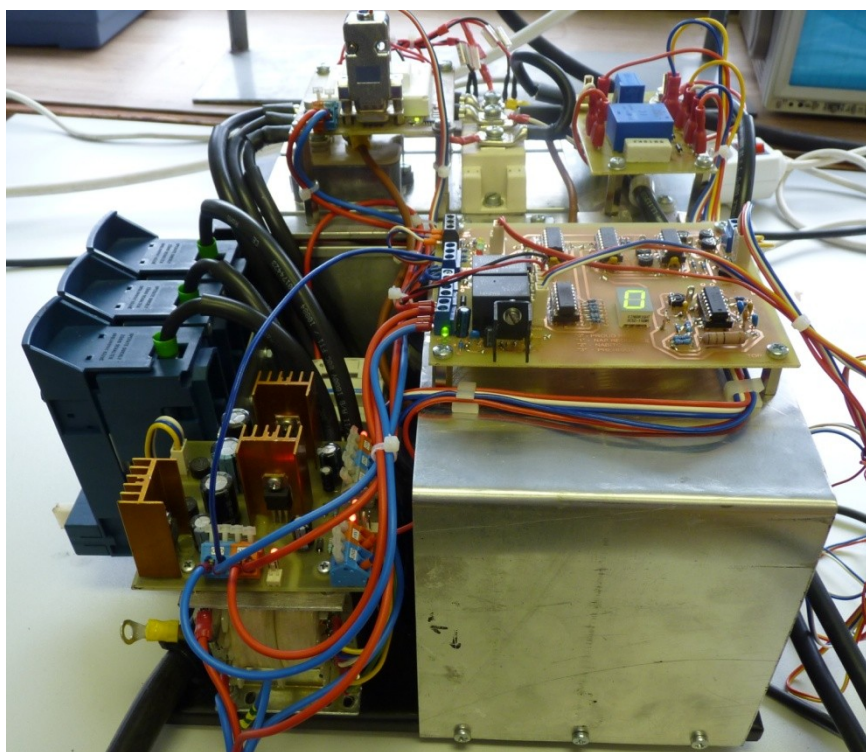
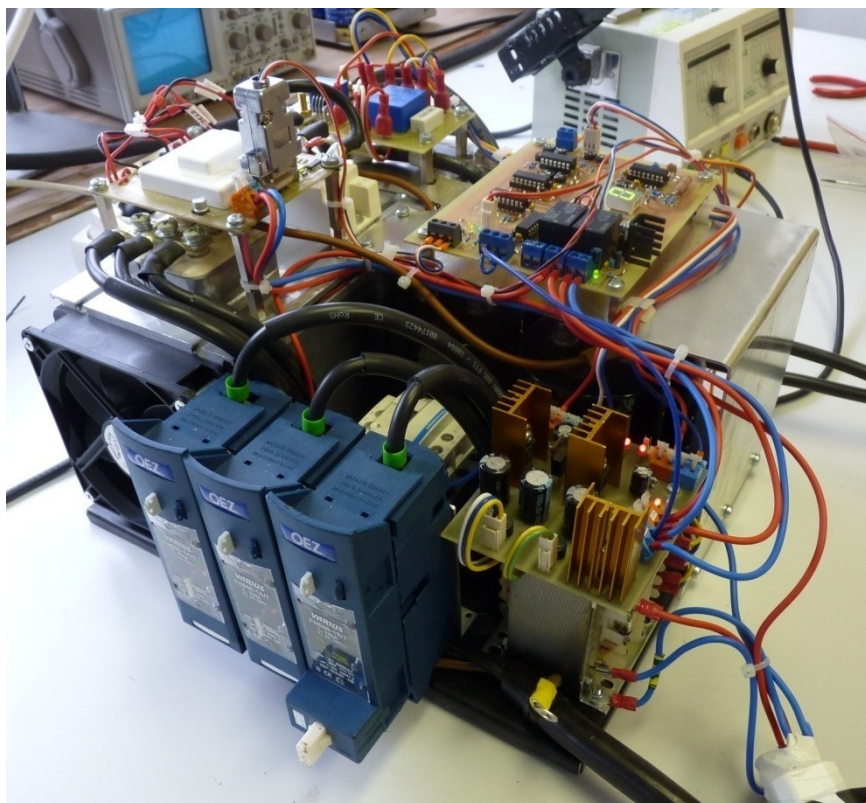
7. Seznam příloh

- Příloha 1: Fotografie balanční sestavy
- Příloha 2: Fotografie nabíječky
- Příloha 3: Balanční sestava DPS1 – schéma
- Příloha 4: Balanční sestava DPS1 – DPS, rozmístění součástek
- Příloha 5: Balanční sestava DPS2 – schéma
- Příloha 6: Balanční sestava DPS2 – DPS (top, bottom)
- Příloha 7: Balanční sestava DPS2 – rozmístění součástek
- Příloha 8: Čidlo napětí a proudu - schéma, DPS, rozmístění součástek
- Příloha 9: Blok řízení – schéma
- Příloha 10: Blok řízení - DPS (top), DPS (bottom)
- Příloha 11: Blok řízení – Rozmístění součástek

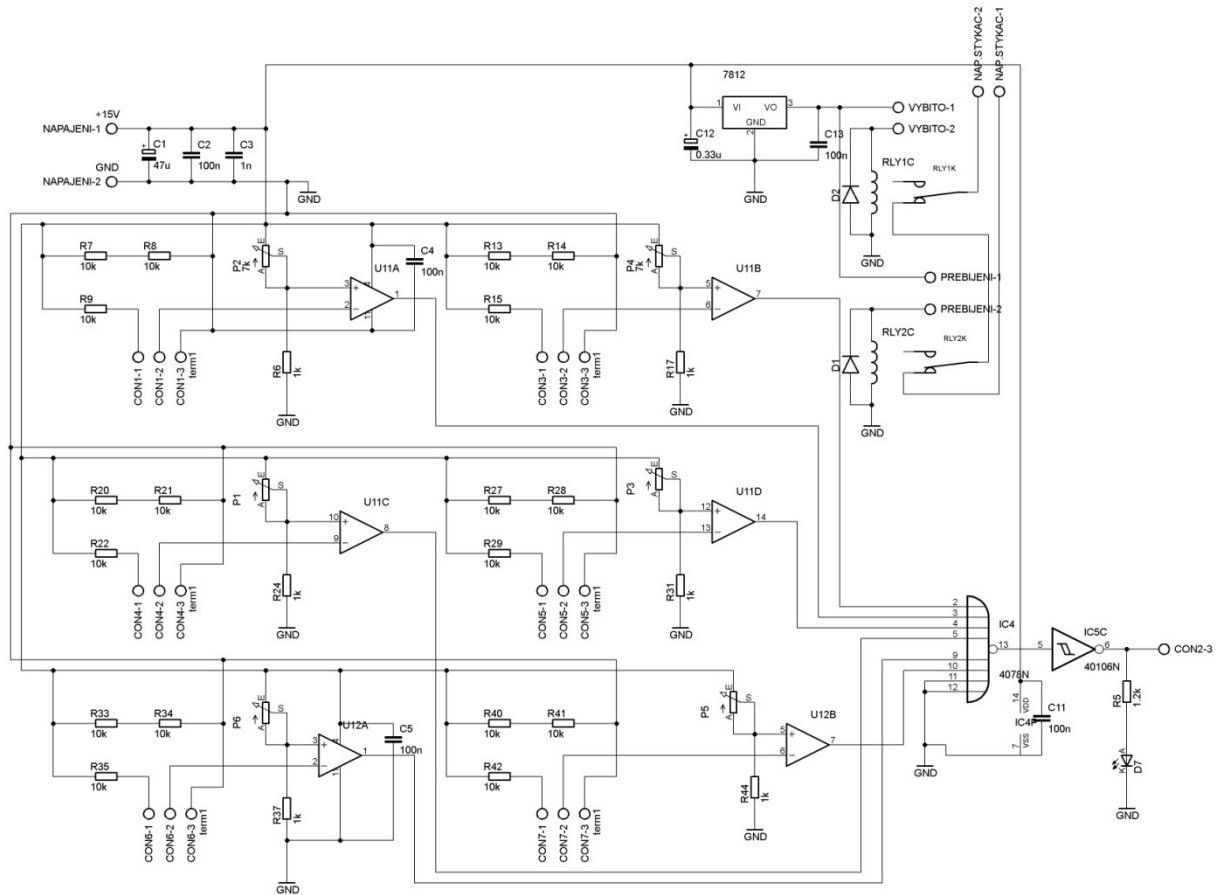
Fotografie balanční sestavy:



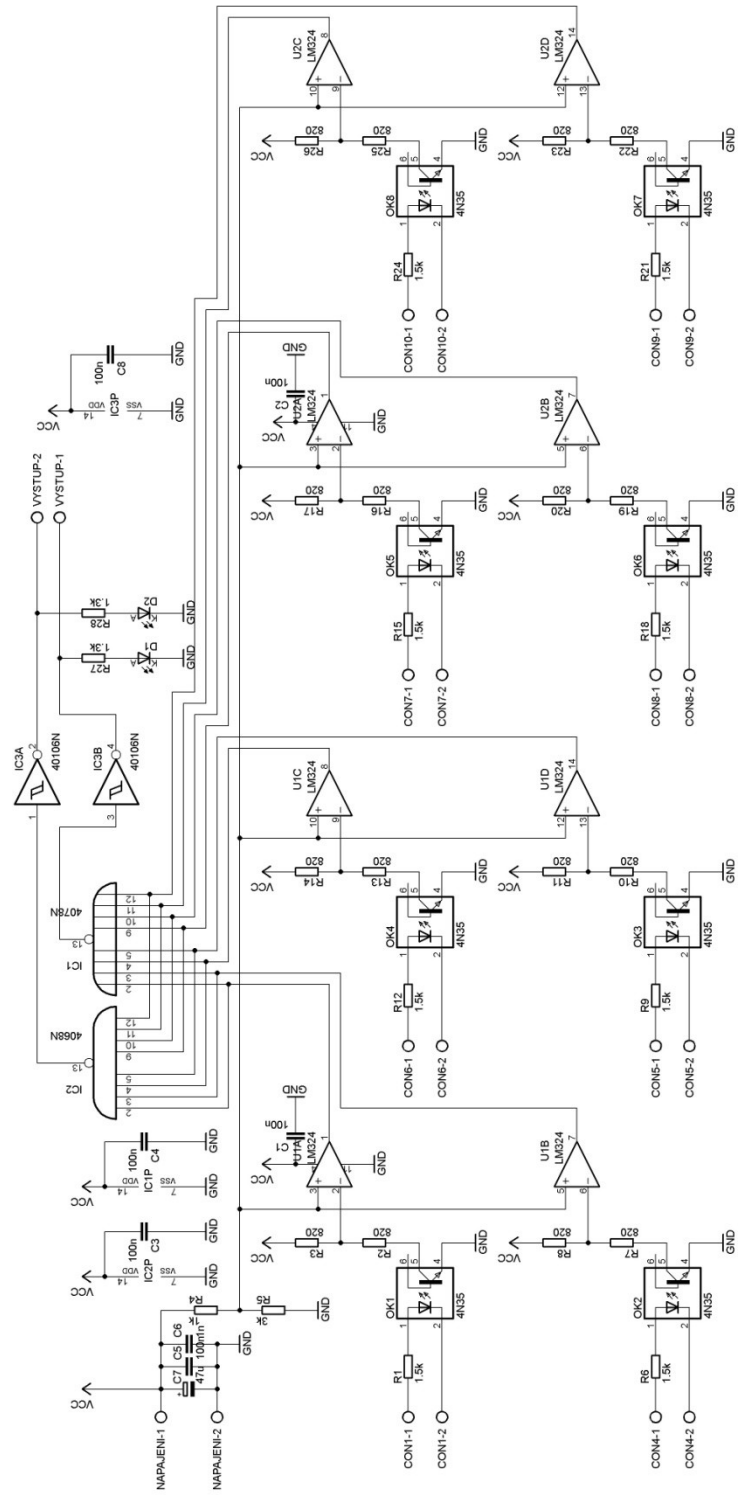
Fotografie nabíječky:



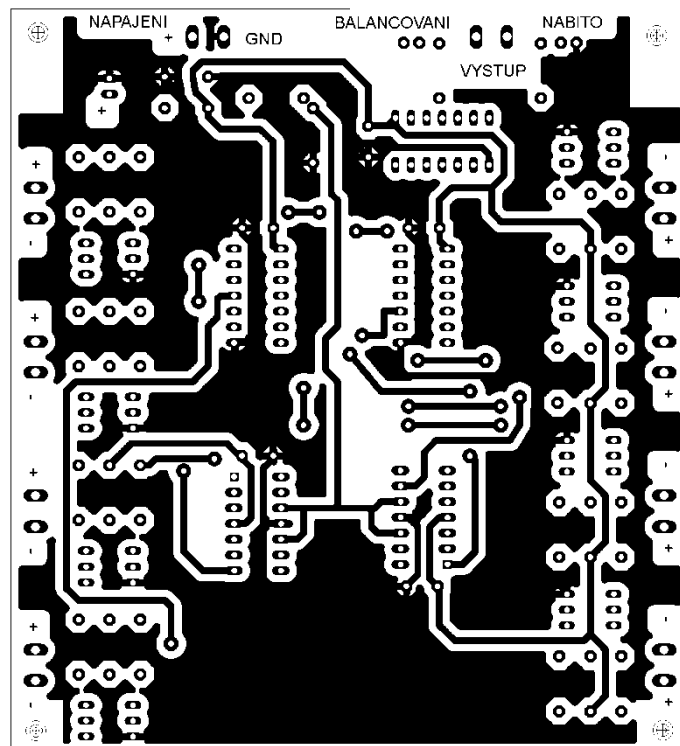
DPS 1 schéma:



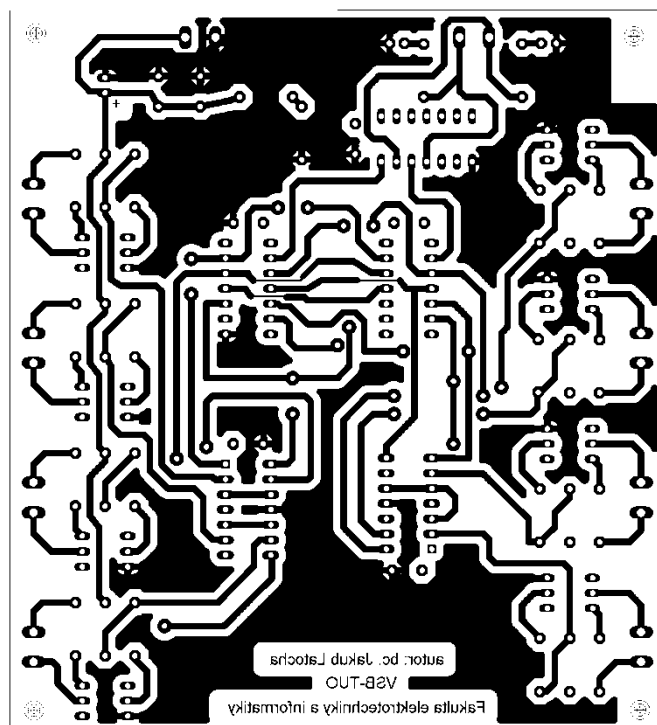
DPS2 schéma:



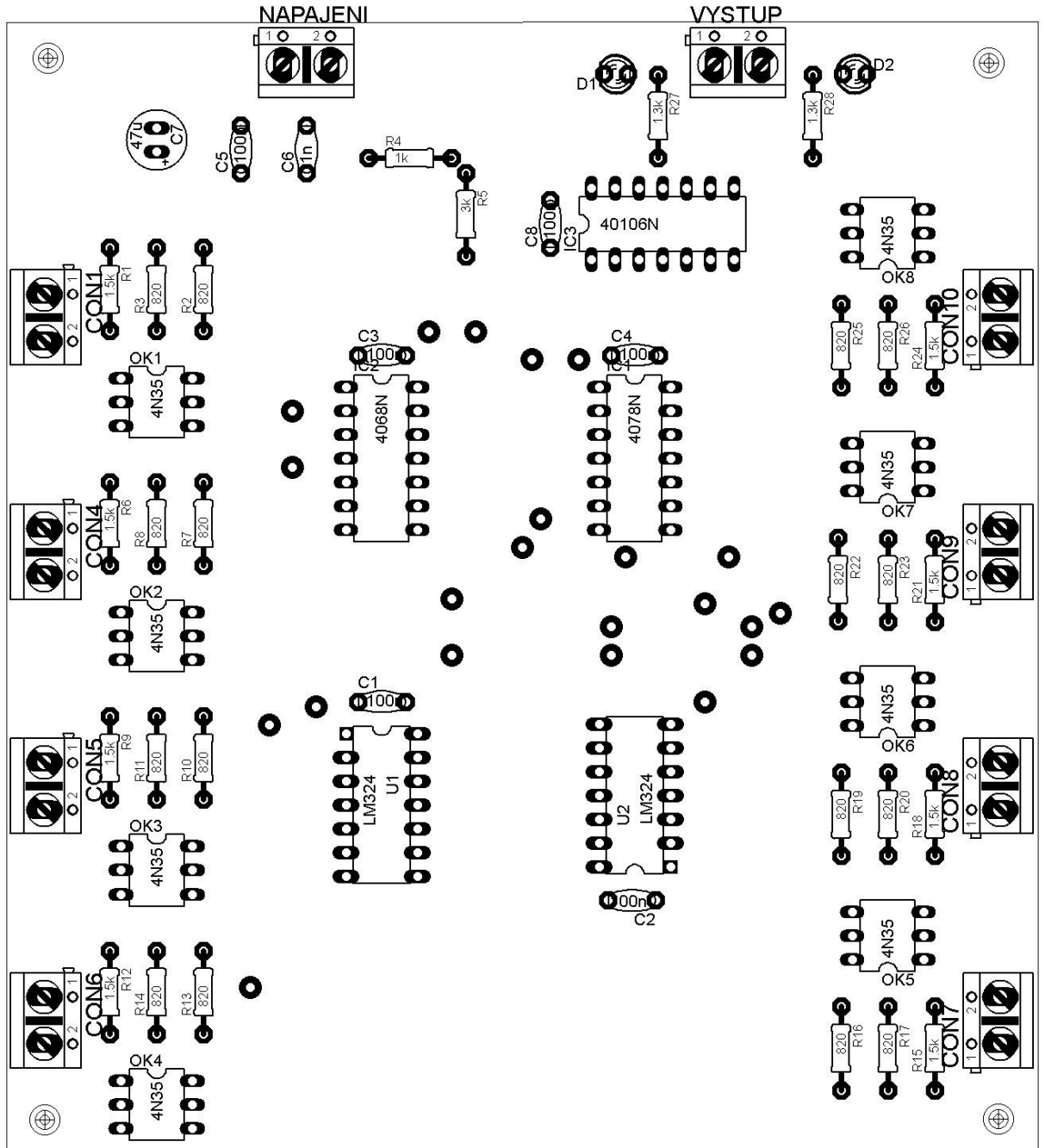
DPS2 top:



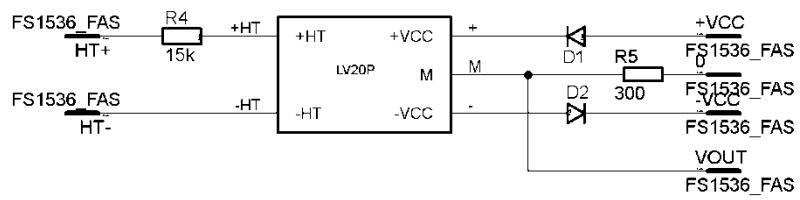
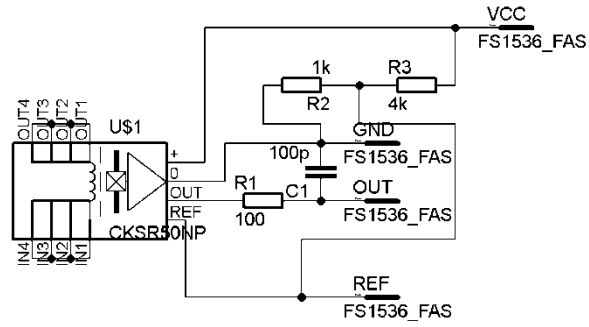
DPS2 bottom:



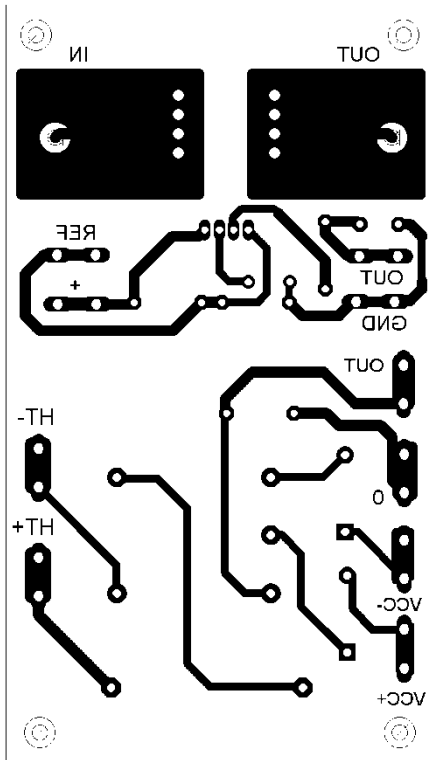
DPS2 rozmístění součástek:



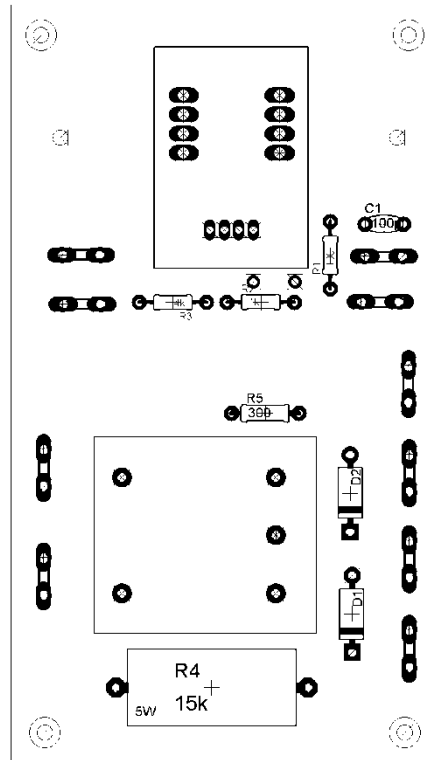
Čidlo napětí a proudu schéma:



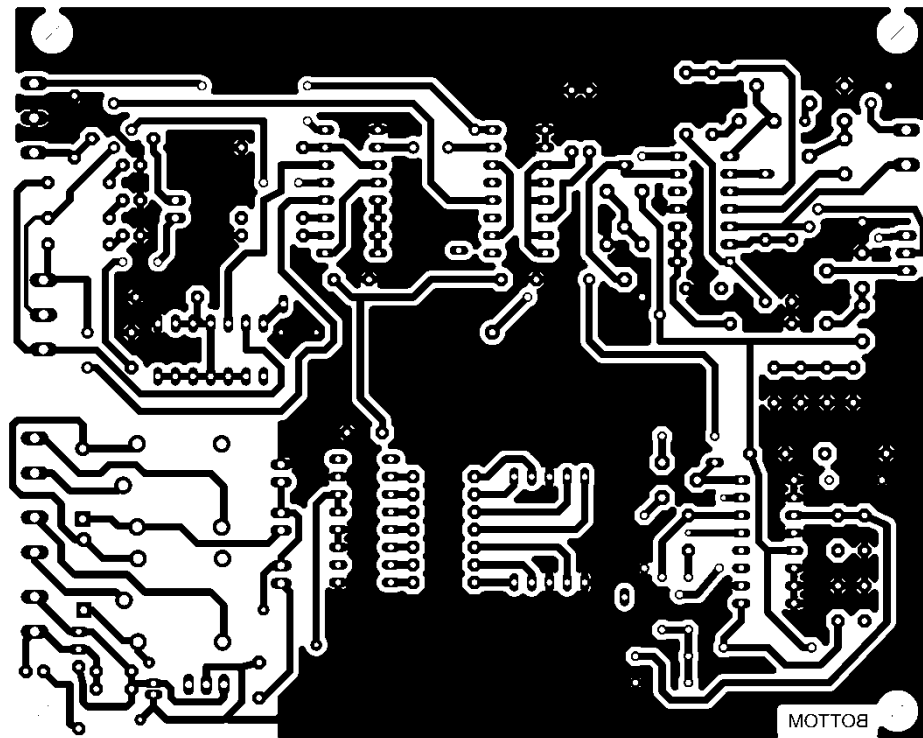
Čidlo napětí a proudu DPS(bottom):



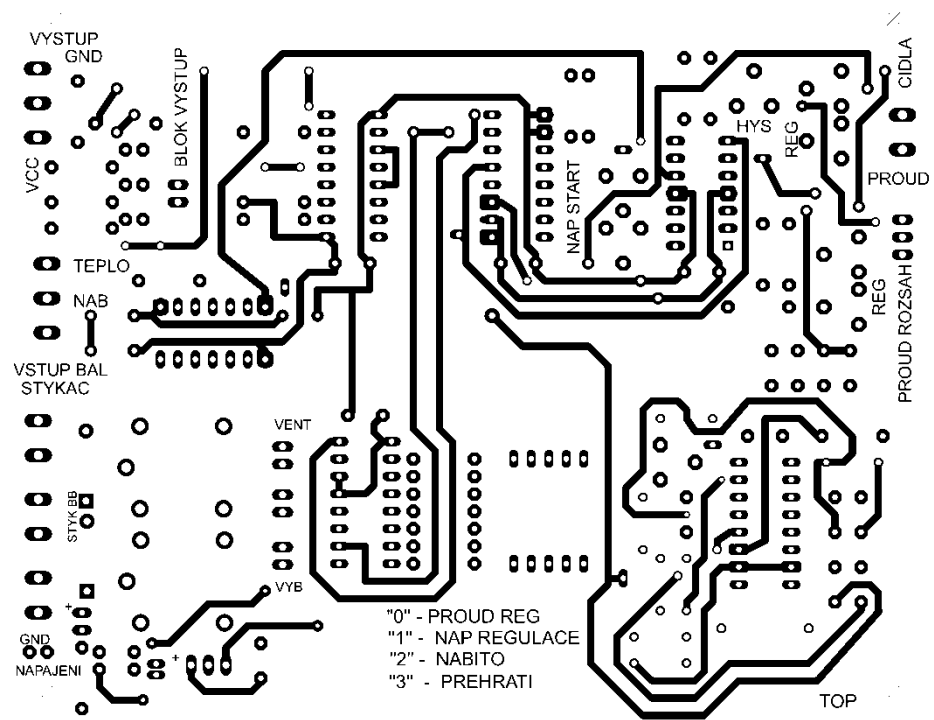
Čidlo napětí a proudu rozmístění součástek:



Blok řízení DPS(bottom):



Blok řízení DPS(top):



Blok řízení rozmístění součástek:

