



**FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI**

DISERTAČNÍ PRÁCE

PLZEŇ, 2011

Ing. Michal Hrubec



FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI

DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu doktor
v oboru

Elektronika

Ing. Michal Hrubec

Nabíjecí technika a nabíjecí algoritmy

Školitel: doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

Datum státní doktorské zkoušky: 12.10.2009

Datum odevzdání práce: 04.2011

V Plzni, 2011

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě disertační práci zpracovanou v rámci doktorského studia na Fakultě Elektrotechnické, katedře Aplikované elektrotechniky a telekomunikací Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu použité literatury, který je součástí této práce.

V Plzni 4.2011

.....
Michal Hrubec

Poděkování

Děkuji touto cestou všem pedagogům a pracovníkům Západočeské univerzity, se kterými jsem se během uplynulých let setkal, za vědomosti a dovednosti, které jsem díky nim získal, svému školiteli doc. Ing. Jiřímu Hammerbauerovi, Ph.D. za podnětné rady a připomínky při zpracovávání této práce a všem spolupracovníkům a svým blízkým za vytvoření pracovních podmínek, které umožnily dokončení této práce.

Anotace

Tato disertační práce se zabývá problematikou současné nabíjecí techniky a nabíjecích algoritmů. Cílem je praktické řešení návrhu nového nabíjecího zařízení. Teoretická část práce popisuje elektrochemické články. Hlavní kapitola prezentuje používané konstrukční zapojení jednotlivých modulů nabíjecího zařízení v porovnání s vyvinutými zapojeními, které jsou vhodné ke konstrukci moderních univerzálních nabíjecích zařízení. Další kapitola se zaměřuje na nabíjecí algoritmy různých článků a zároveň i na celou strukturu programového vybavení nabíjecího zařízení. Práce se specializuje na spolupráci konstrukční a programové části s pozitivním dopadem na přehlednost programu a paměťové nároky. Dále jsou naměřeny výsledky chování navrženého zařízení.

Klíčová slova

Nabíjení, nabíjecí zařízení, nabíjecí algoritmus, sekundární článek, bateriová sestava, vnitřní elektronika.

Abstract

This thesis deals with contemporary charging techniques and charging algorithms. The aim of the thesis is a practical solution of design of new charging equipment. The theoretical part of the thesis describes electrochemical cells. The main chapter presents applied construction schemes of particular modules of the charging equipment. These are compared with designed schemes that are suitable to construction of modern universal charging equipments. The next chapter focuses on charging algorithms of different cells and all the structure of a charging equipment program. The thesis is also specialized to cooperation of the hardware and software parts with a positive effect on a transparency of the program and memory demands. The last section shows the results of the designed equipment.

Key words

Charging, charger, charging algorithm, secondary cell, battery pack, internal electronics.

Seznam symbolů

C_B	[Ah]	Kapacita baterie
ΔU	[V]	Napěťový pokles – české značení
ΔV	[V]	Napěťový pokles – anglické značení
f	[Hz]	Frekvence
I_t	[A]	referenční proud baterie
η	[%]	Účinnost
P	[W]	Výkon
P_0	[W]	Vstupní příkon
P_{NAB}	[W]	Nabíjecí výkon
R_I	[Ω]	Váhový rezistor
R_{IN}	[Ω]	Vnitřní odpor baterie
R_{REF}	[Ω]	Referenční rezistor
t	[s]	Čas
t_A	[s]	Aktivní doba pulsu
t_N	[s]	Neaktivní doba pulsu
t_{START_MAX}	[s]	Maximální čas pro další spuštění
t_{START_MIN}	[s]	Minimální čas pro další spuštění
t_{STOP}	[s]	Doba pro ukončení nabíjení
T	[$^{\circ}C$]	Teplota
U_{BAT}	[V]	Napětí baterie
U_{DELTA}	[V]	Napěťový pokles
U_{HYST}	[V]	Napěťová hystereze
$U_{I,0}$	[V]	Napětí baterie bez proudu
$U_{I,NAB}$	[V]	Napětí baterie s proudem
U_{IN}	[V]	Vstupní napětí
U_{MAX}	[V]	Maximální napětí
U_{MAX_IN}	[V]	Maximální vstupní napětí
U_{MAX_LIION}	[V]	Maximální napětí pro Li-Ion bateriovou sestavu
U_{MAX_NAB}	[V]	Maximální nabíjecí napětí
U_{MAX_NIMH}	[V]	Maximální napětí pro NiMH bateriovou sestavu
$U_{MAX_NIMH_CELL}$	[V]	Maximální napětí NiMH článku během nabíjení
U_{MAX0}	[V]	Maximální výstupní napětí
$U_{MAX80\%}$	[V]	Maximální výstupní napětí při specifických podmínkách
U_{MIN}	[V]	Minimální napětí
U_{MIN_LIION}	[V]	Minimální napětí pro Li-Ion bateriovou sestavu
U_N	[V]	Jmenovité napětí, nominální napětí
U_{NAB}	[V]	Nabíjecí napětí
U_{NEB}	[V]	Nebezpečné napětí
U_{REF}	[V]	Referenční napětí
U_{START}	[V]	Napětí pro spuštění nabíjení
U_{ZD}	[V]	Napětí Zenerovy diody

Obsah

1	ÚVOD	1
2	CÍL PRÁCE	6
3	SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	7
4	ELEKTROCHEMICKÉ AKUMULÁTORY	11
4.1	NABÍJECÍ METODY LI-ION A LI-POL ČLÁNKŮ	12
4.2	NABÍJECÍ METODY NiCd A NiMH ČLÁNKŮ	13
4.3	NABÍJECÍ METODY Pb ČLÁNKŮ	20
4.4	KOMPLETOVÁNÍ ČLÁNKŮ DO BATERÍ.....	21
4.5	FUNKČNÍ VYBAVENÍ BATERIE	23
4.6	OCHRANNÉ VYBAVENÍ BATERÍ	25
5	TECHNICKÉ VYBAVENÍ NABÍJECÍCH SYSTÉMŮ	28
5.1	POŽADOVANÉ VLASTNOSTI NABÍJECÍCH SYSTÉMŮ	29
5.2	PRIMÁRNÍ USPOŘÁDÁNÍ	31
5.2.1	<i>Systémy napájené síťovým napětím AC/DC</i>	37
5.2.2	<i>Systémy napájené nízkým stejnosměrným napětím DC/DC</i>	39
5.3	SAMOČINNÉ NABÍJECÍ SYSTÉMY	41
5.4	REGULAČNÍ A OVLÁDACÍ ČÁSTI ŘÍZENÉ PROCESOREM	44
5.4.1	<i>Využití hardwarového vybavení procesoru</i>	44
5.4.2	<i>Řízená regulace proudu</i>	49
5.4.3	<i>Řízená regulace napětí</i>	55
5.4.4	<i>Měření elektrických veličin</i>	57
5.5	OCHRANNÉ PRVKY	60
5.6	DIAGNOSTICKÉ A TESTOVACÍ VYBAVENÍ	65
5.7	ZÁSADY NÁVRHU ZOHLEDNĚNÉ PRO FUNKCI A ELEKTROMAG. KOMPATIBILITU.....	67
6	PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ NABÍJECÍCH SYSTÉMŮ	69
6.1	ALGORITMIZACE OBECNĚ	69
6.2	ČÍSLICOVÉ ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH VELIČIN A JEJICH VYUŽÍVÁNÍ.....	71
6.3	ELEMENTÁRNÍ ZPŮSOBY REGULACE A DETEKCE	73
6.3.1	<i>Pozvolný nárůst proudu</i>	73
6.3.2	<i>Regulace konstantního proudu</i>	76
6.3.3	<i>Regulace konstantního napětí</i>	79
6.3.4	<i>Detekce poklesu napětí</i>	82
6.3.5	<i>Detekce vložené baterie a ochrana před přepólováním</i>	85
6.3.6	<i>Detekce poškozené baterie</i>	87
6.4	APLIKACE ELEMENTÁRNÍCH ALGORITMŮ PRO RŮZNÉ DRUHY ČLÁNKŮ	89
6.4.1	<i>Nabíjecí algoritmus Li-Ion článků</i>	92
6.4.2	<i>Nabíjecí algoritmus NiMH článků</i>	93
6.4.3	<i>Nabíjecí algoritmus olověných článků</i>	95

6.5	APLIKACE ALGORITMŮ PRO VÍCE DRUHŮ ČLÁNKŮ	97
6.6	DIAGNOSTICKÉ A TESTOVACÍ VYBAVENÍ	100
7	REALIZACE TECHNICKÉHO A PROGRAMOVÉHO VYBAVENÍ	
	NABÍJECÍCH SYSTÉMŮ DLE POŽADOVANÝCH VLASTNOSTÍ	104
7.1	VÝPOČET POTŘEBNÉHO VÝKONU A ZVOLENÍ TOPOLOGIE PRIMÁRNÍHO MĚNIČE.....	106
7.2	NÁVRH REGULAČNÍ A ŘÍDÍCÍ ČÁSTI.....	108
7.3	NÁVRH PROGRAMOVÉHO VYBAVENÍ	109
7.4	ZHOTOVENÍ A DOSAŽENÉ PARAMETRY	111
8	ZÁVĚR.....	115
	POUŽITÁ LITERATURA.....	118
	PŘÍLOHA A: SCHÉMA SIMULÁTORU BATERIE	I
	PŘÍLOHA B: FOTOGRAFIE NABÍJECÍCH ZAŘÍZENÍ	II
	PŘÍLOHA C: DIAGNOSTICKÉ ZAŘÍZENÍ	IV

1 Úvod

Nabíjecí technika je hojně rozšířena ve všech oblastech lidské činnosti. Je to zapříčiněno masivním využíváním elektrochemických článků jako zdrojů energie pro zařízení, která nemohou být trvale napájena z rozvodné sítě, není-li k dispozici nebo je jejich připojení nežádoucí z důvodu větší flexibility nebo mobility.

Elektrochemické články označujeme jako primární, pokud je po vyčerpání energie nutná jejich výměna, nebo sekundární, kdy je možnost jejich opětovného nabití. Sekundární článek neboli akumulátor je možné využít opakovaně, což je přínosné z ekonomické, ekologické a především praktické stránky. Primární články nacházejí své uplatnění v zařízeních s velmi nízkou spotřebou nebo s méně častým využíváním jako například hodinky nebo dálkové ovládání atd. Zatímco akumulátory mají daleko širší uplatnění v oblastech drobné spotřební elektroniky, mobilních telefonů, výpočetní techniky, ručního nářadí, záložních zdrojů, malých i velkých elektrických vozidel apod. Přičemž jsou kladeny vysoké požadavky na velikost odebírané energie, kapacitu a životnost.

Pro využívání akumulátorů je nezbytným doplňkem nabíjecí zařízení, které se liší svou funkcí, velikostí, výkonností a cenou. Nutno dodat, že běžný spotřebitel je zahlcen nepřehledným výběrem těchto zařízení, aniž by dokázal rozlišit kvalitu a vhodnost pro vlastní využití.

Množina hojně využívaných druhů sekundárních článků je v současné době (rok 2011) založena pouze na třech prvcích: lithium, nikl a olovo. Existuje mnoho technologicky odlišných článků, které jsou pro běžné použití ve většině případů zaměnitelné. Z hlediska technologie článků není důvod, aby existovalo více nežli deset standardizovaných nabíjecích zařízení. A možná právě proto, že neexistuje standard, který by celou množinu sjednotil, se jednotlivá nabíjecí zařízení diverzifikují svými konstrukcemi, principy a v neposlední řadě výstupními konektory. Třeba na problém rozdílných konektorů a nabíjecích zařízení u mobilních telefonů upozornila Evropská komise. Formou nařízení vyzvala výrobce k nalezení jednotné koncepce a jejímu používání od roku 2012. Vývoj v této oblasti našťastí už samovolně táhne k nabíjení skrze rozhraní USB (Universal Serial Bus). Pro ostatní oblasti je sjednocení nemožné z konkurenčních důvodů nebo zpětné kompatibility výrobků.

Vlastnosti nabíjecích zařízení

Nabíjecí zařízení je používáno k ukládání energie do sekundárních článků (akumulátorů, též dobíjitelných článků) nuceným průchodem nabíjecího proudu skrze článek. Velikost

nabíjecího proudu závisí na technologii, kapacitě a teplotě nabíjeného článku, ale také na výkonových možnostech nabíjecího zařízení a použité metodě nabíjení.

Nabíjecích zařízení existuje nepřeberné množství a jejich kategorizace je mnohdy obtížná. Je možné je rozlišovat podle oblasti použití, výkonnosti nebo principu nabíjení. Nejčastěji se vyskytující rozlišovací znak je označení, jež ovšem nekonkretizuje celé zařízení, ale jen princip nebo specifickou vlastnost. Některé nabíjecí systémy mohou mít i více následujících označení. Například: rychlé a inteligentní; jednoduché a časované [1].

Jednoduché - *Simple*

Obvodově jednoduchá nabíjecí zařízení pracují zpravidla s konstantním vstupním napětím nebo proudem. Výstup se nemění v závislosti na čase ani na stavu nabití článku. Nízké kvalitě nabíjení odpovídá také nízká cena zařízení. Většinou se jedná o pomalé nabíjení (dlouhá doba nabíjení) i z důvodu ochrany proti masivnímu přebíjení.

Kapkové - *Trickle*

Tato nabíjecí zařízení mají malé dobíjecí proudy (0,5 A – 1,5 A) a jsou určena převážně pro malé kapacity 2 Ah – 30 Ah, jen zřídka i pro velké kapacity akumulátorů, které jsou například v automobilech, lodích a dalších dopravních prostředcích. Název této skupiny vyplývá z jejich činnosti. Zařízení jsou většinou nasazována v aplikacích, kde je potřeba udržovat akumulátor v nabitém stavu, proto se používá kapkový (přerušovaný) proud s krátkým trváním a delší pauzou (obvykle se tento způsob využívá v poslední fázi nabíjecího cyklu). Kapkový režim může probíhat stále.

Časované - *Timer-based*

Časovaná nabíjecí zařízení ukončují nabíjecí proces po vypršení předem nastavené doby. Tento princip byl hojně využíván pro nabíjení Ni-Cd článků s velkou kapacitou v posledním desetiletí minulého století. Často se sada článků dodávala s příslušným nabíjecím zařízením, jež vyhovovalo kapacitě článků. Ovšem při nabíjení článků s nižší kapacitou docházelo k jejich přebíjení a v případě větší kapacity byly baterie nabity jen z části. Pro plné nabití bez nebezpečí přebíjení bylo nutné dodržet odpovídající kapacitu a navíc před začátkem nabíjení zajistit, že je článek zcela vybitý. S trendem zdokonalování technologie článků, především se zvyšováním kapacity, docházelo u existujících časovaných nabíjecích zařízení ke stále nižšímu stupni nabití nových článků.

Inteligentní - *Intelligent*

Prvořadým znakem inteligentních nabíjecích zařízení je závislost výstupního proudu na stavu nabití článku. Inteligentní systém může monitorovat napětí a teplotu článku a dobu probíhajícího nabíjení a podle toho určuje optimální nabíjecí proud v průběhu celého nabíjení.

Nabíjení je ukončeno, když kombinace napětí, teploty a času indikuje plně nabitou baterii. Mnoho inteligentních nabíjecích zařízení využívá kombinaci více ukončovacích mechanismů, které mají předcházet přebíjení v drtivé většině případů.

Typické inteligentní systémy s rychlým nabíjením dokáží nabít článek na 85 % za méně než hodinu a poté pokračují kapkovým dobíjením po dobu několika hodin až do plně nabitého stavu článku.

Rychlé - *Fast*

Rychlá nabíjecí zařízení využívají kontrolních obvodů umístěných přímo v baterii, aby bylo možné rychle nabíjet bez nebezpečí poškození článků. Některé tyto systémy mají chladicí ventilátor k udržování nízké teploty nabíjených článků.

Pulsní – *Pulse*

Tato nabíjecí zařízení využívají pulsní technologii, ve které jsou články nabíjeny krátkým napěťovým pulsem. Stejnoseměrný (DC) puls má přesně definovanou náběžnou dobu, šířku, opakovací rychlost (frekvenci) a amplitudu. O této technologii lze říci, že může pracovat s libovolnou kapacitou, napětím nebo chemickým složením článku. U olovených baterií pulsní nabíjení rozruší krystaly síranu olovnatého, tzv. „desulfatace“ a tím značně prodlouží životnost baterie. Některá nabíjecí zařízení používají puls k proudové kontrole bateriového stavu před začátkem nabíjení, poté nabíjejí rychle kontinuálním proudem a na závěr přejdou k pulsnímu nabíjení, tedy druhu kapkového dobíjení. U pulsních nabíjecích zařízení se setkáváme i s používáním záporného pulsu v kombinaci s kladným (záporný má velmi krátké trvání), což přináší více efektivní nabíjení, nežli v případě pouze kladných pulsů.

Indukční - *Inductive*

Indukční nabíjecí zařízení využívají k nabíjení článků elektromagnetickou indukci. Nabíjecí stanice vysílá elektromagnetickou energii skrze indukční vazbu do elektrického zařízení, které ukládá energii do článků. Tato zařízení nepotřebují metalické spojení mezi baterií a nabíjecí stanicí. S tímto řešením se setkáváme především u malých zařízení do koupelny nebo kuchyně, kde při činnosti nehrozí úraz elektrickým proudem.

USB - *USB-based*

Od té doby, kdy rozhraní USB poskytuje 5 V napájení, je možné použít zařízení s USB porty jako napájecí zdroj pro dobíjitelné články. Výrobky založené na tomto přístupu zahrnují nabíjecí zařízení pro mobilní telefony, hudební přehrávače a mnoho další drobné elektroniky. Výrobky mohou být plně kompatibilním periferním zařízením dodržujícím dovolený USB výkonový odběr nebo neidentifikovaná (nepřihlášená) zařízení využívající pouze elektrickou energii.

Solární - *Solar charger*

Solární nabíjecí zařízení převádí světelnou energii na stejnosměrný proud. Tyto systémy jsou většinou přenosné, ovšem pro větší výkony jsou upevňovány na vhodném místě solární panely, které mohou být spojeny sériově či paralelně a slouží k nabíjení v autech, lodích atd.

Přestože jsou přenosné solární systémy napájeny výhradně energií ze slunce, mohou, v závislosti na použité technologii, fungovat i při nízké intenzitě osvětlení. Převážná většina je určena pro kapkové dobíjení (udržování v nabitém stavu), přestože mohou kompletně nabít baterii. Blízkou, avšak okrajovou oblastí jsou větrná turbínová nabíjecí zařízení s podobnými vlastnostmi.

Nabíjecí zařízení pro ruční nářadí

Oblast nabíjecích zařízení pro ruční nářadí je charakteristická bateriemi středně velkých kapacit s velkým výkonem a požadavkem na rychlé a bezpečné nabití baterie.

Nabíjecí zařízení spadá do oblasti napájecích zdrojů, které mohou být lineární nebo častěji spínané (pulsní). Napájení nabíjecího zařízení je nejčastěji z rozvodné sítě střídavým napětím nebo z nějakého druhu stejnosměrného napětí jako například palubní síť v automobilu. Výstupní chování nabíjecího zařízení může představovat konstantní napěťový nebo častěji proudový režim, ale u moderních zařízení nelze chování jednoznačně charakterizovat, neboť se mění v závislosti na více parametrech, jako jsou bateriové napětí, čas, teplota a další. Řídícím obvodem pro nabíjecí proces může být jednoduchý regulátor nebo integrovaný obvod či mikroprocesor, který zajišťuje měření důležitých veličin, jejich zpracování a vytvoření ovládacích signálů pro regulaci nabíjecího procesu.

Použití mikroprocesoru si vyžádaly nové články a nové způsoby nabíjení a také zrychlení nabíjecího procesu. Nezbytné opatření při přechodu na rychlé nabíjení je implementace teplotního senzoru do baterie, aby se předcházelo přehřátí při přebíjení nebo při poruše

článků. Vybavení baterie pokračuje přidáním kódovacího rezistoru pro identifikaci v případě využívání různých druhů nebo počtů článků stejným nabíjecím zařízením. Rozšířením identifikace jsou nejrůznější konstanty a aktualizované (průběžné) informace z životního cyklu, které jsou implementovány také do baterie ve formě EEPROM paměti se sériovým rozhraním, viz kapitolu 4.5.

Aby nabíjecí zařízení řízené mikroprocesorem správně pracovalo, musí se konstrukce sekundární (regulační) části navrhnout s ohledem na spolupráci s programovým vybavením. Návrh musí také dbát na nízký počet součástek a cenu, kterou tvoří z velké části primární výkonová část [2].

Nabíjecí zařízení pro ruční nářadí je vybaveno signalizačními LED diodami, pomocí kterých je informován uživatel o stavu nebo situaci, ve které se nabíjecí zařízení nachází. Po připojení na napájení je očekáváno vložení baterie, po němž následuje její identifikace a zjištění jejího stavu. Umožňuje-li to stav baterie, nabíjecí proces se spustí a zpravidla má několik fází. Nabíjení je ukončeno v případě detekce plně dobité baterie, ale může dojít k předčasnému ukončení výrazným překročením teploty nebo detekcí poškozené baterie, stejně jako jejím vyjmutím. Nabití baterie na 100 % kapacity je u některých druhů zdlouhavé, a tak se přistupuje k signalizaci plně dobité baterie již od úrovně nabití vyšší než 80 % a přitom se pokračuje v dobíjení.

2 Cíl práce

Práce si klade za cíl přehledně a uceleně představit problematiku nabíjecí techniky určené především k nabíjení baterií přenosných elektrických zařízení. Ovšem diskutované skutečnosti bude možné využít i v příbuzných oborech, jako jsou stacionární záložní systémy nebo napájecí systémy. Obecná část se bude zabývat v současnosti nejčastěji používanými druhy sekundárních článků a nejpoužívanějšími způsoby jejich nabíjení s ohledem na rychlost nabíjecího procesu.

Jedním z hlavních úkolů je nalezení a stanovení jednotného principu nabíjecí techniky, který umožňuje dobíjení všech používaných druhů článků a také umožňuje aplikaci běžných metod ukončení nabíjecího procesu.

Na předchozí úkol navazuje vytvoření algoritmů různých způsobů dobíjení pro používané druhy článků využívající dříve zmiňovaný jednotný princip nabíjecí techniky.

Další úkol je vytvořit postup pro vývoj a návrh technického a programového vybavení nabíjecího zařízení. S tím souvisí i způsob prvotního testování funkce zhotoveného zařízení, zjištění a lokalizace oblasti se závadou vzniklou při výrobě.

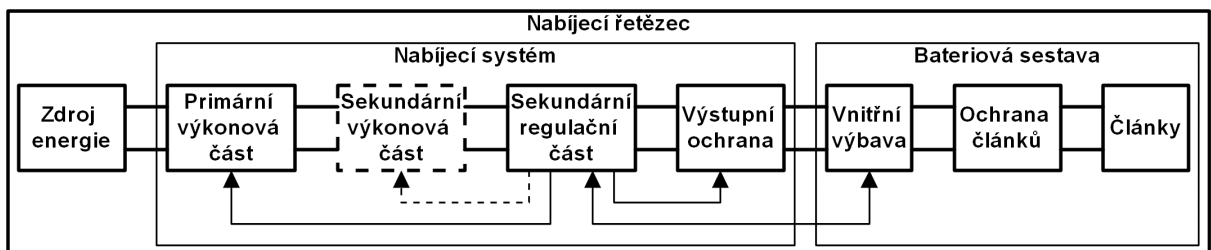
Struktura a obsah řešených úkolů má také plnit funkci obecné dokumentace vývoje a návrhu nabíjecích systémů ve spolupráci s firmou TESLA Blatná a.s. a má být výchozím bodem pro další pokračování.

3 Současný stav problematiky

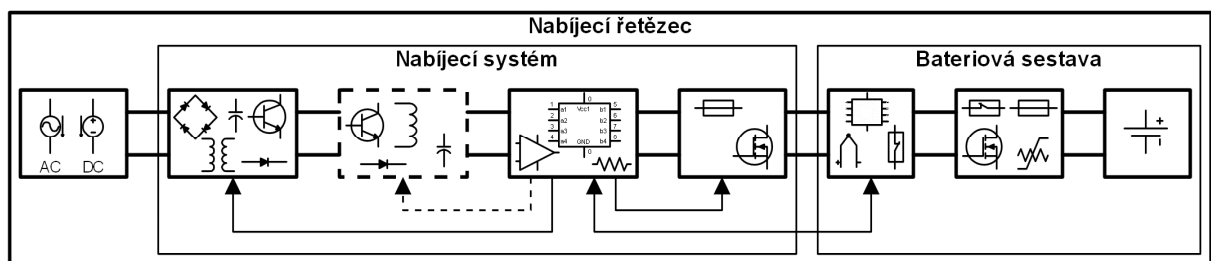
Nabíjecí řetězec

Jak již bylo uvedeno v úvodní části, nabíjecích zařízení pro ruční nářadí je obrovské množství a liší se principem činnosti, konstrukcí, výkonem a mnoha dalšími parametry, které jsou závislé na oblasti použití. Proto místo charakteristiky jednotlivých druhů je vhodnější rozdělit celý problém na části a ty zkoumat odděleně.

Na obrázku 3.1 je blokové uspořádání celého nabíjecího řetězce skládající se ze zdroje energie, nabíjecího systému a bateriové sestavy. Zdrojem energie je síťové napětí, ve speciálních aplikacích může být nabíjecí systém napájen z nízkého stejnosměrného napětí. Nabíjecí systém je možné dále dělit. Primární výkonová část zajišťuje transport energie ze zdroje na výstup nabíjecího systému a může být doplněna o sekundární výkonovou část, která pomáhá v regulaci přenášené energie. Nezbytnou součástí nabíjecího systému je regulační část, která je umisťována na sekundární stranu, tedy co nejbližší k nabíjené baterii. Zajišťuje nejenom regulaci toku energie do baterie, ale i regulaci nabíjecího procesu a detekci nebo interakci s bateriovou sestavou. Nabíjecí systém často disponuje výstupní ochranou proti přepólování baterie a chrání tak baterii i nabíjecí systém před neodborným zacházením obsluhy.



Obr. 3.1 Blokové uspořádání obecného nabíjecího řetězce



Obr. 3.2 Obecný nabíjecí řetězec se symbolickým obsahem součástek

Sekundární výkonová část nabíjecího systému se vyskytuje jen velmi zřídka a především u speciálních aplikací s velkým výstupním výkonem. Výstupní ochrana nemusí být přítomna, pokud je znesnadněn přístup k výstupním kontaktům a mechanicky nemožné vložení baterie opačně. Bateriová sestava obsahuje alespoň nejzákladnější způsob ochrany článků a může obsahovat také vnitřní elektroniku, která ochraňuje články. Je vybavena teplotním senzorem a identifikací, které jsou k dispozici nabíjecímu systému. V různých nabíjecích systémech se setkáme s odlišnou realizací jednotlivých bloků, zejména výkonové a regulační části, ale i vnitřní výbava bateriové sestavy se značně liší. Na obrázku 3.2 je schematicky znázorněn obsah součástí jednotlivých bloků, které jsou podrobněji popsány v kapitolách 4 a 5.

Současný stav

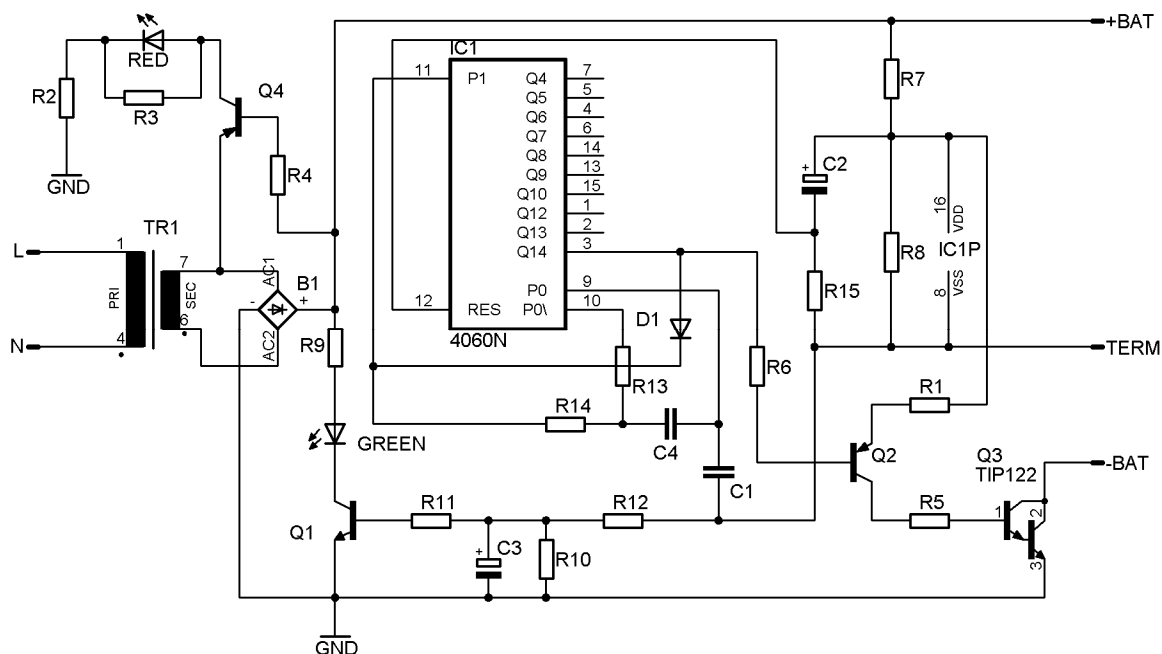
Na trhu se můžeme setkat s různými produkty, přičemž některé využívají principy a konstrukce staré desítky let, jiné zase sledují technologický vývoj akumulátorů a nabízí moderní řešení. Stáří produktu samo o sobě nic nenaznačuje a je třeba sledovat konkrétní vlastnosti nabíjecích zařízení. Pro jednoduchost můžeme rozdělit nabíjecí systémy na jednoduché a inteligentní [3].

Jednoduchá nabíjecí zařízení

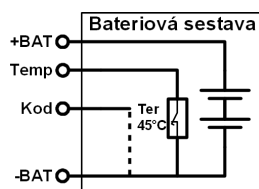
Jednoduchým nabíjecím zařízením můžeme označit to zařízení, které je založeno na snadném způsobu nabíjení a ukončení nabíjení a které se nechová příliš šetrně k baterii. U takového zařízení není zohledňován stav nabití baterie ani její případné poškození a zpravidla je přebíjena nebo nedobíjena. Silné zastoupení mají především u jednoúčelových zařízení s velmi malou konstrukční složitostí, čemuž odpovídá i nízká pořizovací cena. Tato zařízení často neumožňují nabíjení baterie s jiným počtem článků nebo jiným druhem článků, což se může projevit nedostatečným nabitím nebo naopak přebíjením či poškozením jiné než originální sestavy. Jednoúčelové systémy jsou často dodávány společně s bateriovou sestavou a při poškození baterie je nutné nové zkompletování (reparování) shodnými články, což může být finančně nákladnější než pořízení nové, která se ovšem samostatně neprodává. Obdobný problém nastává při poškození nabíjecího zařízení.

Ukázkovým příkladem je nabíjecí zařízení na obr. 3.3, které je založeno na časovém a teplotním ukončení nabíjení a je určeno pro bateriové sestavy NiCd článků 18 V / 1,2 Ah s vnitřním zapojením na obr. 3.4. Napájení je síťové a k přenosu energie je využit klasický transformátor, jehož výstup je usměrněn a pomocí výkonového tranzistoru Q3 je připojován přímo k baterii. V proudové cestě není žádný regulační prvek a tak velikost pulzního proudu

(100 Hz) je limitována jen rozdílem sekundárního napětí transformátoru a baterie a výkonovými možnostmi transformátoru. Nabíjení se ukončí automaticky po dočasování obvodu CMOS 4060 anebo při rozepnutí termostatu uvnitř baterie, dojde-li k překročení nastavené teploty důsledkem přebíjení trvající několik minut.

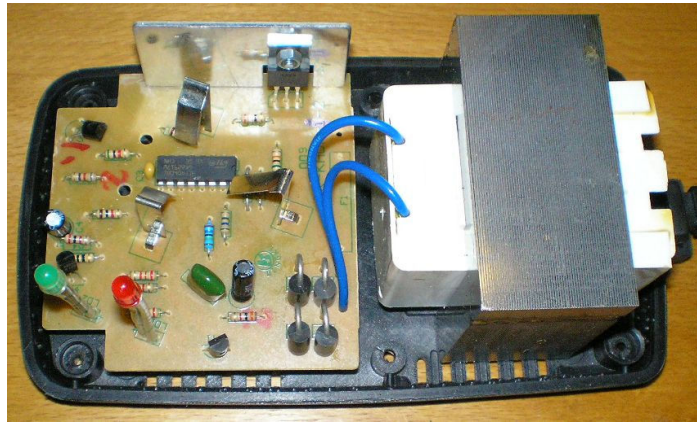


Obr. 3.3 Schéma nabíjecího systému s časovým a teplotním ukončením



Obr. 3.4 Vnitřní schéma bateriové sestavy NiCd 18 V / 1,2 Ah

NiCd články v baterii jsou oproti NiMH méně citlivé na přebíjení a vyšší teplotu, ovšem opakovaním se kapacita „zbytečně“ snižuje. Zanedbáme-li nevyhnutelné přebíjení, je tento systém velmi elegantní s nenáročnou konstrukcí, jak je patrné z obr. 3.5. Nižší cena je vyvážena i větší hmotností a menší účinností oproti konstrukci s primárním spínaným měničem.



Obr. 3.5 Konstrukční provedení nabíjecího systému s časovým a teplotním ukončením

Inteligentní nabíjecí zařízení

Tyto systémy se vyznačují především sofistikovanějším přístupem k nabíjecímu procesu. Využívají více metod pro ukončení nabíjení s ohledem na co nejmenší přebíjení a vystavování baterie vysoké teplotě. Měly by rozpoznat stav nabití a poškozenou baterii a na základě toho upravovat průběh nabíjecího procesu. Nabíjecí zařízení spadající do této skupiny je často univerzální, neboť je schopné nabíjet řadu bateriových sestav jednoho nebo i více výrobců. Možnosti a funkce inteligentních systémů jsou široké a mnoho jich je v následujících kapitolách podrobně popsáno [4].

Vývojové trendy

Jednouúčelové nabíjecí systémy, přes své nevýhody, budou nadále na trhu uspokojovat poptávku po levných zařízeních zejména pro neprofesionální (hobby) použití. Vedle toho bude pokračovat vývoj na nabíjecích systémech s procesory nebo specializovanými integrovanými obvody. Lze předpokládat široké rozšíření vnitřního vybavení bateriových sestav, jež o nich bude podrobněji informovat, především pak o jejich životním cyklu.

4 Elektrochemické akumulátory

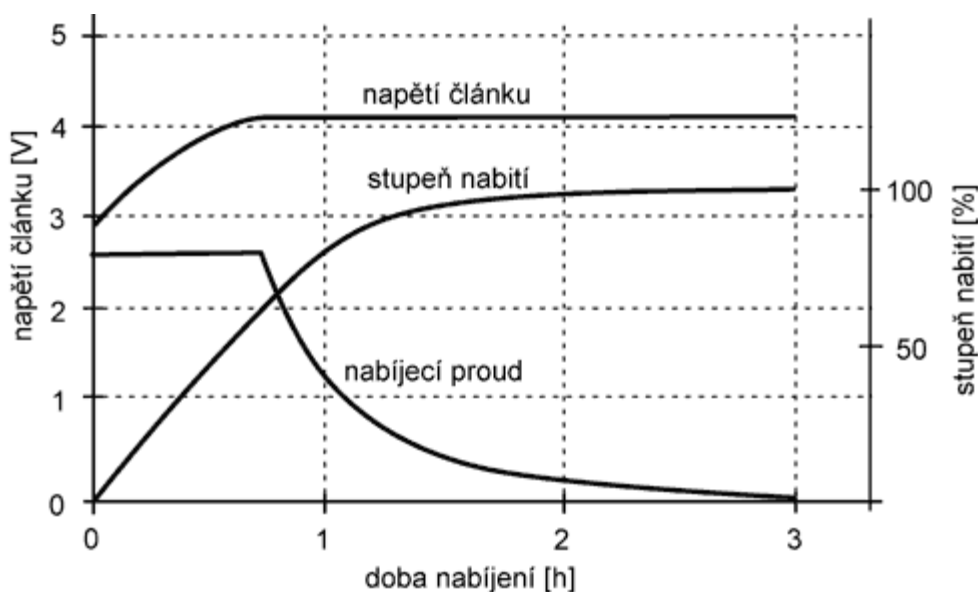
Elektrochemický akumulátor (dále jen akumulátor) je technické zařízení na opakované uchovávání elektrické energie. Akumulátor je sekundární článek, který můžeme po nabití použít jako zdroj energie. Procházející proud v elektrochemickém akumulátoru vyvolá vratné chemické změny, které se projeví rozdílným elektrochemickým potenciálem na elektrodách. Z elektrod je poté možno čerpat na úkor těchto změn elektrickou energii zpět. Protože jsou nominální napětí na článcích elektrochemických akumulátorů relativně malá (1,2 V až 3,7 V), jsou tyto články také sdružovány do akumulátorových baterií pro dosažení vyššího napětí. Čtyři používané druhy článků a jejich nominální napětí: lithium-iontový (Li-Ion) s $U_N = 3,6$ V, olověný (Pb) s $U_N = 2$ V a nikel-kadmiový (NiCd) a nikel-metal hydridový (NiMH) s $U_N = 1,2$ V [5, 6].

Mezi důležité parametry článků potřebné pro nabíjení patří kapacita (limituje délku nabíjení), maximální nabíjecí proud (omezuje rychlost nabíjení) a teplotní rozsah (také omezuje rychlost nabíjení). Především kapacita se časem a způsobem využívání článku snižuje. Výrobce udává počet úplných cyklů (nabití a vybití), které způsobí pokles kapacity na hodnotu 60 %. Ovšem podstatnou roli hraje také velikost teploty, při které je článek nabíjen a vybit. Teplotní rozsah pro nabíjení se pohybuje od 0 °C do 40 °C, především vyšší teploty spojené s přebíjením značně snižují kapacitu (poškozují článek).

Nabíjení baterií v oblasti ručního náradí je potřeba provádět rychle a šetrně (bezpečně), aby byly co nejdříve připraveny k dalšímu použití. Nabíjecí proces je rozdělen do několika různých fází, jako jsou přednabíjení, rychlé nabíjení a udržování v nabitém stavu. Nejdůležitější fází je rychlé nabíjení, při němž se kombinuje několik metod detekce nabité baterie pro včasné ukončení nabíjecího procesu s co nejkratší dobou přebíjení. Při návrhu technické a programové části nabíjecího zařízení je důležité znát vnitřní uspořádání a elektronické vybavení baterií a vhodně jej využívat. Stejně tak důležité je znát ochranná vybavení baterie a respektovat jejich vlastnosti.

4.1 Nabíjecí metody Li-Ion a Li-Pol článků

Lithiové články se objevují pod dvojným označením. Pokud je v článcích použit klasický tekutý nebo gelový elektrolyt nasáklý v separátoru, označují se Li-Ion, v případě, že jsou v článcích nově využity také polymery, nesou označení Li-Pol. Hlavní výhodou Li-Pol článků je jejich nižší hmotnost, také se dají v omezené míře mechanicky formovat (ohýbat). Z hlediska elektrického chování jsou však rovnocenné. Důležitým parametrem je konečné nabíjecí napětí, které se pohybuje od 4,0 V do 4,3 V podle použité technologie. Napětí je nutné přesně dodržovat, neboť jeho překračování může způsobovat vážné poškození článku. V oblasti ručního nářadí se zpravidla setkáváme s konečným napětím článků 4,2 V, ovšem z bezpečnostních důvodů se nabíjení provádí do 4,1 V až 4,15 V za cenu nedobití do 100 % kapacity [5].



Obr. 4.1.1 Nabíjecí charakteristika Lithiových článků

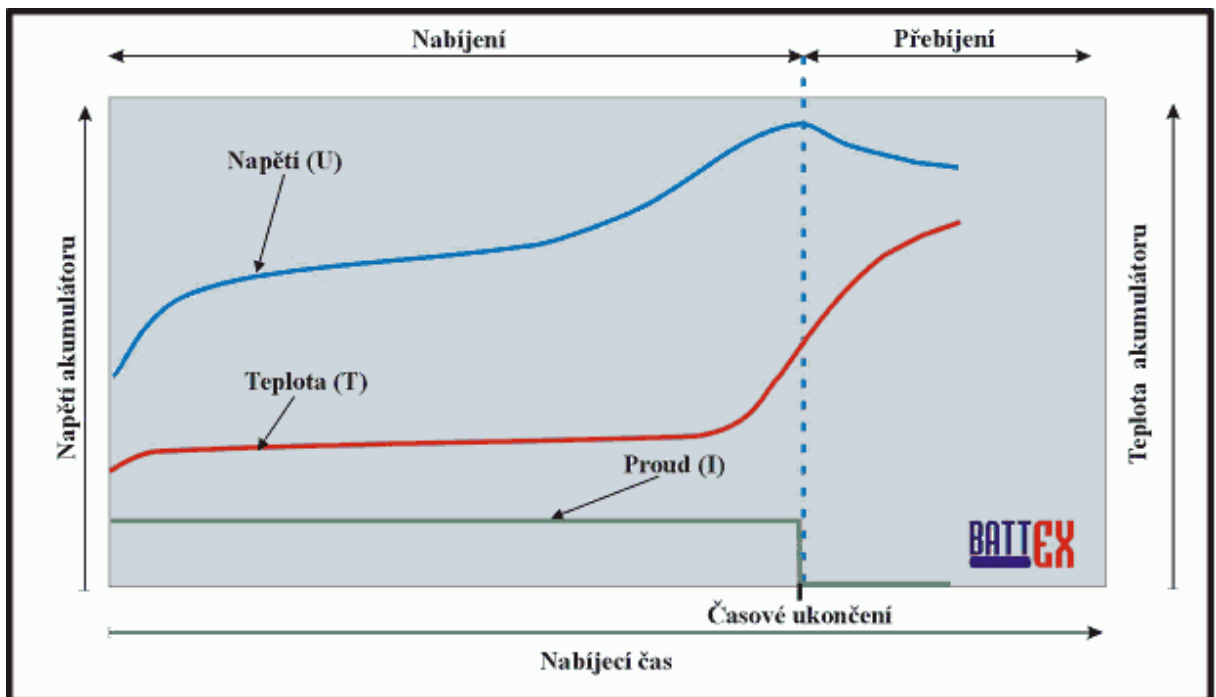
Nabíjení lithiových akumulátorů

Při nabíjení lithiových akumulátorů se používá napěťové nabíjení, respektive metoda, která se v zahraniční literatuře označuje jako CCCV (Constant Current followed by Constant Voltage), viz obr. 4.1.1. Je to nabíjení konstantním proudem, dokud akumulátor nedosáhne předem stanoveného napětí a poté nabíjení konstantním napětím. Ukončení nabíjení se provádí, pokud nabíjecí proud klesne na předem stanovenou hodnotu, ve většině případů se doporučuje hodnota proudu odpovídající $1,5 \div 2 \%$ jmenovité kapacity. Nabíjení lze ukončit po určitém čase, například od dosažení stanoveného napětí po 2 hodinách, samozřejmě s omezením konstantního napětí. Toto použití je vhodné v jednocelových zařízeních, kde se

nepředpokládá nabíjení akumulátorů různých kapacit. Při nabíjení Li-Ion článků, pokud je správně nastaveno konečné nabíjecí napětí, nedochází k jejich přebíjení, tak jako je tomu u NiCd a NiMH akumulátorů [5, 7].

4.2 Nabíjecí metody NiCd a NiMH článků

Přestože jsou NiCd (nikl-kadmiový) články stále ještě považovány za nejvhodnější v mnoha ohledech, jako je široký teplotní rozsah, vysoká spolehlivost a životnost, velmi vysoké proudy atd., je jejich aplikace v komerční sféře omezoována z důvodu obsahu kadmia, které je klasifikováno jako látka škodlivá k životnímu prostředí. Historicky mladší technologií je NiMH (nikl-metal hydridový) článek, který zaznamenal mnoho vylepšení a jehož vývoj stále pokračuje. Především kapacitou je již na stejné nebo vyšší úrovni nežli NiCd a o ostatních dostatečných parametrech vypovídá jeho nasazování v oblasti ručního nářadí. Rozdíly v nabíjení nejsou v používaných metodách, ale v míře jejich charakteristického chování. Při nabíjení se NiMH daleko rychleji ohřívá na rozdíl od NiCd, jehož nabíjecí reakce je endotermní, což znamená, že teplo se v jejím průběhu spotřebovává (při rychlém nabíjení však převažuje zahřívání vyšším proudem). NiMH vykazují také nižší pokles napětí na konci nabíjení než NiCd, viz dále metodu $-\Delta V$. Jmenovité napětí u obou druhů článků je shodné, 1,2 V [5, 8].



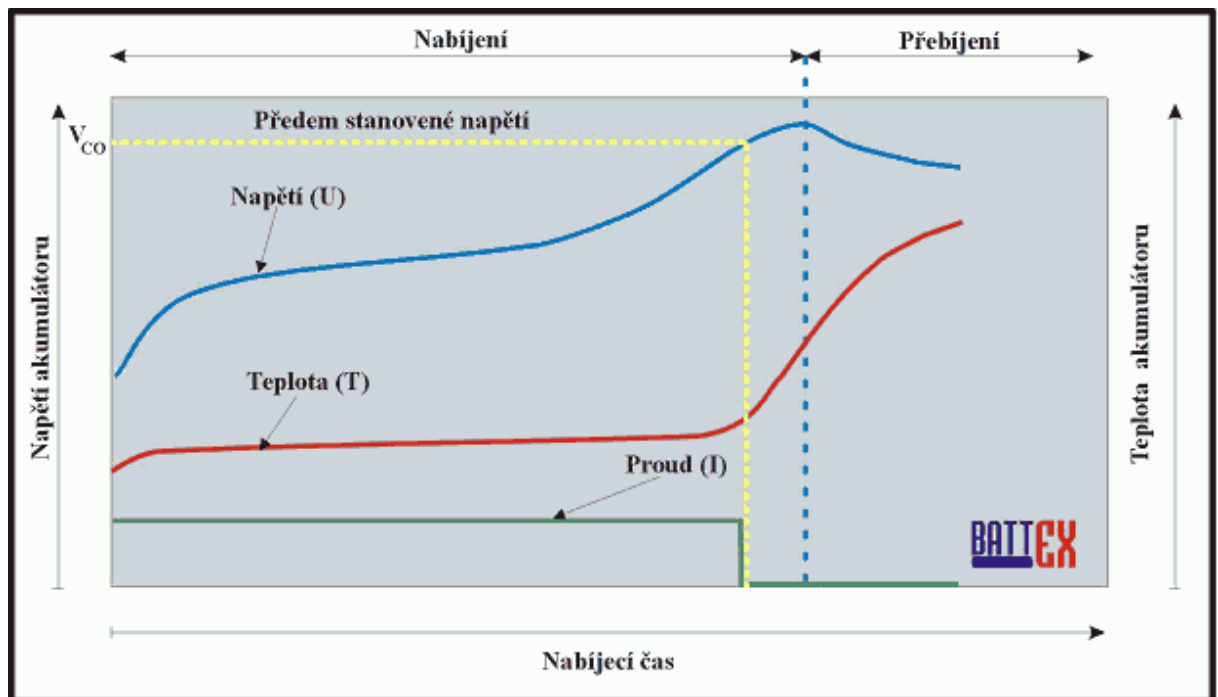
Obr. 4.2.1 Časové ukončení nabíjení NiCd akumulátoru, převzato z [5]

Ukončení časové

Tato nabíjecí metoda byla dříve používána jako hlavní, ale dnes se používá převážně v kombinaci s ostatními metodami. Nabíječ je konstruován tak, že po určitém čase vypne nebo přepne na proud konzervační, viz obr. 4.2.1. Nevýhoda této metody je, že často dochází k přebíjení anebo nedobití, proto se metoda aplikuje jako dodatečná k omezení maximálního času dobíjení [5].

Metoda „VCO“

Metoda „VCO“ je ukončení nabíjení při dosažení předem stanoveného napětí, viz obr. 4.2.2. Toto napětí bývá značené VCO (CO je z anglického *cut-off*). Napětí VCO je předem dané a stanovuje se většinou podle katalogových nabíjecích křivek pro daný akumulátor. Nevýhodou tohoto systému je, že napětí akumulátoru, respektive průběh napětí při nabíjení, se mění jak s teplotou, tak s nabíjecím proudem, tak podle druhu elektrod v akumulátoru, taktéž je i jiný průběh napětí při nabíjení u článku, který se dlouhodobě skladoval. Proto se tato metoda používá pouze jako doplňková k ostatním metodám, aby se zabránilo vývinu vodíku na záporné elektrodě při nabíjení za nízkých teplot (pod 0 °C) [5].

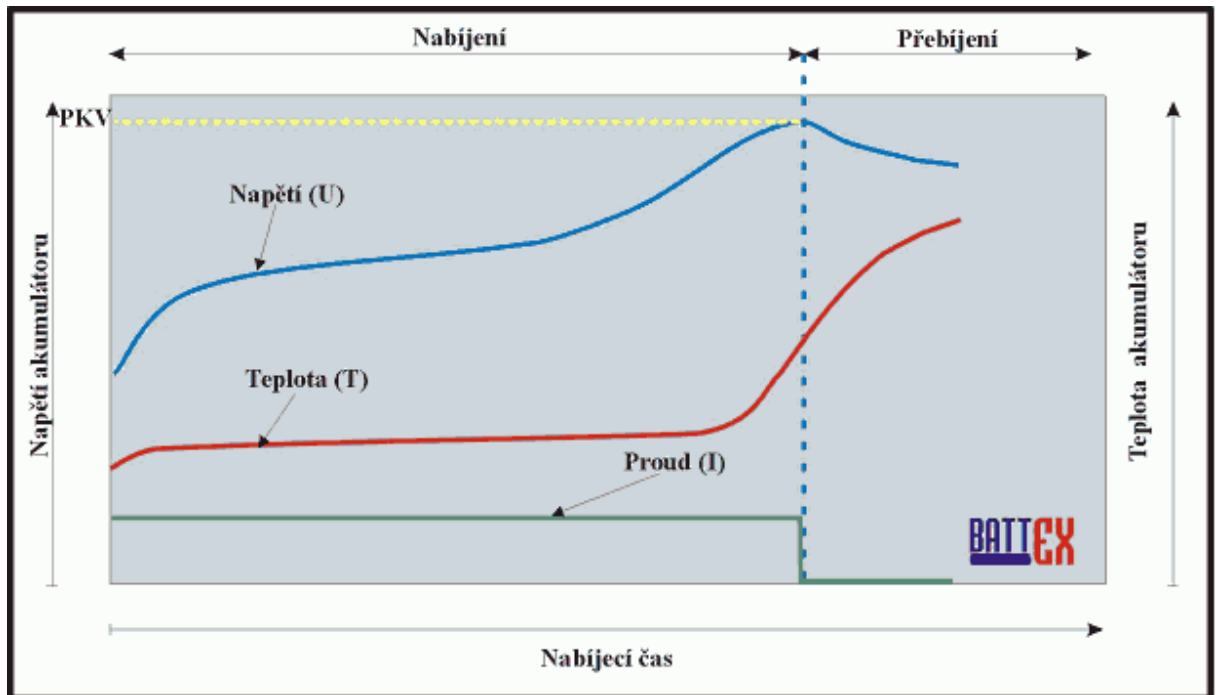


Obr. 4.2.2 Nabíjení NiCd akumulátorů – Metoda „VCO“, převzato z [5]

Metoda „PKV“

Druhou napěťovou metodou je ukončení nabíjení při dosažení vrcholu napětí (peak voltage detection, odtud zkratka PKV), viz obr. 4.2.3. Tento vrchol se označuje PKV.

Nabíjení je ukončeno v momentě nejvyššího napětí. Tato metoda by se měla využívat pro rychlé nabíjení, tedy při nabíjecím proudu $2 I_t$ až $0,5 I_t$ (I_t – referenční proud). Pro menší proudy je stanovení PKV velice obtížné, respektive PKV neexistuje, zatímco pro větší proudy (při ultra-rychlém nabíjení) je tato metoda zkrusována zahříváním akumulátoru a poklesem napětí v momentě jeho oteplování. Rovněž ze stejného důvodu není vhodná pro nabíjení akumulátorů za teplot vyšších nežli pokojových [5, 9].



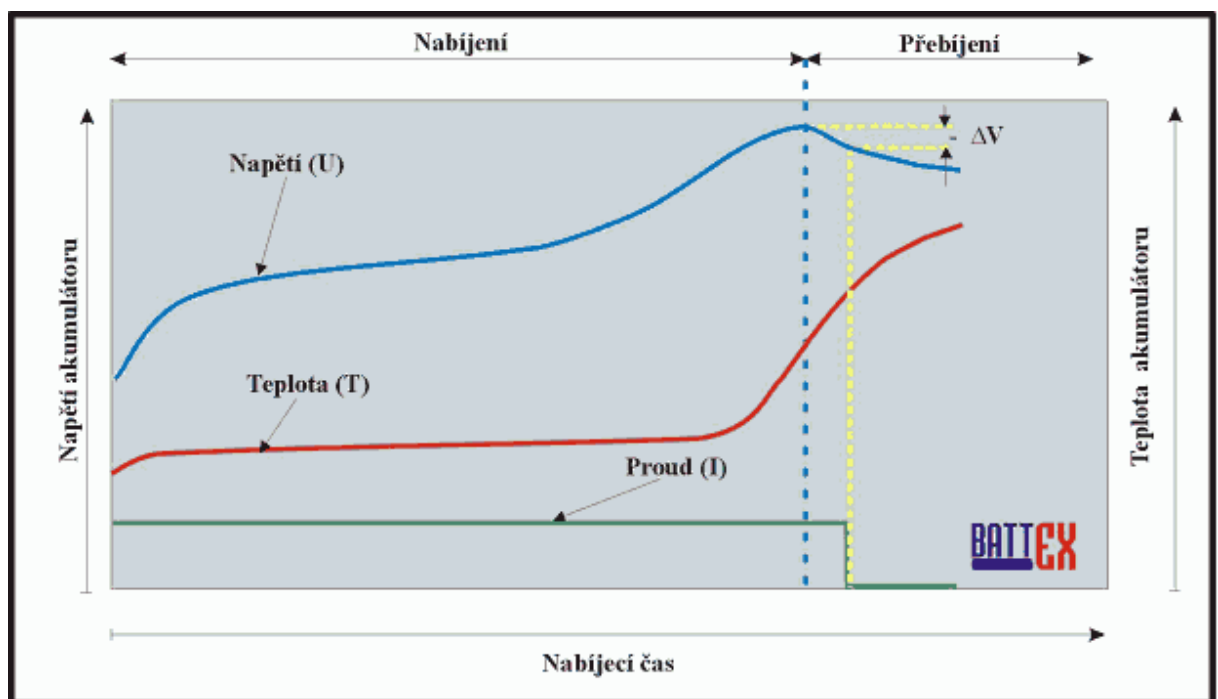
Obr. 4.2.3 Nabíjení NiCd akumulátorů – Metoda „PKV“, převzato z [5]

Metoda „ $-\Delta V$ “

Mezi odbornou veřejností je nejznámější metoda indikace poklesu napětí na konci nabíjení, nazývaná $-\Delta V$ (správně by to mělo být „ $-\Delta U$ “, protože napětí značíme U , ale ponecháme výraz z angličtiny), viz obr. 4.2.4. Nabíjení se ukončí, pokud je pokles napětí na jeden článek 10 mV. Tato hodnota platí pro NiCd akumulátory. Pro NiMH akumulátory je vhodné indikovat pokles napětí 5 mV na článek. Metoda je to nejrozšířenější, ale má i své slabé stránky. Tou první je, že ji lze pro NiCd akumulátory aplikovat jen pro proudy o velikosti $2 I_t$ až $0,5 I_t$, což odpovídá rychlému, popř. zrychlenému nabíjení. Při nabíjení proudem nižším než $0,5 I_t$ již nedochází k poklesu napětí na konci nabíjení. Pro proudy větší než $2 I_t$, tedy pro ultra rychlé nabíjení, není též nejvhodnější. S tím souvisí i druhá slabá stránka, že k poklesu napětí dochází, až když je akumulátor nabitý a začne se přebíjením zahřívát a zvýšením teploty vlastně dochází ke snížení napětí. Nabíjení je tedy ukončeno až po krátkém přebíjení, které samozřejmě poněkud snižuje životnost článku. Tuto metodu

nejčastěji používají komerční nabíječe pro rychlé nabíjení, které jsou běžně v prodeji a slouží k nabíjení nejvíce rozšířených akumulátorů, nebo starší nabíječe pro akumulátorové nářadí.

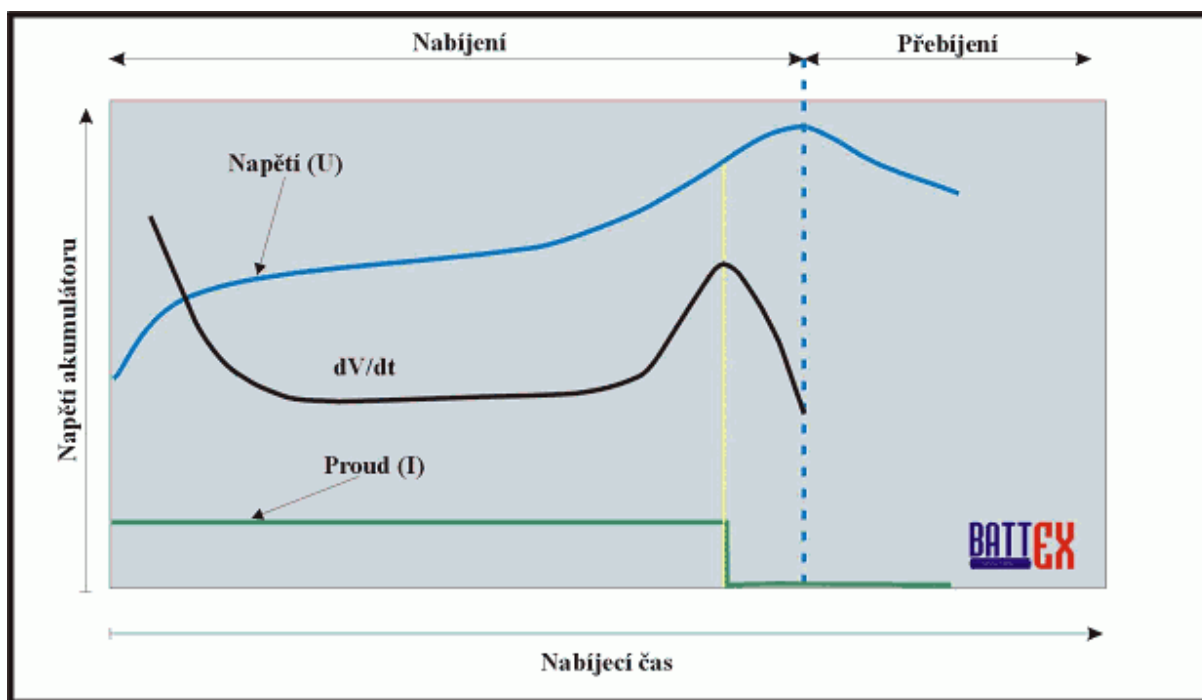
V současné době jsou tyto nabíječe konstruovány jak pro NiMH, tak i NiCd akumulátory, proto jsou nastaveny na pokles 5 mV na jeden článek. Ale v době, kdy se ve většině aplikací používaly jen NiCd akumulátory se pokles napětí nastavoval na 10 mV na článek. Pokud v takovém nabíječi začneme nabíjet NiMH akumulátorové baterie, většinou nedojde k poklesu napětí o 10 mV na článek a tím nenastane ukončení nabíjení a baterie je přebíjena. Při konstrukci nabíječů založených na této bázi se zapomíná na to, že akumulátor může mít záporný pokles napětí hned na začátku nabíjení. Tento efekt vykazují hlavně akumulátory po delším skladování, napětí rychle vzroste a pak se vrátí do normálních hodnot podle nabíjecích křivek. Proto se doporučuje při používání této metody ignorovat průběh napětí v prvních 5 až 10 minutách. Kvalitnější nabíječe jsou konstruovány již s ohledem na tento jev [5, 10, 11].



Obr. 4.2.4 Nabíjení NiCd akumulátorů – Metoda „ $-\Delta V$ “, převzato z [5]

Metoda „ d^2V/dt^2 “

Podobnou metodou, jakou je $-\Delta V$, je sledování druhé derivace napětí v čase (d^2V/dt^2). Nabíječ snímá napěťovou křivku a zastaví nabíjení v okamžiku zaznamenání napěťové derivační špičky. Plného nabití baterie lze dosáhnout pouze přepnutím na dovolený trvalý dobíjecí proud. Tato nabíjecí metoda zvyšuje životnost akumulátorových baterií, protože nedochází k přebíjení baterie, viz obr. 4.2.5 [5].



Obr. 4.2.5 Nabíjení NiCd akumulátorů – Metoda „ d^2V/dt^2 “, převzato z [5]

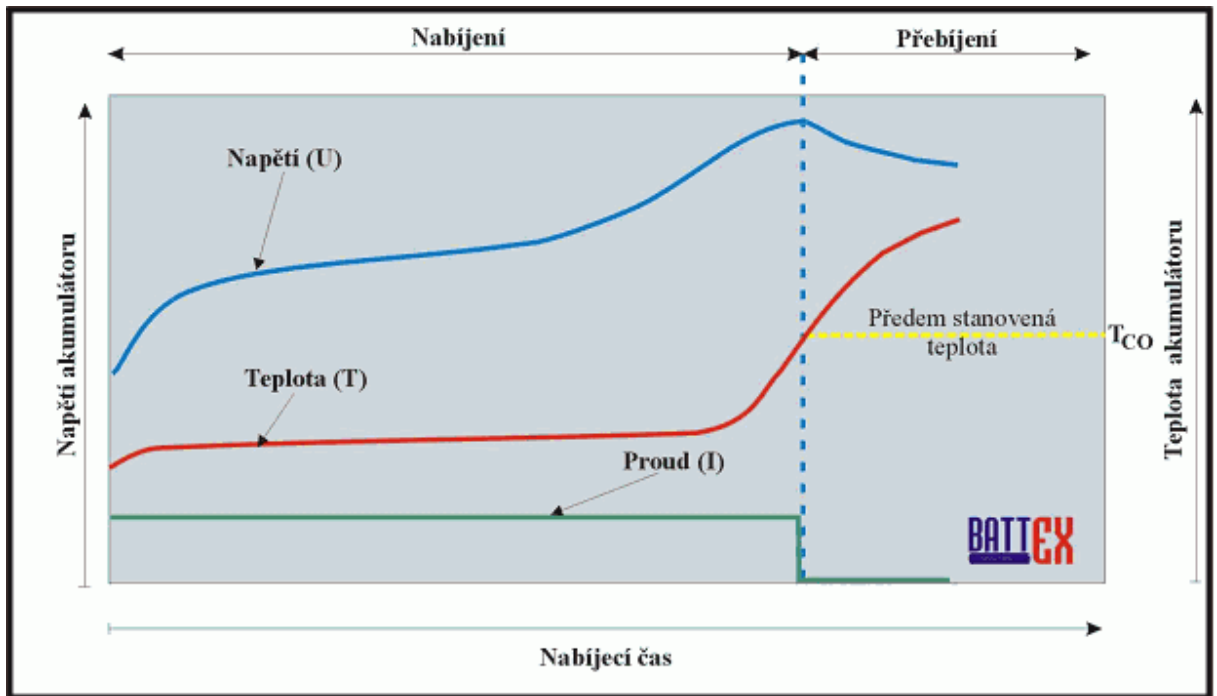
Ukončení teplotní

Základní teplotní metody ukončení nabíjení jsou dvě. Nejčastěji se s nimi setkáváme v mobilních telefonech, radiostanicích, noteboocích a akumulátorovém nářadí. Teplota se snímá většinou termistorem, který se umísťuje na plášť akumulátorového článku. Poloha termistoru je velice důležitá. Termistor, který není přímo na plášti akumulátoru, neudává přesné informace, popřípadě udává velice zpožděné informace o teplotě akumulátoru. Používají se termistory typu NTC, které při zvýšení teploty snižují svou hodnotu rezistance. Někdy je teplotní čidlo přímo v integrovaném obvodu, který hlídá parametry nabíjení. I zde však platí, a na to se často zapomíná, že takový obvod s integrovaným termistorem musí být co nejbližší akumulátoru, aby hodnoty změny teploty (změny parametrů termistoru) nebyly zkreslovány [5].

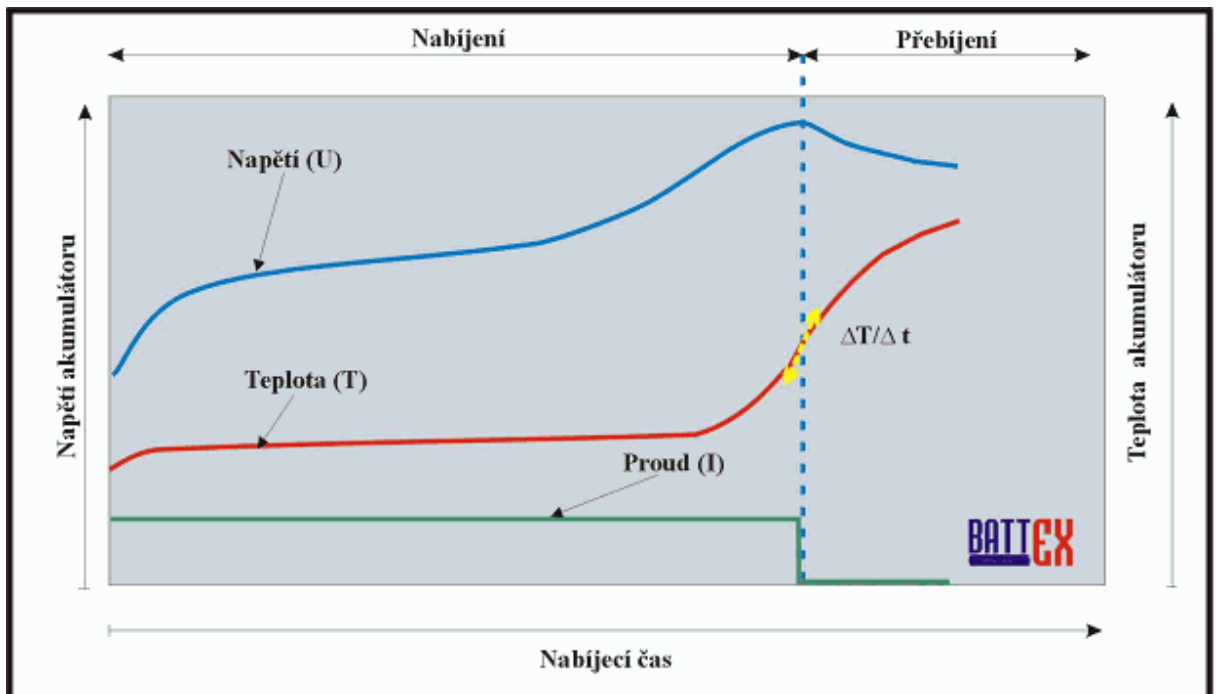
Metoda „TCO“

Metoda „TCO“ vypíná nabíjecí proud v okamžiku dosažení předem dané teploty, většinou to bývá kolem $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tato teplota, respektive metoda, se označuje TCO (Thermal cut off), viz obr. 4.2.6. Metoda není vhodná pro nabíjení akumulátorových baterií s teplotou nízkou, nebo naopak vysokou (ať už způsobenou teplotou okolí nebo zahříváním akumulátoru při vybíjení). Při nízkých teplotách dochází ke zbytečnému přebíjení, při vyšších teplotách se

akumulátor nenabíje na plnou kapacitu nebo se nezačne nabíjet vůbec, proto mnohdy slouží jen jako metoda doplňková (ochranná) [5, 12, 13].



Obr. 4.2.6 Nabíjení NiCd akumulátorů – Metoda “TCO“, převzato z [5]



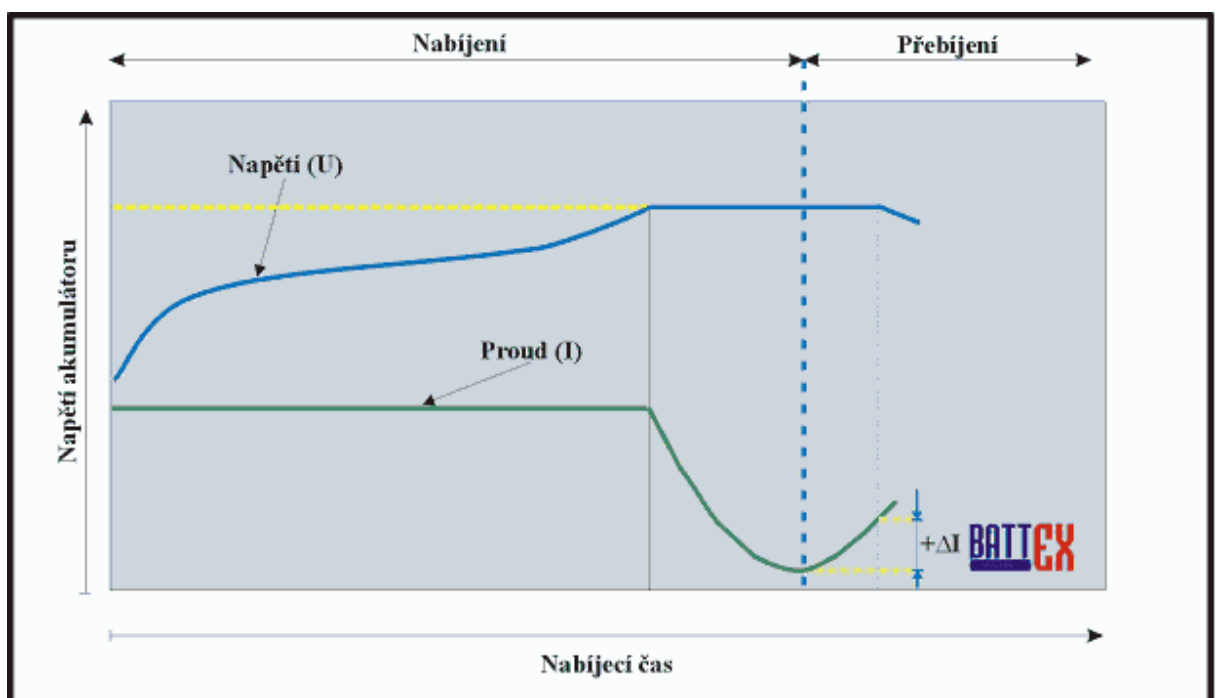
Obr. 4.2.7 Nabíjení NiCd akumulátorů – Metoda „ $\Delta T/\Delta t$ “, převzato z [5]

Metoda „ $\Delta T/\Delta t$ “

Metoda „ $\Delta T/\Delta t$ “ je sledování změny teploty v čase (dT/dt), viz obr. 4.2.7. K ukončení nabíjení dochází v momentě, kdy je změna teploty $0,5\text{ }^{\circ}\text{C} - 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ za minutu. Doporučuje se nabíjecí proud o velikosti alespoň $0,3 I_t$ a teploty do $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tato metoda je velice oblíbená. Metoda se stává nevhodnou při výpadku elektrické energie nebo při nabíjení nabitého a ještě teplého akumulátoru. Pokud takovýto akumulátor začneme znovu nabíjet, nabíječ čeká na další nárůst teploty [5].

Ukončení proudové

Tento princip není moc častý, vyskytoval se hlavně u ultra-rychlého nabíjení zdrojů pro akumulátorové nářadí. Baterie se nabíjí konstantním proudem až do doby, kdy dosáhne předem určeného napětí, viz obr. 4.2.8. Poté přechází baterie na nabíjení konstantním napětím. Nabíjení se ukončí při nárůstu velikosti nabíjecího proudu při konstantním napětí. Problémem může být nabíjení za zvýšené teploty nebo zahřátých akumulátorů. V tomto případě může nastat situace, kdy předem zvolené napětí akumulátor nikdy nedosáhne. Podobná se může zdát metoda CCCV pro nabíjení lithiových akumulátorů, ale tam nikdy nedochází k nárůstu proudu [5, 14].

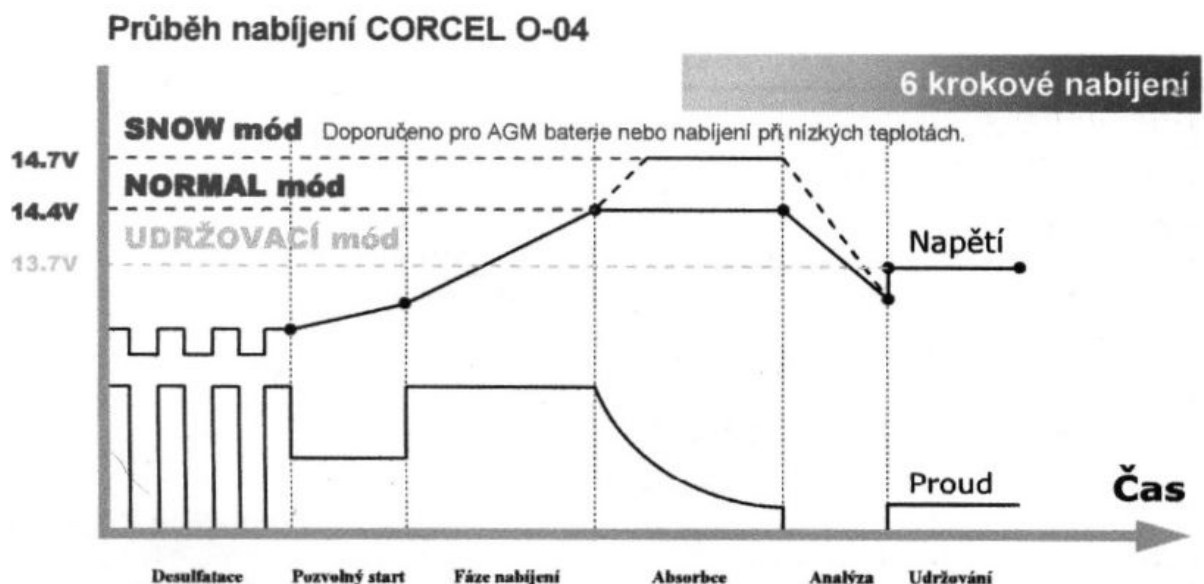


Obr. 4.2.8 Nabíjení NiCd akumulátorů – Metoda proudového ukončení, převzato z [5]

4.3 Nabíjecí metody Pb článků

Používané olověné akumulátory mají velké kapacity i velmi nízký vnitřní odpor a s tím spojené velké odběrové proudy, což je upřednostňuje v oblastech zálohování radiostanic apod. a také jako zdroje pro drobná vozítka a elektrokola. Na druhou stranu nemají schopnost akumulovat velké množství energie, a proto se nabíjecí proud nejčastěji volí $0,1 I_t$, čemuž odpovídá i dlouhá doba nabíjení, 10 hodin a více. Ovšem pro danou aplikaci není rychlost nabíjení kritická. Nominální napětí olověného článku je 2 V.

Nejčastěji se olověné akumulátory nabíjí konstantním zdrojem napětí s omezenou velikostí proudu, podobně jako Li-Ion baterie metodou CCCV. Koncové napětí se volí 2,3 V na článek pro „trvalé dobíjení“, které nezpůsobuje přebíjení a udržuje článek plně nabitý, nebo 2,4 V pro občasné dobíjení tzv. „cyklický režim“, který však již způsobuje plynování článku. Jelikož je závěrečná fáze dobíjení na 100 % kapacity při trvalém dobíjení příliš zdlouhavá, často se začne nabíjet s konečným napětím pro cyklický režim a po jeho dosažení se po 10-ti a více minutách přechází na konečné napětí pro trvalé dobíjení anebo se přejde na dobíjení konzervačním proudem o velikosti $0,01 I_t$ a méně. Konzervační proud je možné provádět i kapkovým (pulsním) režimem [15].



Obr. 4.3.1 Několikastupňový průběh nabíjení 12 V olověného akumulátoru, převzato z [16]

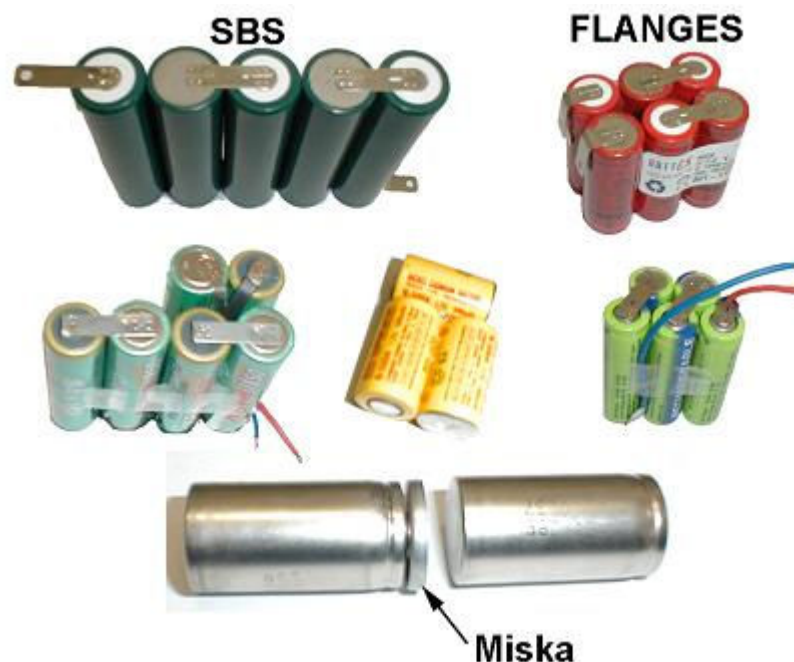
V praxi se můžeme setkat s velmi rozličným přístupem k nabíjení olověných akumulátorů s několika různými fázemi. Příkladem je nabíjecí charakteristika na obr. 4.3.1 s těmito fázemi: 1. Desulfatace; 2. Jemné nabíjení (měkký start); 3. Hlavní nabíjení; 4. Absorpce (časová fáze); 5. Analýza; 6. Udržovací nabíjení [16].

4.4 Kompletování článků do baterií

Z důvodu nízkého nominálního napětí používaných článků se v oblasti ručního nářadí setkáváme s bateriemi složenými z minimálně šesti článků NiCd, případně NiMH nebo 2 článků Li-Ion. Důležitou součástí baterií jsou ochranné prvky, teplotní čidla nebo vnitřní elektronika (vždy u Li-Ion), o kterých se zmiňují následující kapitoly. Baterie, která má ochranné plastové pouzdro a je určena pro rychlé nabíjení, by měla zároveň obsahovat otvory pro nucený průchod vzduchu kolem článků, a tím umožňovat odvod přebytečného tepla z baterie. Snižování teploty je vhodné pro životnost článků a také značně urychluje nabíjení. Baterie se rychle zahřeje a nabíjecí proces musí přejít na nižší proud nebo předčasně nabíjení ukončit, bohužel častá praxe.

Volné sestavy

Tyto baterie jsou vytvářeny sériovým propojováním akumulátorových článků pomocí bodově přivařených kovových pásek nebo misek. Různé možnosti prostorového uspořádání článků v bateriích sestavených z válcových článků jsou na obr. 4.4.1. V horní části obrázku jsou dva nejčastější druhy sestav: SBS (z anglického Side-By-Side) a Flanges. Uprostřed jsou příklady zákaznických sestav, které jsou vyráběny přímo pro dané aplikace odběratele. Dole pak vidíme propojování akumulátorů pomocí misek nad sebe do válečků, často se toto zapojení označuje „Stick“.



Obr. 4.4.1 Příklady prostorového uspořádání válcových akumulátorů, převzato z [5]

K sestavě baterií musí být použity články zcela shodné, vždy z jedné výrobní série. Mechanická pevnost baterií je zajištěna pomocí propojovacích prvků. Jednotlivé články mohou být mezi sebou spojeny vteřinovým lepidlem, tavným lepidlem nebo tmelem. Povrch baterie bývá chráněn plastovou teplem smrštitelnou fólií nebo hadicí. Některé typy baterií jsou opatřeny plastovými čely, která umožňují pevnější mechanické spojení s přístrojem. Baterie jsou opatřeny vývody ve formě kovových pásků, kablíků nebo různých typů konektorů.

Baterie v plastových pouzdrech (akupack)

Jednoučelové baterie v plastových pouzdrech jsou v současné době nejběžnějším typem hermetických akumulátorových baterií. Akumulátorová baterie je velmi špatným vodičem tepla, protože články tvořící baterii bývají umístěny do plastového pouzdra, povrch článků je opatřen plastovou nebo papírovou izolační vrstvou, viz obr. 4.4.2. Sada elektrod proložených několika vrstvami separátorů rovněž znesnadňuje průchod tepla a tím vyrovnání teplot. Jak je patrné z obr. 4.4.3, výrobci baterií využívají různé profily zásuvných konektorů, které zpravidla zabraňují vložení baterie jiným způsobem.



Obr. 4.4.2 Uspořádání bateriové sestavy

Ovšem poměrně rozšířený oválný konektor bez zámku na baterii (prostřední baterie na obrázku) opačné vložení umožňuje a nabíječ musí být vybaven ochrannou proti přepólování. Konektor by měl také mechanicky zajišťovat správný sled připojovaných kontaktů, nejprve výkonové vývody baterie a následně kontakty pro vnitřní vybavení z důvodů přechodových dějů při vyrovnávání napětí nabíječe a baterie.



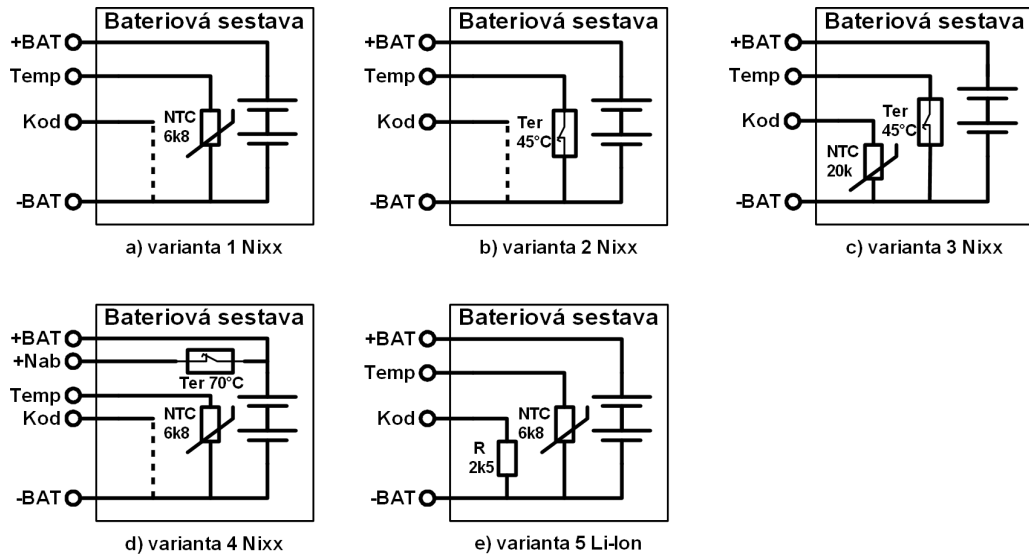
Obr. 4.4.3 Různé druhy provedení baterií v plastovém pouzdře

4.5 Funkční vybavení baterie

Jak již bylo řečeno, rychlé nabíjení se z důvodu bezpečnosti a šetrnosti neobejde bez zpětné teplotní vazby. Proto jsou baterie pro ruční nářadí vždy vybaveny teplotním senzorem, který je vhodně umístěn v baterii na místě, kde dochází k nejvyššímu zahřívání. V ideálním případě je připevněn přímo na kritický článek. Nejběžnějším senzorem je termistor typu NTC (s rostoucí teplotou snižuje svůj odpor - nelineárně) s hodnotou 6,8 k Ω , výjimečně 10 k Ω nebo 20 k Ω . Další možností, jak může být nabíječ informován o teplotě, je pomocí termostatu, který je sepnut a při přesažení maximální teploty se rozpojí. Rozpínací teplota termostatu je velmi vysoká a v případě, že dojde k jeho rozepnutí, znamená to závažný nárůst teploty a jasný signál pro nabíječ, aby nabíjecí proces ukončil.

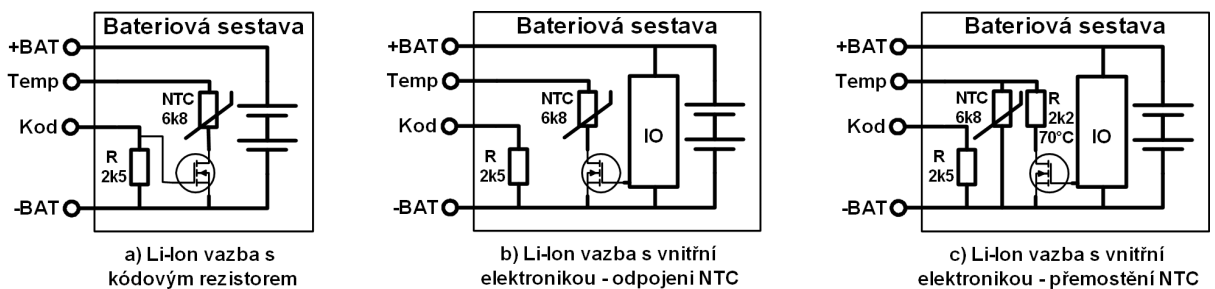
Výrobci dodávají různé bateriové sestavy, které mají stejné zásuvné konektory, a je nutné zajistit, aby nabíječ správně rozlišil o jaký druh a počet článků se jedná, a na základě toho upravil parametry nabíjecího procesu. U Li-Ion baterií je nezbytně nutné vědět o počtu článků, neboť nabíjecí metoda pracuje s konečným napětím. Avšak u NiCd nebo NiMH baterie informace o počtu článků být nemusí, neboť metoda založená na detekci $-\Delta V$ je schopna z velikosti napětí baterie určit velikost sledovaného poklesu, který ukončí nabíjení. Tato identifikace je nejčastěji prováděna „kódovacím rezistorem“, který svou hodnotou informuje nabíječ o vložené baterii. Jde o rezistor v řádu k Ω nebo propojení či přerušování.

Teplotní senzor a kódovací rezistor jsou jedním koncem uvnitř baterie spojeny se záporným pólem baterie a druhý konec je vyveden na samostatný kontakt. Různá provedení jsou na obr. 4.5.1. Termostat není v hlavní proudové větvi baterie, neboť jsou zde velké vybíjecí proudy. Aplikace termostatu je pouze signalizační a ve výjimečném případě může být vřazen do nabíjecí větve, viz obr. 4.5.1, d) jako havarijní při překročení 70 °C.



Obr. 4.5.1 Varianty zapojení baterie s termistorem, termostatem a kódovacím rezistorem

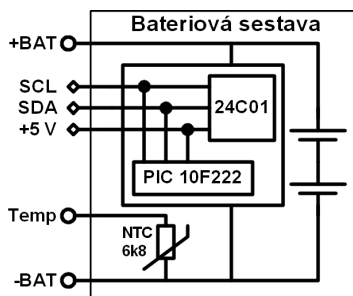
U baterií Li-Ion se můžeme setkat s podmíněným připojením NTC, jak je symbolicky naznačeno na obr. 4.5.2 a), kdy je použit tranzistor, který připojí NTC až při napětí na kódovém rezistoru vyšším než 0,8 V. Zabraňuje se tím spuštění nabíjecího procesu, pokud není kontakt kódovacího rezistoru správně připojen k nabíječi. Podobným způsobem může vnitřní elektronika odpojit NTC nebo jej přemostit rezistorem (simuluje se teplota vyšší než 70 °C), pokud vyhodnotí konec nabíjení nebo překročení sledovaných veličin, viz obr. 4.5.2. b) a c). I starší nabíječ musí přestat nabíjet, a tak jej lze využít pro nové nebo nestandardní baterie.



Obr. 4.5.2 Příklady podmíněného připojení/odpojení NTC u Li-Ion baterií

Identifikace u nových baterií je sofistikovanější, založená na různých druzích sériové digitální komunikace, jako jsou I2C nebo 1-Wire a další. Tato sériová rozhraní slouží ke čtení nebo zápisu dat z paměti EEPROM, která je uvnitř baterie a ve které jsou uloženy informace o baterii. Komunikace může probíhat i s mikroprocesorem vnitřní ochranné elektroniky, viz následující kapitola. Nabíječ má k dispozici základní informace o druhu a počtu článků,

kapacitě a mezních hodnotách proudů, teplot nebo konečného napětí pro Li-Ion baterie. Dalším využitím paměti může být statistika počtu nabití nebo přesažení mezních hodnot, jakými jsou teplota a maximální vybíjecí proud atd. Ukázka vnitřního vybavení baterie s I2C je na obr. 4.5.3.



Obr. 4.5.3 Vnitřní zapojení baterie Li-Ion s I2C sběrnici a komunikací s pamětí a procesorem elektronické ochrany

4.6 Ochranné vybavení baterií

Nepřímou ochranou, instalovaným teplotním senzorem, bateriových sestav při nabíjení se zabývá předchozí kapitola. Přímá ochrana reaguje na hrozící poškození baterie nebo nebezpečí pro obsluhu a majetek. Při správném používání se do práce s baterií nevměšuje a svou přítomností by neměla přispívat ke zhoršení parametrů. Dvě nejdůležitější sledované veličiny jsou provozní teplota a proudy baterie. U sestav Li-Ion je sledováno také napětí. Ochrana při překročení proudu nebo teploty může být realizována vřazením termostatu, pojistky nebo polyswitchu do série s články baterie. U baterií Li-Ion se takřka vždy implementuje vnitřní ochranná elektronika, která může články odpojit pomocí tranzistoru. Z hlediska bezpečnosti se doporučuje u každé baterie, která se skládá z více jak třech článků, použít alespoň jeden z bezpečnostních prvků. Cena těchto prvků bývá řádově několik desítek korun, ale cena zařízení, které mají chránit, je většinou několikanásobně vyšší.

Termostat

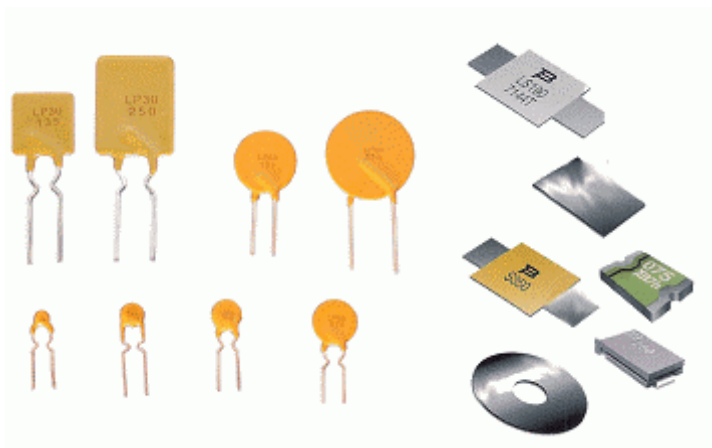
Jedná se o teplotní bezpečnostní prvek. Termostaty vypínají proudový okruh při překročení určité teploty. Používají se termostaty, které vypínají od 40 °C do 85 °C. Zapojují se sériově s články baterie nebo jsou vyvedeny na zvláštní kontakt, viz předchozí kapitola. Většinou jsou termostaty rozpínací (při zvýšené teplotě se rozeznou). Jsou používány tyto značky termostatů: PEPI, Texas Instruments, Klixon a TB02, viz obr. 4.6.1.



Obr. 4.6.1 Ukázka termostatů, převzato z [5]

Teplotní proudová a tavná pojistka

Dalším typem ochranného prvku bývá teplotní proudová pojistka, která se vkládá sériově do akumulátorové baterie. Je však nevratná a tak je její využívání omezeno. Oproti polyswitchi má však pevně stanovenou vypínací teplotu i pevně stanovený vypínací proud. K vypnutí dojde při překročení jednoho z hlídaných parametrů. Setkat se však také můžeme s klasickou proudovou tavnou pojistkou proti zkratu, která je silně naddimenzovaná. Velkou nevýhodou je, že při neopatrném zacházení s baterií v uzavřeném plastovém pouzdře dochází díky nevratným pojistkám vlastně ke zničení funkce celé baterie.



Obr. 4.6.2 Ukázka polyswitchu, převzato z [5]

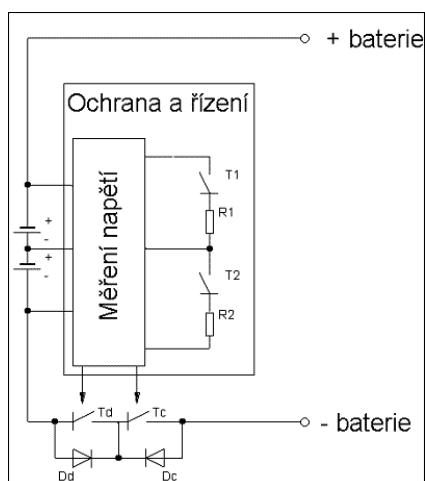
Polyswitch

Jako další bezpečnostní prvek, popřípadě jako náhrada za termostat, se používají součástky dodávané pod označením polyswitch. Funkce je zde opět pouze bezpečnostní. Polyswitche vypínají jak při určité teplotě, tak při překročení nabíjecího nebo vybíjecího

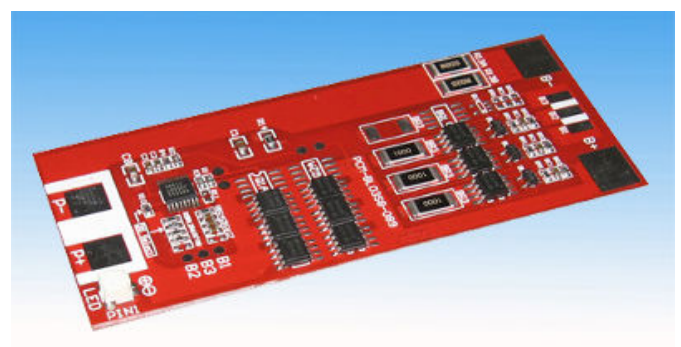
proudu, respektive se jedná o závislost okolní teploty a protékajícího proudu. Právě při zkratu jsou daleko rychlejší než termostaty. V lithiových bateriích se používají výhradně polyswitche místo termostatů, které jsou pro lithiové akumulátory pomalé, a tím i zcela nevhodné. Polyswitch je stejně jako termostat vratná pojistka [17].

Vnitřní ochranná elektronika

Vnitřní elektronika je nezbytnou součástí Li-Ion baterií, kde zajišťuje ochranu a vyrovnávání napětí článků (*cell balancing*). Vnitřní elektronika se začíná objevovat i u článků NiCd a NiMH. Na obrázku 4.6.3 vidíme schematické zobrazení ochrany a řízení provozu lithiových článků. Odporů R1 a R2 slouží k vyrovnávání napětí jednotlivých článků za pomoci tranzistorů T1 a T2. Tranzistory T_D a T_C jsou při běžném provozu sepnuté. Pokud je při nabíjení dosaženo konečného nabíjecího napětí, dojde k rozepnutí tranzistoru T_C, a tím i k odpojení nabíjecího obvodu. V případě vybití článků pod stanovenou mez dojde k rozepnutí tranzistoru T_D a přerušení vybíjení. Z tohoto schématu vyplývá důvod, proč se doporučuje mít baterie složené z lithiových článků v nabitém stavu, a tak je i skladovat. Pokud je v baterii jeden článek s nižší kapacitou (např. na konci životnosti) nebo s vyšším samovybitím, dochází neustále i při vypnutém spotřebiči k vyrovnávání napětí všech ostatních článků v baterii a mohlo by dojít k vybití nejen na hodnotu konečného vybíjecího napětí, ale až na hodnoty pod povolenou bezpečnostní mez, kdy již běžné nabíječe tento akumulátor nenabijí [5, 18, 19].



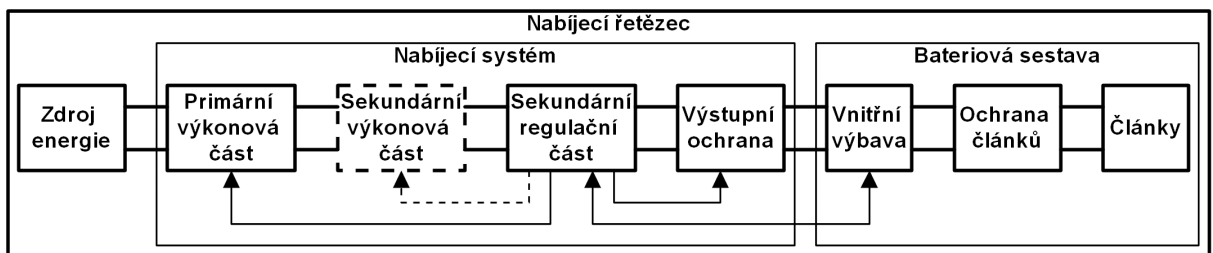
Obr. 4.6.3 Schéma vnitřní elektroniky [5]



Obr. 4.6.4 Vnitřní elektronika s balancérem [5]

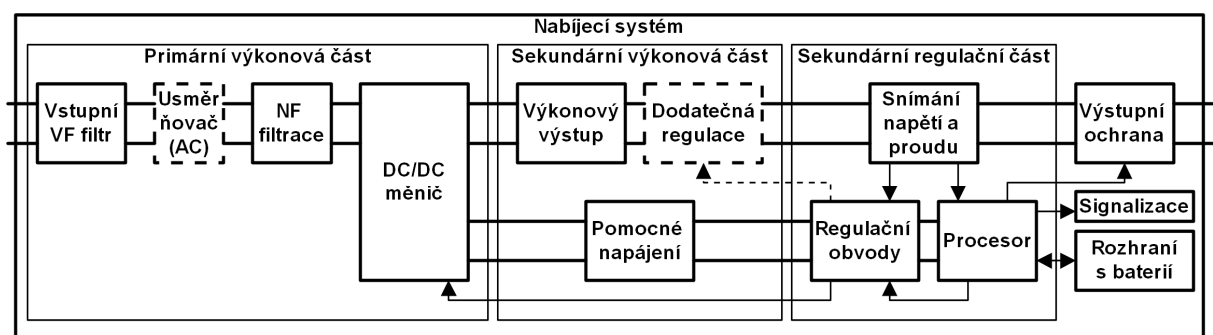
5 Technické vybavení nabíjecích systémů

Tato kapitola se věnuje technické části nabíjecích systémů. Vychází z požadovaných vlastností a předvádí praktické řešení dílčích problémů s ohledem na jednoduchou a přehlednou strukturu navrhovaného zařízení. Předpokladem je snadné řízení nabíjecího procesu s co nejmenšími úpravami při inovaci nebo rozšíření požadovaných vlastností. Důraz je tedy kladen na modularitu a jednotný princip regulace nabíjecího procesu.



Obr. 5.1 Blokové uspořádání nabíjecího řetězce

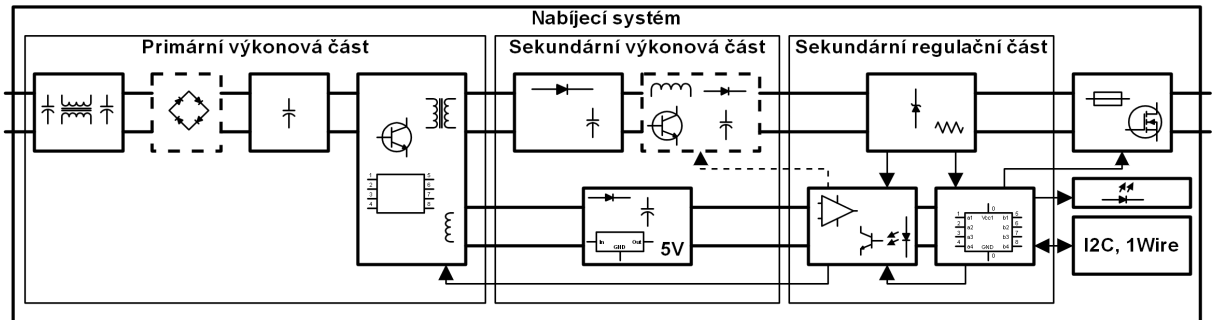
Při rozdělování do dílčích částí lze vycházet z blokového modelu nabíjecího řetězce na obr. 5.1, kde se nabíjecí systém dělí na čtyři části: primární výkonová, sekundární výkonová, regulační část a výstupní ochrana. Pro potřeby návrhu je tato modularita nedostačující, a tak je nutné systém dále rozdělit na konkrétnější úseky, které jsou specializované určitou funkcí. Obrázek 5.2 naznačuje vhodné rozdělení nabíjecího systému do specializovaných úseků s předpokládanou implementací procesoru.



Obr. 5.2 Podrobné rozdělení nabíjecího systému

Obrázek 5.3 naznačuje, jaké součástky jsou typické pro konkrétní úseky tvořící nabíjecí systém. Pro jednoduché aplikace není nezbytně nutné, aby systém obsahoval všechny úseky. U starších nebo úzce specializovaných nabíjecích systémů chybí procesor anebo je sekundární

nebo primární část nahrazena integrovaným obvodem, který zastává několik funkcí. Dodatečná regulace se objevuje také jen zřídka. Primární výkonová část je závislá na druhu napájecího napětí a požadovaném výkonu a její konstrukce je zpravidla nejobtížnější, neboť jsou na ní kladeny vysoké nároky a její vlastnosti ovlivňují parametry celého nabíjecího systému.



Obr. 5.3 Podrobné rozdělení nabíjecího procesu se symbolickým obsahem součástek

Sekundární výkonová část je zpravidla jen pasivní, ovšem můžeme do ní zařadit i pomocný napěťový obvod pro napájení regulační části, která má společný potenciál se záporným pólem baterie (nulovým pólem výstupní výkonové větve), ale je na výstupním napětí nezávislá. Sekundární regulační část zajišťuje nejen regulaci požadovaného výkonu tekoucího do baterie, ale také regulaci nabíjecího procesu, kterou řídí procesor programovým vybavením. Procesor také využívá vnitřní vybavení baterie, ať už se jedná o teplotní senzor nebo komunikaci s vnitřní elektronikou baterie. Rovněž procesor signalizuje stav nabíjení a ovládá výstupní ochranu nabíjecího systému. Pro účely regulace a řízení nabíjení je snímáno výstupní napětí a proud. Jednotlivé úseky jsou dále řešeny samostatně pro snadnější porozumění dílčím problémům. Pro pochopení interakce s ostatními úseky nebo systému jako celku poslouží blokové schéma, případně rekapitulující nebo doplňující poznámka u daného úseku. (Uvedení kompletního technického řešení je z důvodu komerčního vývoje nežádoucí.)

5.1 Požadované vlastnosti nabíjecích systémů

Nabíjecí systémy určené pro baterie ručního nářadí spadají do spotřební elektroniky a právě z tohoto důvodu vyplývají mnohé omezující faktory pro návrh. Cena je prvním a posledním, co ovlivňuje konstrukční provedení, neboť produkt musí být konkurenceschopný a přinášet dostatečný zisk. Kupodivu jen malou měrou je úspěšnost na trhu ovlivněna deklarovanými vlastnostmi, jakými jsou rychlost nabíjení, způsob nabíjení a další

nestandardní funkce, které ukazují na kvalitu nabíjecího zařízení. Mnoho nabíjecích systémů nereaguje na požadavky trhu, ale jsou takzvaně zákaznické. V takovém případě jsou předloženy požadované vlastnosti na budoucí systém, které mají zpravidla nízké nároky na rychlost nabíjení a používané metody. Přestože požadavky na nové zařízení jsou rozdílné, není vhodné začít vývoj zcela od nuly, ale přímo se nabízí využít, pokud je to jen trochu možné, nějaké části z již hotových a ověřených systémů, případně je upravit, aby vyhovovali novému zadání. Tímto postupem lze vývoj značně urychlit a zároveň minimalizovat chyby nebo problémy, jež ho provází. Proces sestavování ověřených bloků se neobejde bez vhodného rozdělení nabíjecího systému na moduly se specializovanou funkcí, tak jak je to na obr. 5.2. Další výhodou, která je již nad rámec této práce, je pružné a relativně přesné odhadování cenové náročnosti daného požadavku a jeho předložení zákazníkovi bez předběžného vývoje prototypu. Nutno dodat, že vývoj konstrukce, pokud jsou již moduly ověřeny, je podstatně méně náročný, nežli vývoj programového vybavení. Program je nutné upravit podle daného požadavku a zároveň jej otestovat i v případě drobných změn.

Obecné požadavky na nabíjecí systém:

- nízká cena,
- jednoduchá a přehledná konstrukce (snadná výroba, testování a hledání závad),
- snadná budoucí modifikace, modularita,
- spolehlivost a odolnost před neúmyslným poškozením,
- spotřeba a účinnost.

Požadavky na parametry nabíjecích systémů:

- rychlost nabíjení, výkon,
- schopnost nabíjet více druhů a počtu článků (univerzální),
- spolehlivost a šetrnost nabíjení, používání více metod nabíjení a ukončení, detekce vadných baterií (inteligentní).

5.2 Primární uspořádání

Nejdůležitější částí nabíjecího systému je primární výkonový měnič, který slouží k přenosu energie ze vstupu na výstup s vhodnými napěťovými a proudovými parametry. Jedná se o spínaný zdroj, na který jsou kladeny vysoké nároky, neboť dosažené vlastnosti jsou základem pro správnou činnost celého zařízení. Hlavní důraz je kladen na cenu primárního uspořádání, protože se jedná o největší položku. Navíc se oblast výkonových měničů stále vyvíjí a přináší nové způsoby řešení, na které je potřeba reagovat.

Aplikace spínaných zdrojů v nabíjecí technice má svá specifika daná činností. Realizovaný měnič musí dodávat dostatečný výkon v širokém rozsahu výstupního napětí, protože počet nabíjených článků v baterii může být značně rozdílný. Navíc musí být měnič schopen pracovat v proudovém režimu a opět v širokém rozsahu hodnot. V širokém rozsahu napětí a v proudovém režimu nejsou mnohé měniče a topologie schopny pracovat plynule a stabilně. Stabilita je důležitá pro samotný nabíjecí proces a především pro tichý režim bez akustických projevů a mohutných přechodových dějů. Při hledání vhodné konstrukce jsou potřeba znalosti z celé oblasti spínaných zdrojů, což je nad rámec této práce, a proto budou dále řešeny jen praktické a důležité problémy návrhu.

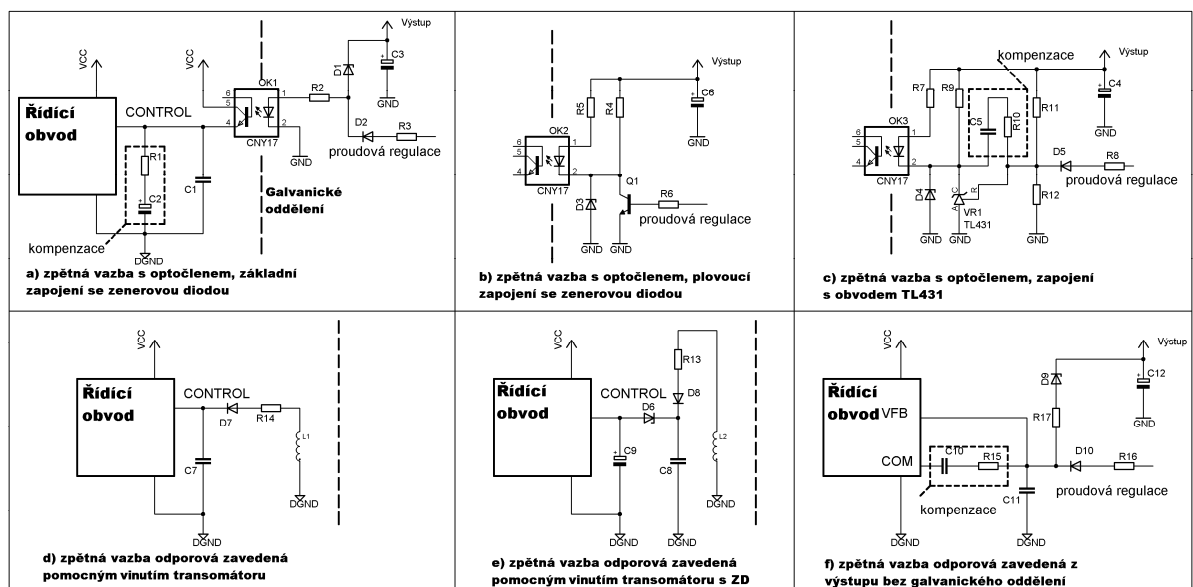
Zpětná vazba

Při návrhu nové topologie měniče nebo nového řídicího obvodu se až při zprovoznění ukáže, jaké jsou možnosti použité varianty. Sestavení zpětné vazby a její stabilizace si vyžaduje zkušenosti a správný odhad při nevhodném chování zdroje. Výrobce řídicích obvodů uvádí vhodné zapojení se správnou korekcí zpětné vazby, ovšem zpravidla pro napěťový režim s konstantní úrovní. Tyto údaje je dobré využít jako výchozí variantu, neboť s přechodem na proudový režim je korekce zpětné vazby nevhodná. Především z důvodu, že chování zdroje v proudovém režimu je mnohem dynamičtější a navíc zpětnou vazbu ovlivní i nezbytný proudový regulátor na sekundární straně, který je vždy silně integrační a má velmi pomalou odezvu.

Malou měrou ovlivňuje chování zdroje i charakter zátěže. Akumulátor lze považovat za kapacitní nebo odporovou zátěž. V případě využití reostatu jako zátěže s malou indukčností, je situace nepříznivější oproti použití baterie, ovšem úspěšnou stabilizací zpětné vazby získáme stabilizační rezervu kompenzující rozptyl parametrů součástí. Předpoklad pro vhodné chování mají řídicí obvody s vnitřní (primární) proudovou zpětnou vazbou

označovanou (*Inside Current-Mode Control*), která pracuje samostatně a podstatně přispívá ke správné reakci na rychlé vnější děje, jako je změna vstupního napětí [20]. Podstatou úspěchu je také potlačení rušení a neopomenutí zásad návrhu desek spínaných zdrojů.

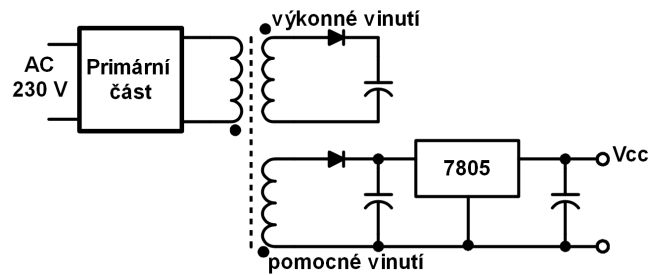
Při napájení stejnosměrným nízkým napětím lze použít pro primární a sekundární části galvanické (odporové) spojení zpětné vazby. Pro síťové aplikace, kde je vždy nutné zajistit galvanické oddělení, se nejčastěji volí optočlen. Ukázky různých variant sestavení zpětných vazeb jsou na obr. 5.2.1.



Obr. 5.2.1 Různé varianty zpětných vazeb

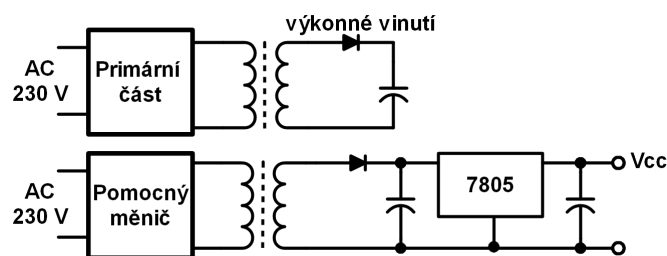
Pomocné napájení

Sekundární regulační část má vlastní napájecí zdroj, zpravidla o napětí 5 V, který zajišťuje jeho trvalé napájení a regulaci bez ohledu na výstupní napětí nabíjecího zařízení. Pomocný napěťový zdroj může využívat činnosti primárního (hlavního) měniče, přidáním nezávislého vinutí, viz obr. 5.2.2. Aby byla regulační část stále napájena, musí hlavní měnič alespoň částečně pracovat. Ovšem při činnosti může docházet k malému, ale trvalému dobíjení připojené baterie, a proto se při tomto způsobu napájení instaluje tranzistor pro odpojení baterie, více v kapitole 5.5.

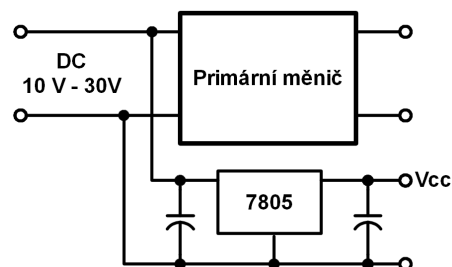


Obr. 5.2.2 Napájení regulační části z pomocného vinutí hlavního měniče

Nízká činnost měniče se udržuje automaticky, pokud je baterie odpojena, pomocí zpětné vazby od omezení maximálního výstupního napětí, viz kapitolu 5.4.3. Kurióznější je případ, kdy se samotné pomocné napětí sníží na hodnotu (3 V až 4 V), při které už dochází k nedostatečnému přenosu zpětné vazby nízkým napětím, a tím se činnost měniče ustálí, aniž by došlo k resetování procesoru. Z výše uvedených nedostatků pomocného vinutí se přistupuje k napájení regulační části vlastním měničem s malým výkonem, což je o málo dražší varianta, ale je zajištěno stálé napájení a nižší spotřeba při zcela vyřazeném hlavním měniči, viz obr. 5.2.3. Pokud je nabíjecí zařízení napájeno z nízkého stejnosměrného napětí, řešením je pouze lineární stabilizátor, jak ukazuje obrázek 5.2.4.



Obr. 5.2.3 Napájení regulační části pomocným měničem



Obr. 5.2.4 Napájení regulační části pomocí lineárního stabilizátoru

Volba topologie měniče

Jak již bylo řečeno, volba topologie měniče a volba řídicího obvodu není snadná, jelikož ne každá varianta může být pro nabíjecí proces vhodná. Topologie měniče je otázkou především výkonu a dále záleží na požadovaných vlastnostech. Pro orientační výběr mohou posloužit následující vlastnosti v tabulce 5.2.1. Nejčastěji se objevují topologie blokujícího a propustného měniče, neboť běžné výkony rychlého nabíjení nepřesahují 150 W. Výjimečně se objevují netradiční varianty dvojčinných měničů. Aplikace rezonančních měničů pro nabíjení je velmi omezená z důvodu velmi malé ovladatelnosti a úzkého napětového rozsahu výstupního napětí. Rezonanční měniče aplikované jako náhrady akumulátorových baterií pracující v pulsním režimu, kdy mohou nabývat velmi malých rozměrů.

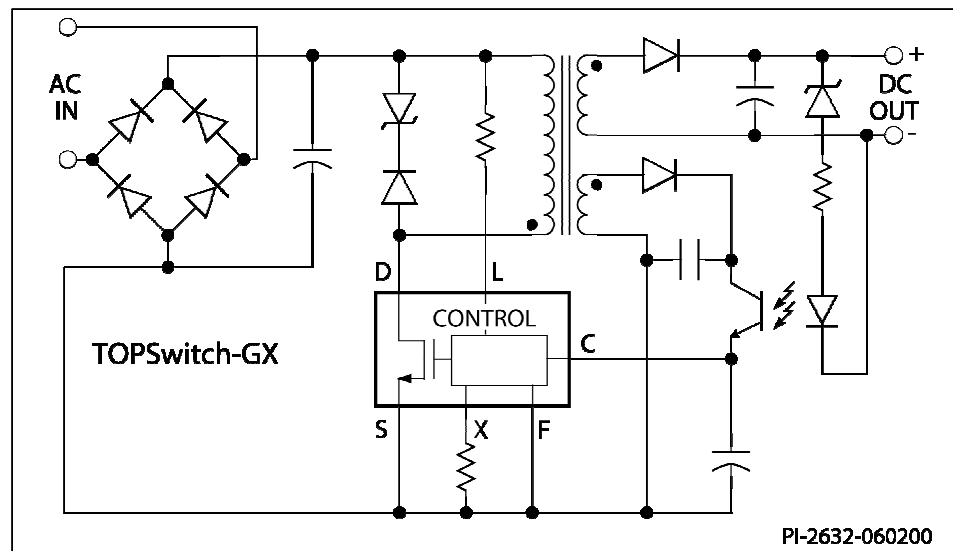
Tab. 5.2.1 Orientační tabulka pro volbu topologie měniče

Topologie	Výkon [W]	Účinnost [%]	Vlastnosti
Blokující měnič <i>Flyback</i>	0–250	70-80	nízká cena, dobrá ovladatelnost, nižší účinnost, často používaný
Propustný měnič <i>Forward</i>	100-500	70-80	vyšší cena, horší ovladatelnost, nízká účinnost, vyšší výkony
Dvojčinné měniče <i>Push-pull</i>	< 1000	80 - 90	vyšší cena, problematická ovladatelnost, velké výkony
Rezonanční měnič <i>resonant converter</i>	< 2000	vysoká	vysoká cena, nelze ovládat, vysoká účinnost, velké pulsní výkony

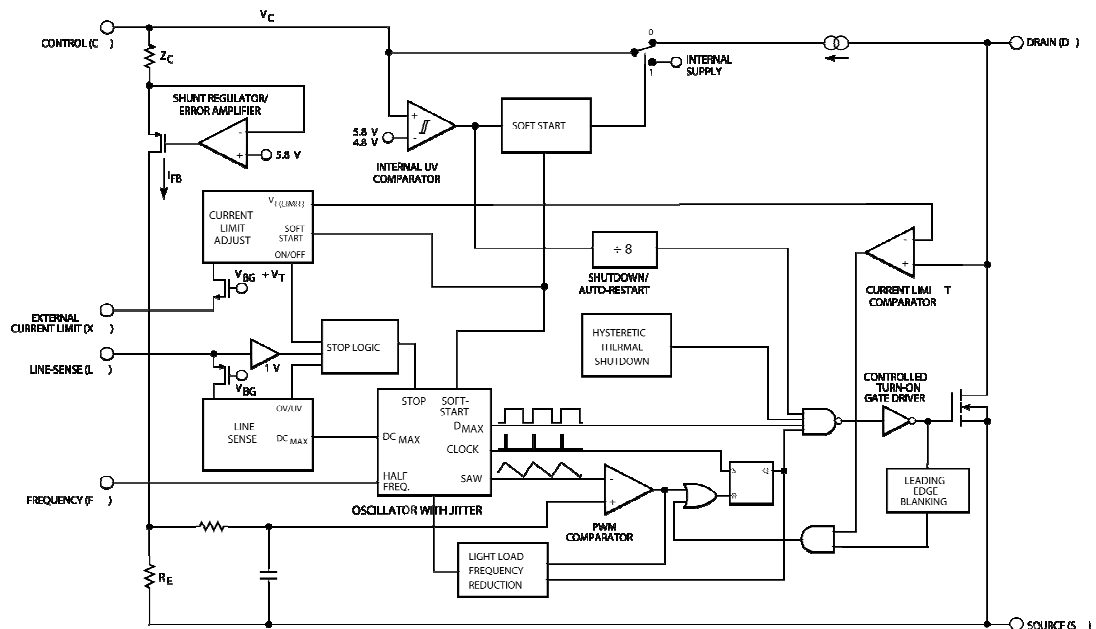
Řídicí obvody měničů

Volba řídicího obvodu má na výsledné chování měniče opět velký vliv. Vhodné řídicí obvody jsou vybaveny vnitřní proudovou vazbou, která velkou měrou přispívá k stabilnímu chování. Moderní řídicí obvody využívají i další způsoby ke zkvalitnění chodu měniče s ohledem na rušení nebo vyšší účinnost.

Objevují se obvody, které mají takřka všechny funkce integrované včetně aktivního prvku (spínací tranzistor). Návrh spočívá „pouze“ v přivedení zpětné vazby. Příkladem jsou obvody řady TOPSwitch firmy Power Integrations, které jsou optimalizovány pro široký rozsah výkonu. Typické zapojení blokujícího měniče je na obr. 5.2.5, vnitřní struktura tohoto pokročilého řídicího obvodu na obr. 5.2.6 [21].



Obr. 5.2.5 Typická aplikace obvodu TOPSwitch v blokujícím měniči, převzato z [21]

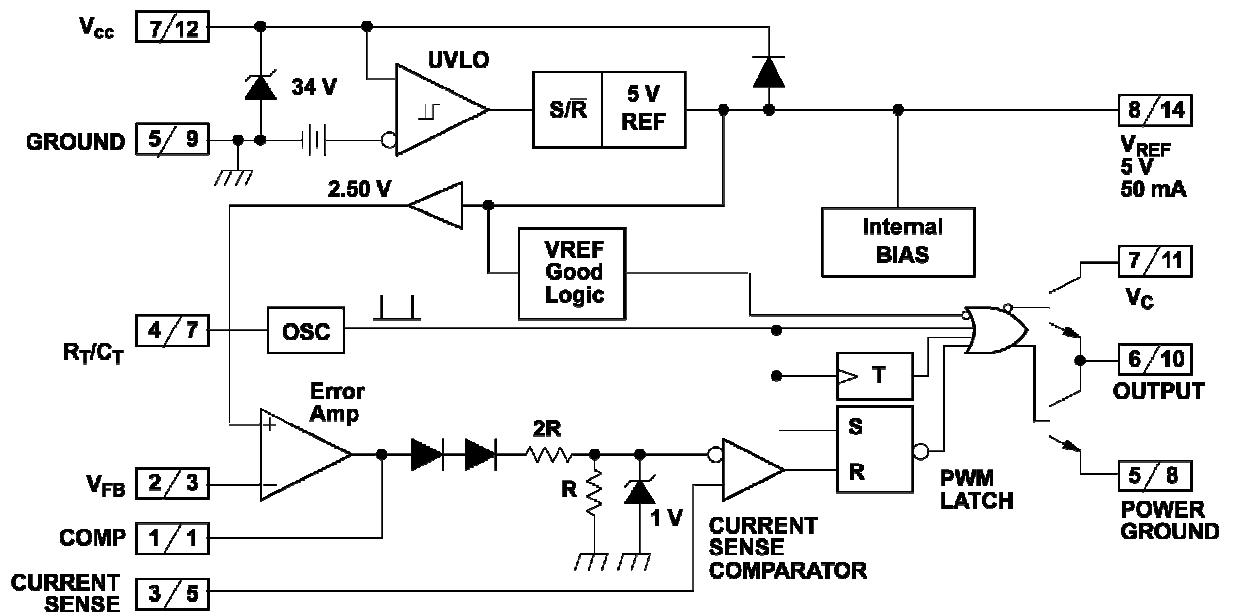


Obr. 5.2.6 Vnitřní struktura obvodu TOPSwitch, převzato z [21]

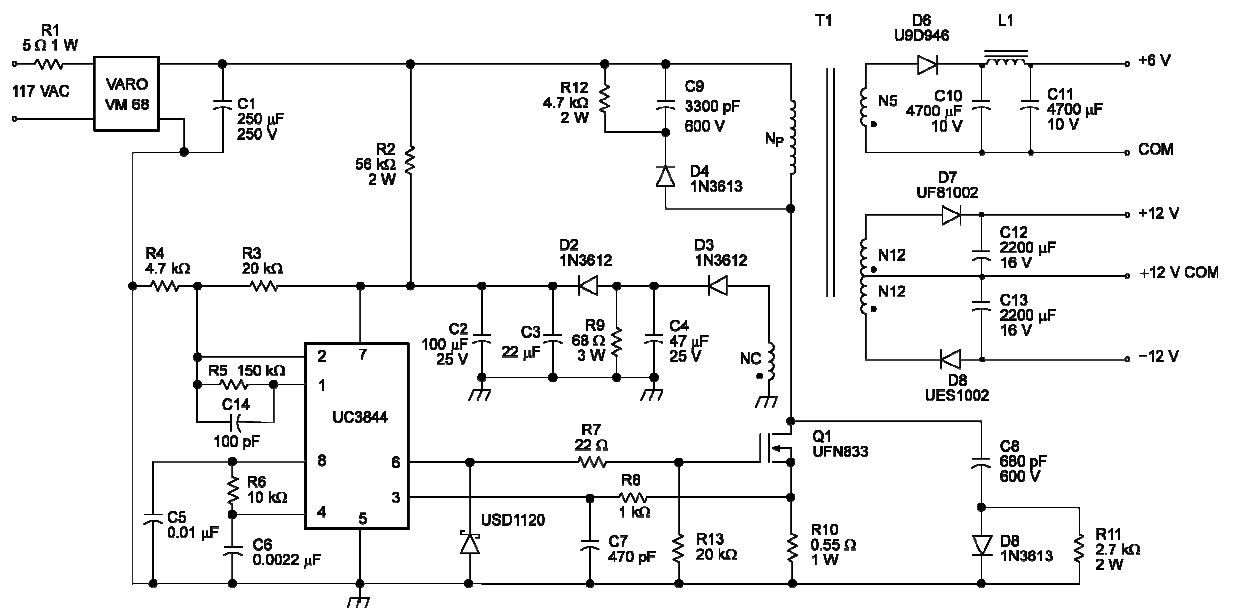
Nevýhodou moderních integrovaných řídicích systémů může být takzvaný „Burst mode“, což je režim řídicího obvodu, do kterého přechází při nízkém zatížení a je charakteristický krátkými intervaly činnosti měniče a delším intervalem nečinnosti. Přerušovaný režim přispívá k vyšší účinnosti a některé řídicí obvody jej používají už od 30 % zatížení. Takové chování je pro nabíjecí zařízení naprosto nevhodné, protože nelze dosáhnout malého kontinuálního proudu při nabíjení.

Standardem pro spínané zdroje je mnoho let obvod UC3842-5 s vnitřní proudovou vazbou a jednoduchou, avšak ověřenou vnitřní strukturou, viz obr. 5.2.7, který je stále aktuální a nabízený mnoha výrobci. Tento obvod je možné úspěšně využít v mnoha

aplikacích, jeho součástí je integrovaný budič tranzistoru MOSFET a referenční napětí. Typické zapojení blokujícího měniče je na obr. 5.2.8 [22].



Obr. 5.2.7 Vnitřní struktura obvodu UC3842, převzato z [22]



Obr. 5.2.8 Typická aplikace obvodu UC3842 v blokujícím měniči, převzato z [22]

Chlazení

Nabíjecí zařízení je zapouzdřeno, aby bylo chráněno před vnějšími vlivy, zejména prachem a nečistotou v pracovním prostředí. Prostup tepla přes stěny zařízení je omezený a výkonnější nabíječe vyžadují větrací otvory. Prvky, které se zahřívají, je vhodné umístit

dále od sebe, ale to není vždy žádoucí. Snahou je udržet nízkou teplotu součástí pouze pasivním chlazením. Při návrhu se dbá na to, aby odcházející teplo neohřívalo nabíjenou baterii, ba naopak se nabíjená baterie, je-li k tomu přizpůsobena, ofukuje z vnějšku nebo efektivněji vnitřními otvory. Od aktivního chlazení výkonové části se většinou upouští z důvodu hluku a nízké spolehlivosti ventilátoru.

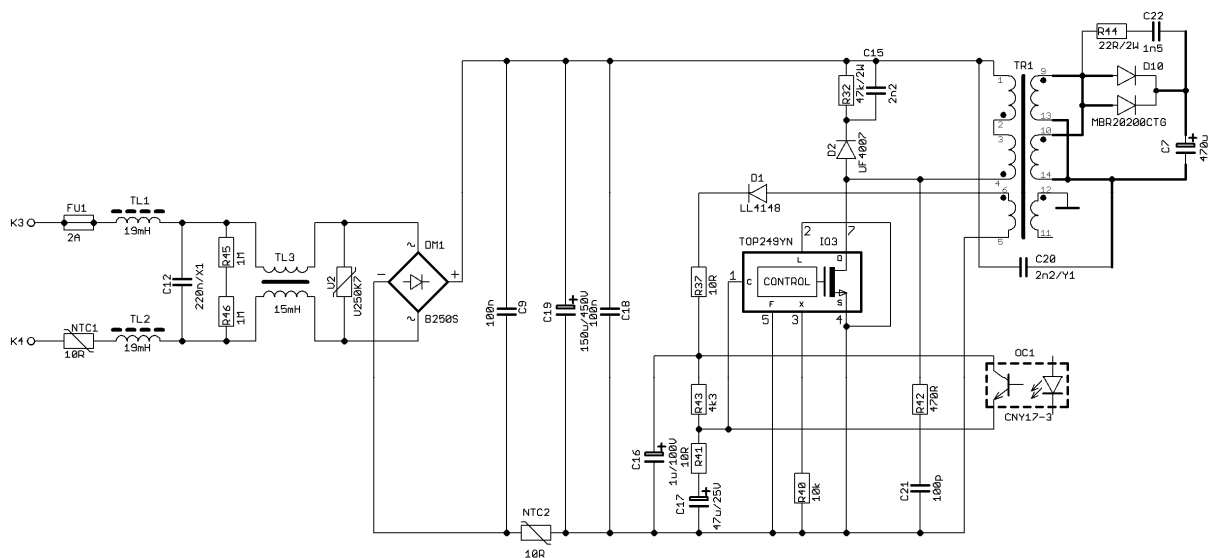
5.2.1 Systémy napájené síťovým napětím AC/DC

Nejběžnějším způsobem napájení je napájení z rozvodné sítě. Primární část nabíjecího zařízení musí v tomto případě výstup jednak galvanicky oddělit a jednak přizpůsobit výstupní napětí do příslušného rozsahu. Původním řešením byl klasický nízkofrekvenční transformátor, se kterým se dnes můžeme setkat u jednoúčelových zařízení s nízkým výkonem, viz kapitolu 3. Běžnější varianta primární části využívá spínaný měnič, který daleko lépe vyhovuje potřebným vlastnostem nabíjecího zařízení, neboť zajišťuje galvanické oddělení, transformaci napětí a zároveň i přenáší požadovanou velikost energie bez nutnosti dalších úprav [23].

Primární část s obvodem TOPSwitch

Konkrétní ukázka primární části vhodná pro stručný popis měničů středního výkonu je na obr. 5.2.1.1. Vstupní část obsahuje vysokofrekvenční filtr k potlačení přenosu rušení do rozvodné sítě tvořený standardně kondenzátorem C12 třídy X1 a proudově kompenzovanou tlumivkou TL3. Zde jsou navíc doplněny tlumivky TL1 a TL2. Zařízení je možné chránit pojistkou FU1 a varistorem pro potlačení přepětí z rozvodné sítě. Následuje můstkový usměrňovač DM1 (integrováný nebo z diskretních součástí), velký akumulární kondenzátor C19 a keramické nebo lépe fóliové kondenzátory C9 a C18 pro potlačení vysokofrekvenčních složek napětí generovaných měničem. Termistory NTC1 a NTC2 potlačují rázové proudy při připojení zařízení k síti a nabíjení akumulárního kondenzátoru. Blokující měnič díky své rozptylové indukčnosti generuje po rozepnutí výkonového tranzistoru (integrován v řídicím obvodu) krátké, ale vysoké přepětí a to je omezováno RCD soustavou, tvořenou rezistorem R32, kondenzátorem C15 a diodou D2, která zabraňuje poškození tranzistoru. Další časté omezující soustavy jsou kombinace diody a Zenerovy diody nebo transilu v sérii. Transformátor může obsahovat více vinutí. Zde jsou použita dvě pomocná vinutí pro napájení řídicího obvodu a sekundární regulační části. Sekundární výkonové vinutí je zpravidla jednocestně usměrněno (ve schématu je zdvojeno). K usměrnění je použita rychlá nebo

Schottky dioda. Na výstupní usměrňovací diodě, stejně jako na primárním vinutí, vznikají vysokofrekvenční napěťové kmity, které jsou nejčastěji tlumeny sériovým spojením RC, rezistor R44 a kondenzátor C22, které pro vf oscilace má silný útlumový charakter. Výstupní elektrolytický kondenzátor C7 je určen pro práci s impulsním proudem. Jeho velikost záleží na velikosti přenášeného proudu, přestože je při nabíjení bezprostředně spojen s baterií, která ovšem impulsní proudy vstřebávat nedokáže. Primární a sekundární strana měniče je propojena kondenzátorem C20 třídy Y1 pro zajištění definované kapacity přes galvanicky oddělený transformátor. Měnič je konfigurován dvěma vstupy F (5) a X (3) na maximální hodnotu primárního proudu 5 A.



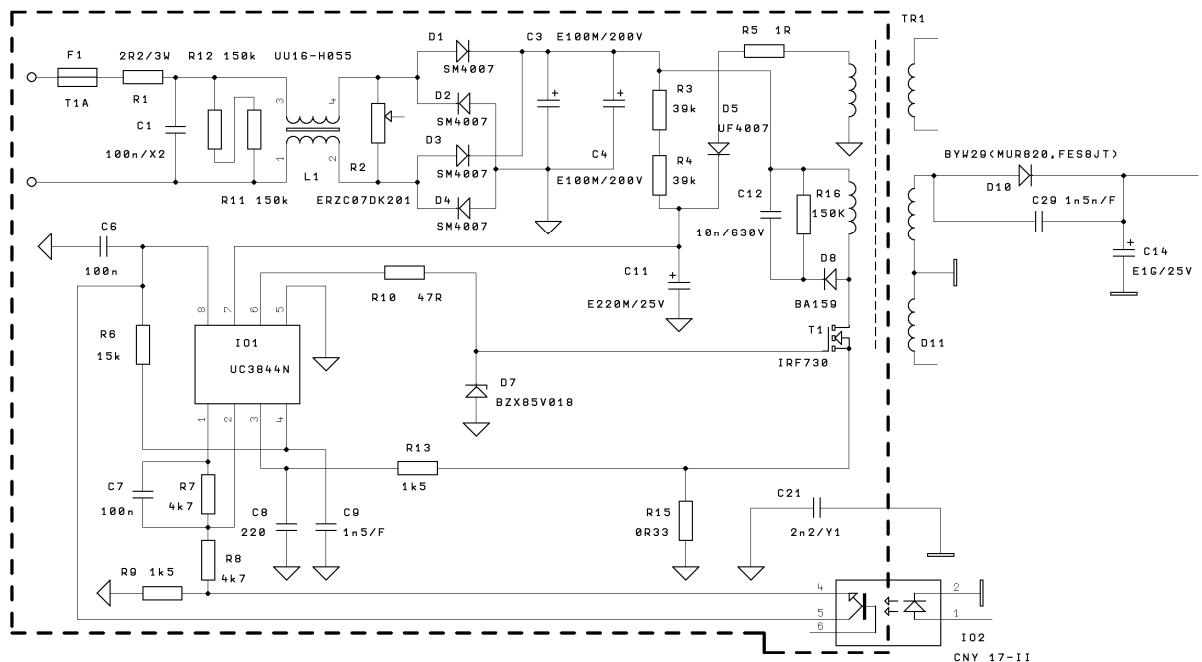
Obr. 5.2.1.1 Primární výkonová část s řídicím obvodem TOPSwitch

Tato konkrétní konfigurace umožňuje stabilní a plynulou regulaci v širokém rozsahu výstupního napětí a proudu až do výkonu 120 W, ovšem produkuje větší rušení, kvůli kterému je vstupní filtr doplněn o TL1 a TL2. Integrovaný výkonový tranzistor také ovlivňuje řídicí obvod, což se projevuje nepatrnými akustickými projevy z důvodů kolísání frekvence (*jitter*) [21].

Primární část s obvodem UC3843

Jedná se o variantu měniče s napájením 120 V AC s obdobnou konfigurací jako v předchozím případě. K výkonovému tranzistoru je zde zavedena primární proudová vazba se snímáním proudu sériovým rezistorem, která limituje proud na 3A. Toto zapojení má velmi dobré stabilní chování s rychlou dynamikou, která je pro nabíjení důležitá. Zároveň má

zapojení malou spotřebu při nečinnosti a relativně (vzhledem k topologii) vysokou účinnost. Tato konstrukce je vhodná pro nižší výkony do 60 W, kde generuje velmi malé rušení [22].

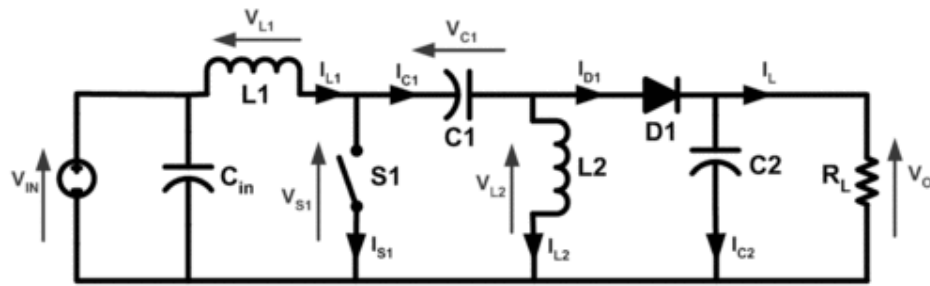


Obr. 5.2.1.2 Primární výkonová část s řídicím obvodem UC3843

5.2.2 Systémy napájené nízkým stejnosměrným napětím DC/DC

V místech, kde není k dispozici rozvodná síť, je možné využít jiné napájení, především palubní napětí v automobilu nebo velkokapacitní záložní baterii k tomu určenou. Zaměříme-li se na nejčastější napájení z automobilové baterie, dostáváme vstupní parametry napětí 10 V až 30 V (pro 12 V a 24 V síť) a možného odebíraného výkonu do 60 W. Stejně jako v případě napájení z rozvodné sítě se zde nabízí celá řada různých topologií měničů, jež lze využít. Pro tento druh napájení není nutné zajistit galvanické oddělení vstupu a výstupu, což umožňuje použít topologii DC/DC měničů bez transformátoru, neboť představuje cenovou zátěž a konstrukční problémy. Limitujícím jsou široké vstupní i výstupní napěťové rozsahy a nelze uvažovat o klasickém snižujícím nebo zvyšujícím měničích. Znovu se nabízí použití transformátoru nebo topologie, která umožňuje regulaci nezávislou na velikosti vstupního a výstupního napětí. Takovou topologií je SEPIC (*Single-ended primary-inductor converter*), která je na obr. 5.2.2.1. Měnič SEPIC využívá jeden spínací prvek, jednu usměrňovací diodu a dvojici tlumivek, které mohou využívat společné jádro. Primární a

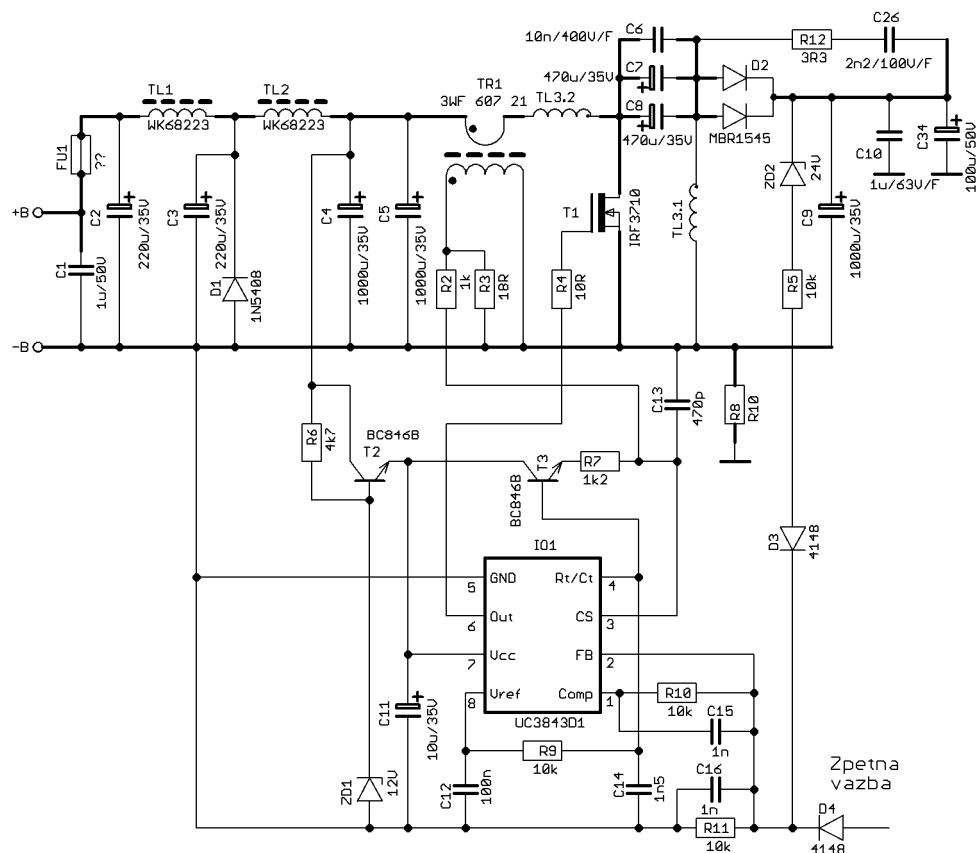
sekundární část měniče je v kladné větvi oddělena kondenzátorem, což umožňuje nezávislost na velikosti vstupního a výstupního napětí [24, 25].



Obr. 5.2.2.1 Schematické znázornění DC/DC měniče SEPIC

Primární část s obvodem UC3843

Jako řídicí obvod pro topologii SEPIC je možné použít UC3843 stejně jako pro síťovou variantu, ovšem s drobnými úpravami, viz obr. 5.2.2.2. Jelikož je vstupní napětí příliš nízké a spínané proudy veliké, není vhodné použít pro vnitřní proudovou vazbu snímací rezistor v sérii s výkonovým tranzistorem T1, protože by na něm byly značné ztráty a snižovala by se účinnost měniče. Proto je použit proudový transformátor TR1, který je vázán do série s primární tlumivkou TL3.2.



Obr. 5.2.2.2 Primární výkonová část s řídicím obvodem UC3843

Nevýhodou proudového transformátoru je jeho neschopnost přenášet stejnosměrnou složku proudu, která se negativně projevuje při spouštění měniče bez sestavené hlavní zpětné vazby, kdy měnič po krátkou dobu budí tranzistor T1 signálem s příliš velkou střídou a dochází ke značnému nárůstu proudu. Tento negativní jev lze redukovat rezistorem R10, který omezuje maximální střidu signálu pro buzení tranzistoru. Zapojení je mnohem citlivější na změny vstupního napětí a rušení, proto je zaveden slabý pilový signál do proudového vstupu pomocí tranzistoru T3 a rezistoru R7. Napájení pro řídicí obvod je přivedeno ze vstupního napětí pomocí lineárního stabilizátoru se Zenerovou diodou (R6, T2, ZD1). Při chodu měniče vzniká vysokofrekvenční rušení (menší nežli u síťové varianty), které je potlačováno dvojicí tlumivek TL1 a TL2. Přechodové jevy na výstupní diodě jsou opět tlumeny RC článkem. Kapacitní vazbu mezi primární a sekundární částí tvoří dvojice elektrolytických kondenzátorů určených pro pulsní proudy a fóliový kondenzátor přenášející vysoké frekvence napětí. Přestože je návrh problematický, neboť chování měniče SEPIC je velmi dynamické a proměnné v celém rozsahu vstupních a výstupních napětích, úsilí při hledání optimální konfigurace zpětné vazby a její kompenzování se zhodnotí velmi elegantním a cenově, jakož i konstrukčně příznivým řešením [22, 25].

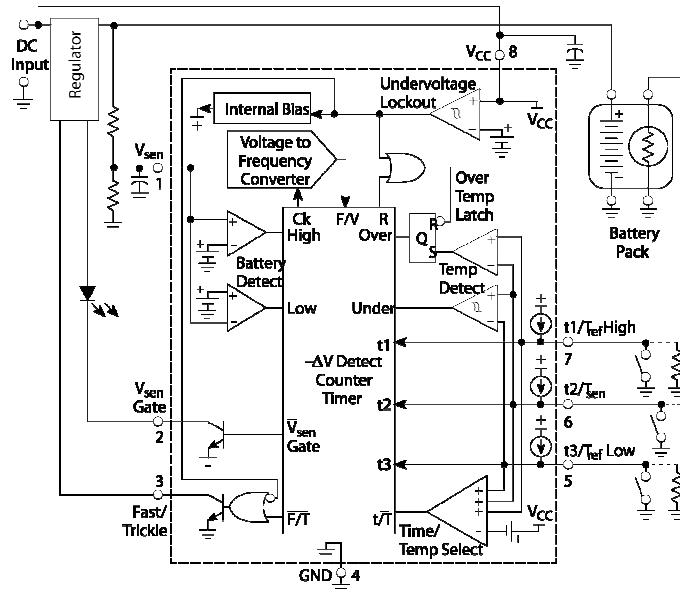
5.3 Samočinné nabíjecí systémy

Samočinné nabíjecí systémy jsou konstrukce, které nemají programové vybavení, tedy neobsahují mikroprocesor nebo jiný obvod, který je programově modifikovatelný. Takové nabíjecí zařízení využívá specializovaný integrovaný obvod, jehož činnost je modifikovatelná připojením externích součástek, nebo využívá konstrukci z méně specializovanými součástkami. Nabíjecí schopnosti jsou zde omezené a zpravidla se nabíjecí zařízení soustředí jen na jeden druh nabíjených článků v úzkém rozmezí jejich počtu. Metoda detekce konce nabíjení není vždy bezpečná ani šetrná k nabíjenému akumulátoru, a proto se zde často objevuje zastavení nabíjení rozepnutím termostatu při překročení vysoké teploty.

Integrované nabíjecí obvody

Specializované integrované obvody pro nabíjení jednoho nebo i více druhů článků jsou na trhu již dlouhou dobu. Jejich využívání bylo velmi rozšířené, ovšem v současné době jsou spíše na ústupu, neboť aplikace jsou velmi rozmanité a jejich modifikovatelnost nestačí. V oblasti nabíjecích zařízení pro ruční nářadí se pro Li-Ion články nesetkáváme s aplikací

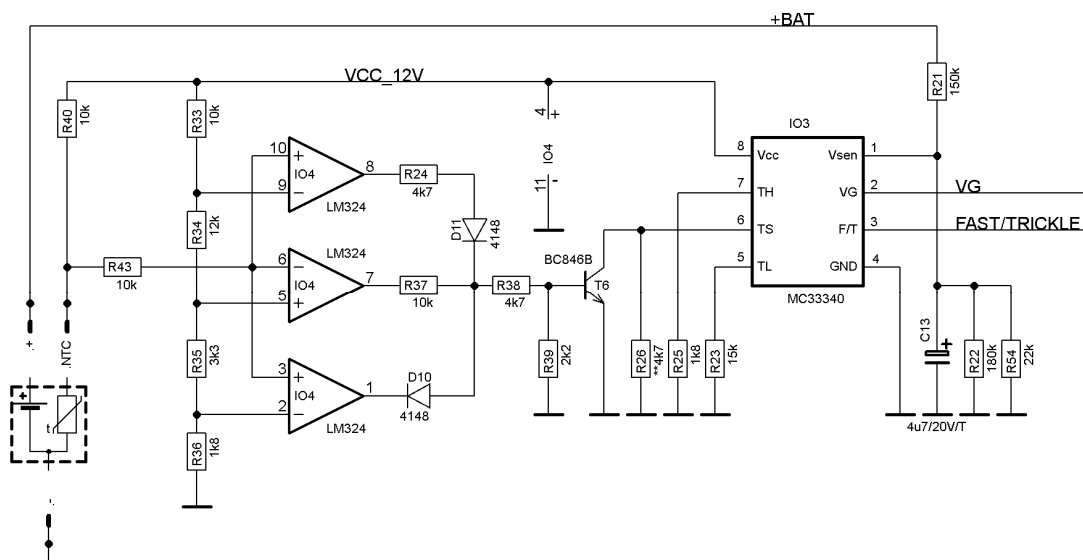
integrovaných obvodů, přestože jich je velký výběr. Řešením je totiž buď konstrukce jednoúčelového zařízení z diskrétních součástek, nebo nejčastěji procesorem řízený nabíječ. Tradiční druhy článků NiCd a NiMH jsou nejčastěji nabíjeny pomocí integrovaných obvodů s metodou detekce $-\Delta V$ a teplotní ochranou.



Obr. 5.3.1 Blokové schéma obvodu MC33340, převzato z [26]

Standardním obvodem pro nabíjení NiCd a NiMH baterií je MC33340, který je na obr. 5.3.1. Jeho princip je založen na převodu napětí na frekvenci. Pomocí čítače s pamětí maxima se vyhodnocuje pokles napětí na baterii. Obvod je schopen využívat termistor instalovaný uvnitř baterie. Pomocí externích rezistorů lze nastavit teplotní oblast nabíjení. Nabíjecí proces je časově omezen a lze jej opět externím rezistorem zkrátit na požadovanou hodnotu. Obvod provádí měření bez nabíjecího proudu, jehož přerušování ovládá výstupem VG (2). Výstup F/T (3) slouží k přepínání mezi rychlým a kapkovým dobíjením [26].

Příklad aplikace obvodu MC33340 je na obr. 5.3.2. Jeho funkční schopnosti jsou základem pro celou řídicí část nabíjení s výstupními signály pro odpojení baterie od výstupu tranzistorem (VG) a nastavení velikosti nabíjecího proudu (F/T). Obvod samostatně detekuje pokles napětí $-\Delta V$. Ovšem pro detekci teploty baterie musel být obvod doplněn o trojici komparátorů, které vymezují teplotní hranice pro termistor a zároveň vyhodnotí i přítomnost termostatu, neboť se mohou obě varianty vnitřního vybavení baterie v praxi vyskytovat. Přes tyto komplikace je řídicí část nabíjení obvodově jednoduchá a je zde zaručena správná detekce konce nabíjení. Toto zapojení je určeno pro baterie sestavené z šesti nebo sedmi článků, ale v případě rozšíření napětíové oblasti o více článků je zapotřebí provést úpravu napětí přiváděného na měřicí vstup.



Obr. 5.3.2 Aplikace obvodu MC33340

Konstrukce z diskretních součástek

Dnes už se setkáme s konstrukcí z diskretních součástek a standardních integrovaných obvodů jen zřídka, ovšem v minulosti byla tato nabíjecí zařízení běžná pro pevně stanovený počet článků Li-Ion a pro olověné baterie, kde se stále vyskytují. Jedná se většinou o jednoduchý lineární nebo spínaný zdroj s konstantním výstupním napětím a omezeným výstupním proudem. Pro olověné baterie je takovýto způsob nabíjení vyhovující, ovšem nabíjení je možné při použití vícefázového režimu podstatně zkrátit. U technologie Li-Ion se konečná fáze nabíjení omezuje na určitou dobu nebo do poklesu proudu pod určitou hodnotu, což napěťový zdroj neumožňuje. Při dlouhodobém dobíjení Li-Ion malým proudem se baterie poškozuje nevratnými změnami chemického složení a tím klesá kapacita.

Nabíjecí zařízení může být vybaveno časovým obvodem, kdy po uplynutí předem nastavené doby je nabíjecí proces ukončen. Tato zařízení jsou označována jako časovaná a jejich používání je spojeno především s technologií NiCd a NiMH, kde je kromě časového i teplotní ukončení. Ukázka tohoto zařízení je v kapitole 3 na obr. 3.3.

Trvalé nabíjení malým proudem

Trvalé dobíjení je časově neomezené nabíjení akumulátoru malým proudem, který negativně neovlivňuje vlastnosti akumulátorového článku. Trvalý nabíjecí proud bývá obvykle $0,05 I_L$ a méně [5]. Tento způsob nabíjení je používán v závěrečné fázi u NiCd a NiMH článků, kde je nazýván kapkové nabíjení (*trickle charging*). Opět v nedávné historii nabíjecích zařízení je možné nalézt systémy založené na tomto „bezpečném“ způsobu

nabíjení. Tento způsob je nevhodný pro Li-Ion, neboť jejich napětí po plném nabití nadále roste, až do hodnoty, kdy uvnitř baterie dochází změnami chemické struktury k trvalému poškození. Technologie NiCd a NiMH jsou k tomuto způsobu nabíjení necitlivé, protože při plném nabití dochází k přeměně dodávané energie v teplo. Při malých proudech je teplota článku jen o málo větší než okolní. U technologie olověných článků je proces přebíjení malým proudem doprovázen zahříváním. Jen v případě, že by napětí přesáhlo 2,3 V na článek, k čemuž by bylo potřeba většího proudu, může docházet k slabému plynování. Dnes se tento způsob používá pro velmi jednoduchá zařízení k udržování akumulátorů trvale připravených, nikoli k účelu dobíjení velké části kapacity.

5.4 Regulační a ovládací části řízené procesorem

Kapitola obsahuje obvodové zapojení částí, které lze použít při konstrukci. Jedná se o používané zapojení pro napěťovou a proudovou regulaci a s tím související kompenzaci zpětné vazby pro její stabilizaci s ohledem na potřebnou dynamiku. Pro potřeby implementace procesoru do nabíjecího zařízení jsou zde uvedeny způsoby měření a reprodukce elektrických veličin pomocí procesoru.

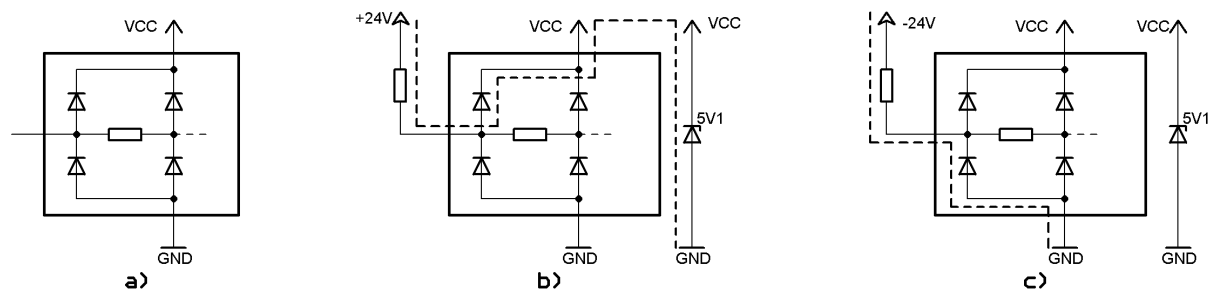
5.4.1 Využití hardwarového vybavení procesoru

Jelikož moderní nabíjecí zařízení vyžadují použití procesoru z důvodu složité specifikace požadavků na funkci zařízení a hlavně univerzálnosti (více druhů i počtu článků), je nutné se zabývat otázkou vhodného spojení procesoru jako ryze digitálního obvodu s ostatní elektronikou, která je převážně analogová. Dále je nutné zvolit pro navrhovanou konstrukci takový procesor, který má potřebné vybavení a je cenově příznivý. Důraz je kladen především na periférie procesoru, kde je základním požadavkem alespoň deseti bitový analogově-digitální převodník s minimálně čtyřmi multiplexovanými vstupy pro získávání analogových veličin v dostatečné kvalitě. Výhodou je digitálně-analogový převodník, ovšem ten značně navyšuje cenu procesoru, a proto se využívá periférie čítače s PWM módem. Generovaný signál je převáděn na analogovou hodnotu filtračním obvodem. Kromě analogových vstupů a výstupů je potřeba ovládat (diskrétně) i další části, které skokově konfigurují zapojení od signalizace přes úpravu dělicích poměrů až po odpojení baterie tranzistorem. Neméně podstatným vybavením se stávají komunikační periférie, neboť jsou baterie stále častěji

vybavovány pamětí nebo vnitřní elektronikou, se kterou je nutné navázat komunikaci a získat nebo poskytovat různé informace. Další sledovanou vlastností procesoru může být spotřeba a pouzdro. Výpočetní výkon a s tím související pracovní kmitočet procesoru není pro aplikaci nabíjecích zařízení kritický, ovšem velikost programové paměti (FLASH) už nesmí být v některých složitějších zadáních opomíjena.

Vstupně výstupní brána procesoru

Standardní vstupně výstupní brána (dále jen VVB) procesoru je vybavena ochranou, viz obr. 5.4.1.1, kde jsou použity Schottky diody pro odvedení elektrostatického výboje, ESD (*electrostatic discharge*), do napájecího uzlu součástky. Stejně tak tyto diody ochraňují v případě dlouhodobého přepětí nebo podpětí na vstupu, je-li v sérii rezistor omezující velikost proudu, jak naznačuje obrázek 5.4.1.1 b) a c). Proud, který je přiváděn do napájecího uzlu V_{CC} musí být dostatečně malý, vždy menší než celková spotřeba tohoto uzlu, aby nedošlo k navýšení napětí a poškození součástek. Pro sekundární ochranu lze doplnit uzel paralelním stabilizátorem, v nejjednodušším případě Zenerovou diodou.



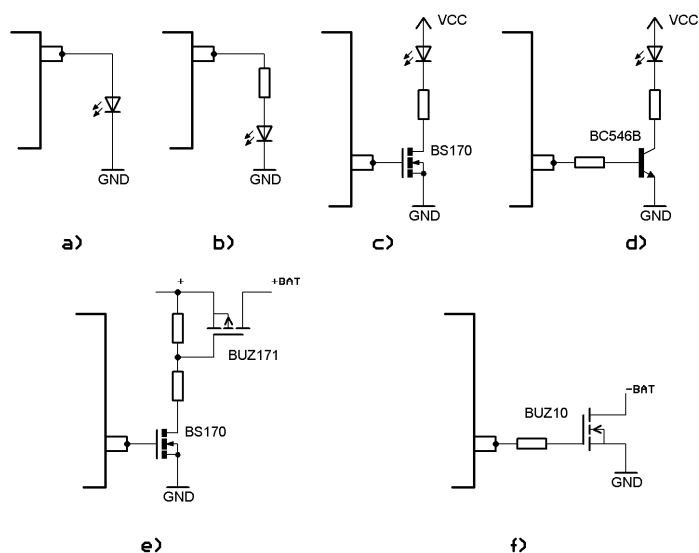
Obr. 5.4.1.1 Vstupní ochrana bran procesoru

Stavy VVB mohou být pro výstupní režim logická „0“ a „1“, pro vstupní režim vysoká impedance „Z“ anebo situace interního rezistoru (*pull-up*), který je připojený na napájení V_{CC} procesoru. Jelikož je VVB tvořena CMOS technologií, je možné bez zatížení brány uvažovat pro logickou úroveň „1“ napětí rovné V_{CC} a pro logickou úroveň „0“ nulové napětí.

Brána procesoru ve výstupním režimu

Výstupní brána je proudově omezena na 10 – 30 mA, čehož lze využít k rozsvícení LED diody bez potřebného rezistoru, jak ukazuje obrázek 5.4.1.2 a) v porovnání s 5.4.1.2 b). Je-li potřeba ovládat větší zátěž nebo je-li zátěž na jiném potenciálu nežli V_{CC} , je nejsnazším řešením použití unipolárního tranzistoru, jak naznačuje obrázek 5.4.1.2 c), nebo bipolárního

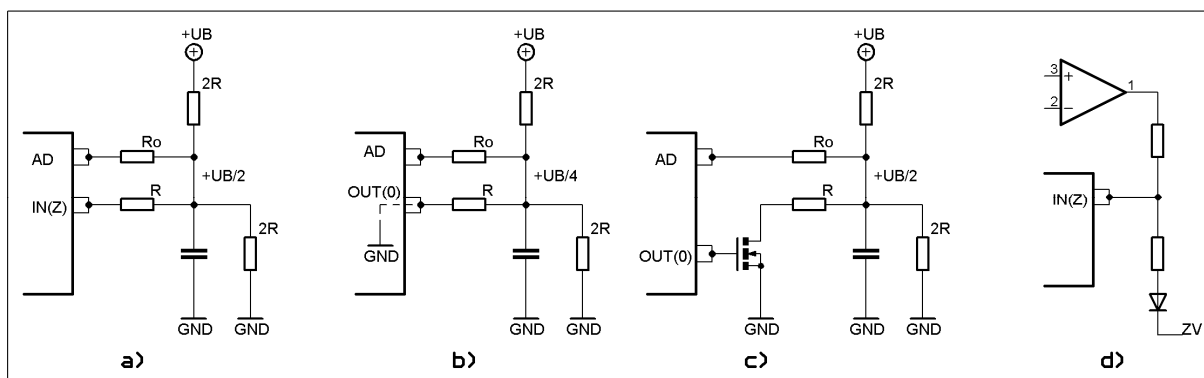
tranzistoru doplněného odporem, jenž omezuje proud báze, viz obr. 5.4.1.2 d). Další použití výstupní brány je na obr. 5.4.1.2 e) a f), kde je ovládání připojovacího tranzistoru P-MOSFET v kladné větvi a ovládání připojovacího tranzistoru N-MOSFET v záporné větvi. Sériový rezistor chrání procesor v případě poškození tranzistoru s následným průrazem napětí do hradla tranzistoru G (*gate*).



Obr. 5.4.1.2 Způsoby využívání výstupní brány procesoru

Brána procesoru ve třístavovém režimu

Jak již bylo řečeno, vstupně výstupní brána má za určité situace téměř ideální vlastnosti. Ty lze využít bez nutnosti doplňujících součástek. Jak je naznačeno na obr. 5.4.1.3 a) a b), pomocí vhodného ovládání bran procesoru lze minimalizovat počet použitých součástek při úpravě napěťového poměru pro analogově-digitální převodník. Nabíjecí zařízení často umožňuje nabíjení různého počtu článků. Rozsah pracovního napětí je široký, z tohoto důvodu je vhodné upravovat dělicí poměr měřeného napětí pro zachování stejné citlivosti převodníku.

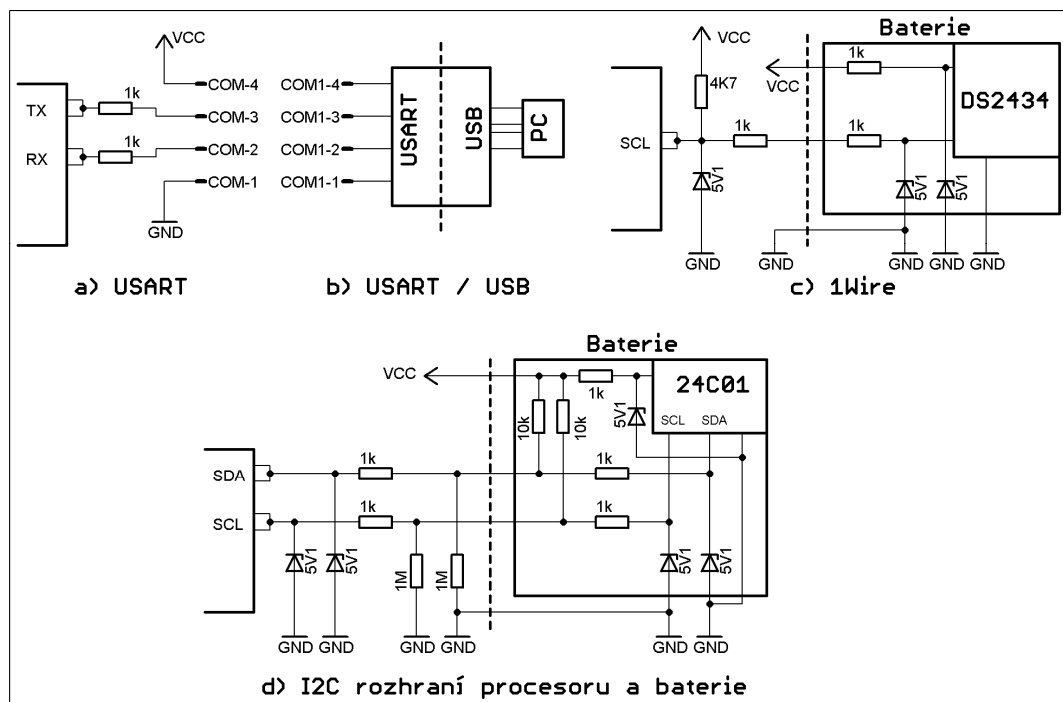


Obr. 5.4.1.3 Způsoby využívání bran v třístavovém režimu

Uvedený příklad má pevně nastavený dělicí poměr 2, když je pomocná brána ve stavu vysoké impedance „Z“. Nastavením brány na výstupní s logickou úrovní „0“ se dělicí poměr upraví na 4. Pomocí dalších bran s polovičními rezistory dostaneme široce modifikovatelný dělič. Na obrázku 5.4.1.3 c) je identické zapojení, ovšem s nadbytečným tranzistorem. Obrázek 5.4.1.3 d) zobrazuje možnost využití brány pro sledování výstupní hodnoty komparátoru, je-li brána nastavena na vstupní s vysokou impedancí, kdy výstup komparátoru může být součástí zpětné vazby. Přejdem do výstupního režimu a navození logické „0“ můžeme vazbu rozpojit a navozením logické „1“ můžeme zpětnou vazbu zcela přesytit. Kombinování více funkcí u jedné brány může být užitečné v případě malého počtu VVB nebo při snižování počtu součástek, ale to není častý případ, protože sdružováním více funkcí brány se komplikuje program.

Komunikační rozhraní

Komunikační rozhraní jsou pro nabíjecí zařízení nezbytnou součástí ať už pro potřeby návrhu a diagnostiky nebo pro komunikaci s vnitřním vybavením baterie. Programovací rozhraní, kterým se nahrává program při výrobě, je přítomno vždy. I když by bylo možné osazovat procesory na desku plošných spojů již naprogramované, je zde možnost změny programu a nahrávání je spojeno s procesem testování zařízení.

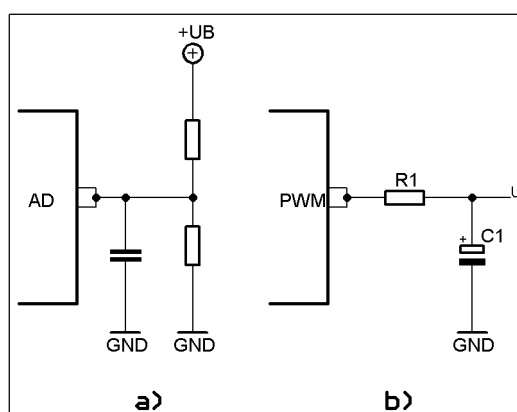


Obr. 5.4.1.4 Komunikační rozhraní procesoru s PC a baterií

Pro potřeby komunikace s nabíjecím zařízením při návrhu a vývoji programu, případně při zjišťování verze konstrukce a programu, se používá běžné sériové rozhraní USART (*Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter*) s možností připojení k PC s bezpečnostním galvanickým oddělením na obr. 5.4.1.4 a) a b). Na obrázku 5.4.1.4 c) a d) jsou ukázky používaných rozhraní s vnitřním vybavením baterie. Jelikož je toto rozhraní připojováno společně s kontakty baterie, je nutné ochránit procesor a vnitřní vybavení sériovými rezistory pro omezení proudů při krátkodobých přepětích nebo podpětích. Standardní rozhraní I2C může sloužit pro komunikaci nejen s vnitřní pamětí, ale i vnitřní elektronikou baterie [27, 28].

Analogový vstup a výstup procesoru

Nabíjecí proces je dnes založen na mnoha analogových hodnotách a také na časovém vývoji analogových hodnot sledovaných veličin, viz metodu $-\Delta V$. Stejně jako je důležité analogové hodnoty získávat co nejcitlivěji, je vhodné i s dostatečnou citlivostí analogově ovládat nabíjecí proces. Nepříznivé faktory při získávání analogové hodnoty jsou rušení a úbytky na vedení (galvanická vazba). Rušení obsahuje především vysoké frekvence, a proto je snadno odstranitelné RC filtrem, jak je naznačeno na obr. 5.4.1.5 a). Úbytky napětí na proudovodičích, které ovlivňují měření, je možné minimalizovat optimalizací návrhu desky plošných spojů, rozšířením vodičů nebo přerušovaným režimem. Ten spočívá v přerušování nabíjecího proudu, počkání na odeznění přechodových dějů, změření sledovaných veličin v bezproudovém stavu a opětovné spuštění nabíjecího proudu.



Obr. 5.4.1.5 Zapojení analogového vstupu a výstupu

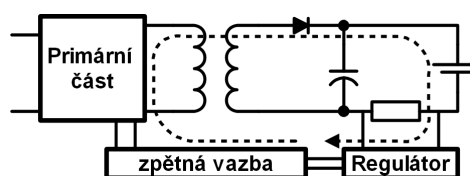
Vytváření analogové hodnoty napětí je možné integrovaným digitálně-analogovým převodníkem nebo častěji čítačem v PWM módu. Při rekonstrukci analogové hodnoty z PWM

signálu je zapotřebí filtrační článek s dostatečně velkou časovou odezvou, viz obr. 5.4.1.5 b). Výsledná hodnota je úměrná součinu střídy PWM signálu a napájecího napětí procesoru. Rezistor filtračního článku se volí v řádu desítek k Ω , aby vlastnosti VVB byly téměř ideální. Výstupní napětí za článkem je možné využívat jako referenční pro regulaci proudu či napětí, přičemž pro dodržení nezkreslené hodnoty nesmí být článek zatěžován.

5.4.2 Řízená regulace proudu

Nabíjecí proces je založen na regulaci proudů různých velikostí tekoucích do baterie. Velikost proudu v porovnání s velikostí kapacity baterie určuje rychlost nabíjení. Regulace proudu nemusí být příliš přesná a proud nemusí být konstantní (může být zvlněný, například frekvencí 100 Hz). Ovšem přesná regulace konstantního proudu převažuje z důvodu jeho udržení v úzkém rozsahu požadovaném specifikací. Nabíjecí zařízení při různých fázích nabíjecího procesu regulovaný proud mění v závislosti na stavu akumulátoru, nabíjecí metodě a druhu nabíjeného článku. Stejně tak při nabíjení Li-Ion článků přechází nabíjecí zařízení z proudové regulace na napěťovou.

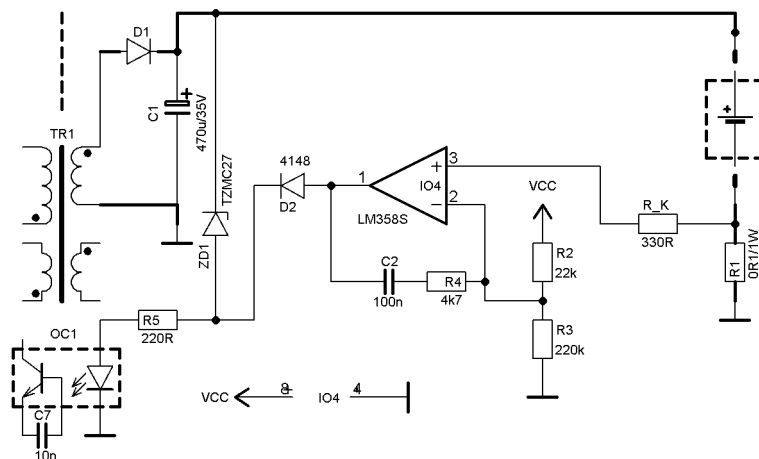
Proudová regulace je umístována na sekundární straně výkonové části nabíjecího zařízení a pro snímání proudu se využívá rezistor s malou hodnotou, na němž průchod proudu vytvoří úbytek napětí, které vstupuje do regulace. Regulační smyčka se uzavírá přes zpětnou vazbu, primární měnič, výkonovou část, snímání proudu a regulátor proudu, jak je naznačeno na obr. 5.4.2.1. Do zpětné vazby přichází proudová regulace společně s napěťovou, která musí být přítomna vždy alespoň ve formě omezení maximálního napětí, proto se vyskytuje ve všech zobrazeních. Časté používání bezproudového měření se realizuje zavedením přímého zásahu do zpětné vazby tak, že dojde k přesycení a poklesu proudu na nulovou hodnotu a po naměření se opět obnoví. V tomto případě dochází k rozpadnutí zpětné vazby a následně k opětovnému sestavení, což je doprovázeno krátkým překmitem a několika zákmity kolem regulované hodnoty. Regulační smyčka by měla mít vlastnosti, které vedou k rychlému a stabilnímu sestavení.



Obr. 5.4.2.1 Regulační proudová smyčka

Regulace konstantního proudu

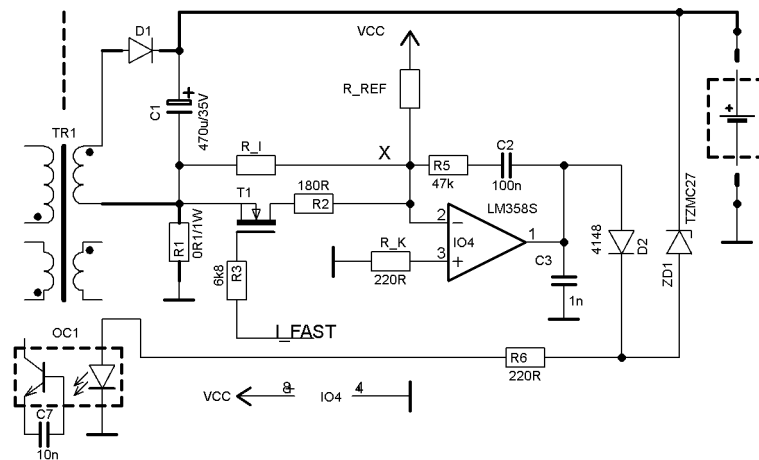
Proudový regulátor zpravidla využívá operační zesilovač zapojený jako komparátor s upravenou frekvenční charakteristikou. Základní zapojení proudového regulátoru je na obr. 5.4.2.2. Jedná se o situaci, kdy je snímací rezistor připojen na záporný pól baterie a vztažný uzel je na záporné větvi sekundární výkonové části. Nabíjecí proud vytvoří kladné napětí na snímacím rezistoru a jeho hodnota je operačním zesilovačem porovnávána s referenčním napětím na děliči. Je-li proud menší než požadovaný, operační zesilovač bude mít na svém výstupu nulové napětí a nebude budit zpětnou vazbu. Nastane-li zvýšení regulovaného proudu nad požadovanou hodnotu, operační zesilovač bude zvyšovat svoje výstupní napětí a začne budit zpětnou vazbu (proudem do optronu). Změna výstupního napětí operačního zesilovače je pomalá, protože je z výstupu na invertující vstup zavedena silná kapacitní vazba. Ta způsobí plynulou změnu výstupního napětí a jeho ustálení na hodnotě, která budí zpětnou vazbu (optron) právě tak, jak je potřeba pro dodávání požadovaného proudu baterie.



Obr. 5.4.2.2 Základní zapojení proudové regulace

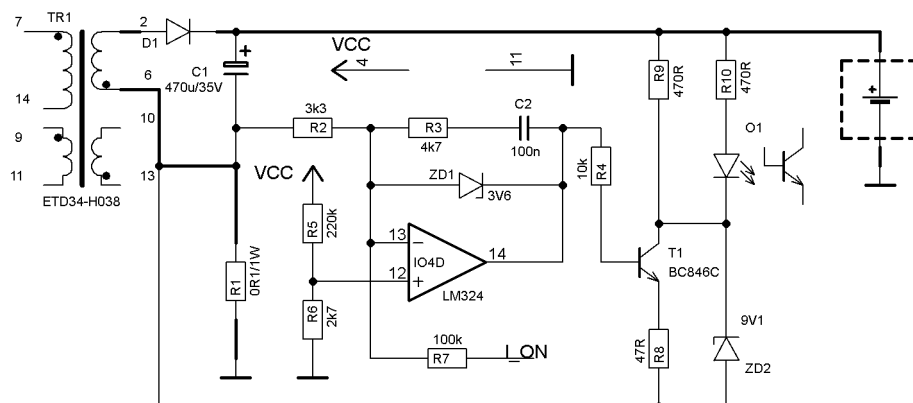
Při ustáleném proudu, když je zpětná vazba sestavena a stabilizována, je na vstupech operačního zesilovače virtuální nula, neboli oba vstupy mají identické napětí. Tento fakt je využit v zapojení na obr. 5.4.2.3, kdy je snímací rezistor zapojen k záporné větvi sekundární výkonové části a společným uzlem je záporný pól baterie. Uvažujeme-li stabilní regulační smyčku a předpoklad virtuální nuly, na invertujícím vstupu operačního zesilovače je nulové napětí. Nabíjecí proud na snímacím rezistoru vytvoří záporné napětí a při ustáleném stavu protéká stejně velký proud rezistorem R_{REF} do uzlu X jako ten, který z něho odtéká rezistorem R_I . Jelikož je referenční proud vtékající do uzlu závislý na hodnotě rezistoru R_{REF} a na referenčním napětí, je možné změnou tohoto napětí měnit také regulovaný proud. Druhý

způsob změny proudu je možný paralelním připojením rezistoru R_2 k R_1 , které způsobí skokové zvýšení proudu, viz obr. 5.4.2.3. Rezistor R_K kompenzuje vstupní nesymetrii (*offset*) operačního zesilovače.



Obr. 5.4.2.3 Zapojení proudového regulátoru se skokovou změnou regulovaného proudu

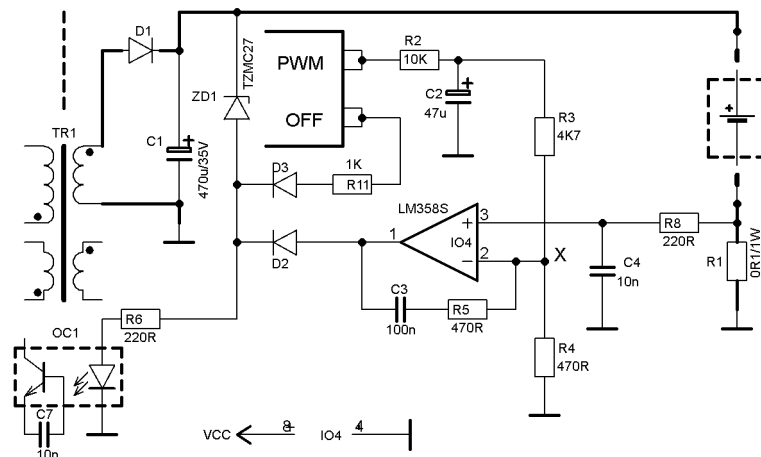
Další varianta proudového regulátoru na obr. 5.4.2.4 má jiný způsob zapojení optonu a je doplněna o napěťový dělič na neinvetrujícím vstupu operačního zesilovače, který upravuje regulovanou hodnotu a vylučuje regulaci malého proudu při velké vstupní nesymetrii operačního zesilovače. Zenerova dioda ve zpětné vazbě operačního zesilovače omezuje jeho saturační napětí, a tak přispívá k rychlejšímu sestavení a stabilizaci zpětné vazby.



Obr. 5.4.2.4 Zapojení proudového regulátoru s omezením saturace a vstupní nesymetrie

Poslední ukázka regulátoru konstantního proudu na obrázku 5.4.2.5 je jeho kombinace s napěťovou stabilizací s obvodem TL431. Referenční obvod má frekvenční kompenzaci zápornou kapacitní vazbou. Příspěvek proudu do proudového regulátoru je zaveden přes oddělovací diodu na řídicí elektrodu obvodu TL431. Tato konstrukce reguluje velmi přesné napětí s omezeným proudem.

Budeme-li vycházet ze situace, kdy je regulační smyčka sestavena a stabilizována, pro uzel X platí princip virtuální nuly a napětí v tomto uzlu je rovno nule. Rezistor R2 je možné chápat jako zapojený na vztažný uzel (zem, GND). Pak sériovou kombinací rezistorů R2 a R3, která je připojena na výstupu procesoru generujícího signál PWM, je možné chápat jako dělič napětí 1:1 a s připojeným filtračním kondenzátorem C2 je střední hodnota napětí U_{REF} na C2 rovna součinu napájecího napětí (5 V) a střídě generovaného PWM signálu. Pro střihu PWM signálu 1:1 bude ustálené napětí U_{REF} = 1,25 V. Převod je lineární a přesnost jednotlivých referenčních napětí je dána rozsahem čítače generujícího PWM signál. Osmibitový čítač může generovat 256 hodnot napětí od 0 V do 2,5 V, přičemž přesnost U_{REF} je dána přesností napájecího napětí a přesností obou rezistorů R2 a R3. Při návrhu váhových rezistorů R1 a R2 vycházíme z úvahy shodných proudů těmito rezistory. V tomto případě platí, že při maximálním referenčním napětí U_{REF} = 2,5 V teče rezistorem R2 proud 250 μA do uzlu X a stejný proud rezistorem R1 teče, právě když je napětí na snímacím rezistoru R7 0,25 V a prochází jím 2,5 A. Při tomto proudovém rozsahu a osmibitovém čítači je nejmenší proudový krok přibližně 10 mA, což je pro potřeby nabíjecího zařízení dostačující. Ve schématu je zakreslen přímý zásah do zpětné vazby pro úplné zastavení primárního měniče. Toto zapojení bylo vyvinuto za účelem získání univerzálního způsobu plynulé regulace proudu. Může být aplikována v sekundární části nezávisle na druhu vstupního napájení, přenášeném výkonu, výstupním napětíovém rozsahu a umístění ochranného tranzistoru.



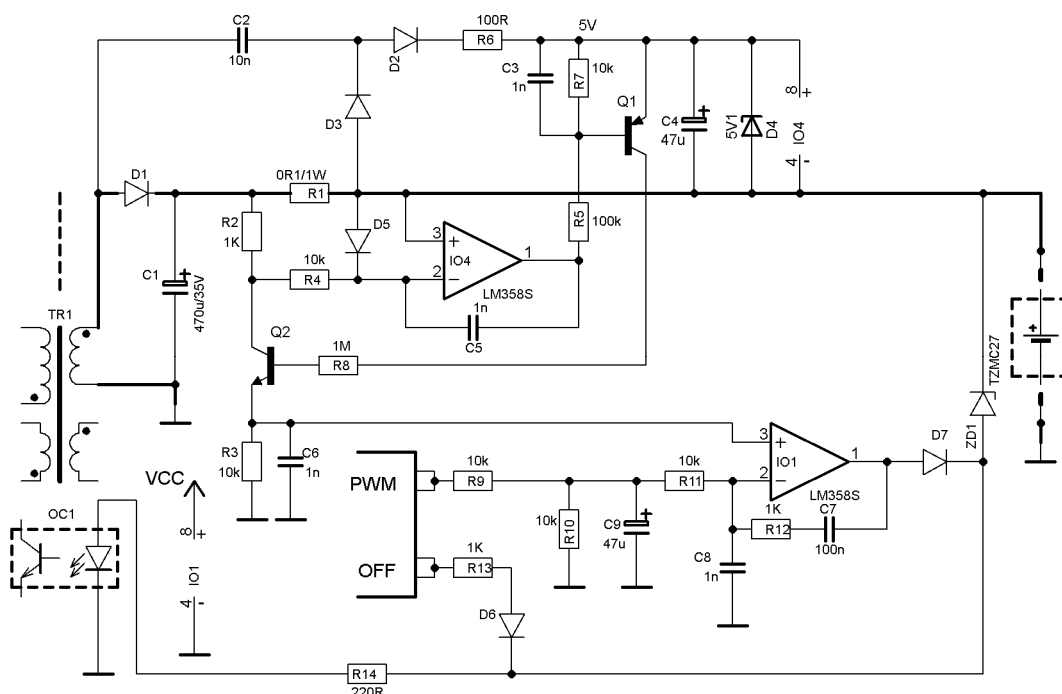
Obr. 5.4.2.7 Regulace proměnného proudu před snímacím rezistorem

Uvedený případ se týká časté varianty, kdy je procesor a ostatní elektronika sekundární části umístěna na společném potenciálu se záporným pólem baterie, tedy za snímacím rezistorem. Varianta, kdy je elektronika sekundární části umístěna před snímacím rezistorem je méně častá, protože dobíjecí proud znesnadňuje měření napětí baterie, jakož i

vyhodnocování teploty a komunikaci s vnitřním vybavením baterie vlivem napěťového úbytku na snímacím rezistoru.

Na obrázku 5.4.2.7 je znázorněno řešení regulátoru s elektronikou umístěnou před snímacím rezistorem. Generování referenčního napětí pro regulátor je obdobné jako v předchozím případě, ovšem na uzlu X je při sestavení a stabilizaci regulační smyčky shodné napětí jako na snímacím rezistoru, a tak musí být referenční napětí zmenšeno mnohem více rezistory R3 a R4. Neinvertující vstup operačního zesilovače je často doplňován RC filtrem, poněvadž je na snímacím rezistoru rušení ovlivňující správnou funkci operačního zesilovače.

Existuje situace, kdy je použití snímacího rezistoru v záporné větvi zcela nežádoucí, což je případ zapojení SEPIC, kdy je nabíjecí zařízení napájeno nízkým stejnosměrným napětím a nabíjená baterie musí být připojena záporným pólem na nulovém potenciálu zdroje. Umístění snímacího rezistoru do kladné větve je problematické, a pokud je regulátor ovládán procesorem, který z principu musí být umístěn na nulovém potenciálu, je situace ještě problematičtější. Složitost požadované funkce je proveditelná nárůstem počtu součástek. Na obrázku 5.4.2.8 je schéma zapojení regulátoru proměnného proudu se snímacím rezistorem v kladné větvi.



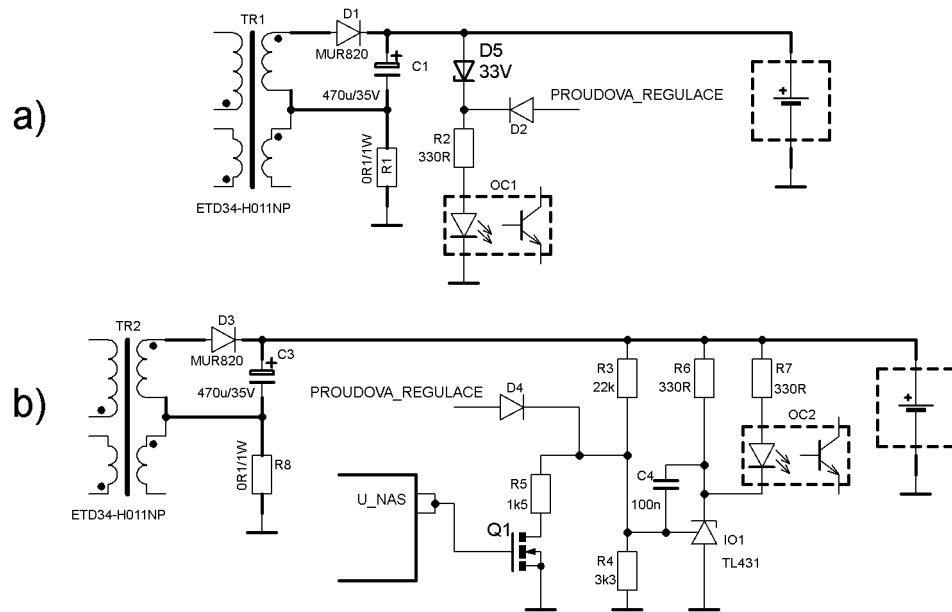
Obr. 5.4.2.8 Regulátoru proměnného proudu se snímacím rezistorem v kladné větvi

Princip spočívá v rekonstrukci aktuální velikosti proudu tekoucího snímacím rezistorem ve formě napětí, ovšem vztaženému k nulovému potenciálu. Rekonstruovaná velikost proudu je pak využita stejně jako v předchozích regulátorech proudu. Pro potřeby snímání proudu v kladné větvi je nutné vytvořit pomocné napětí (5 V) na potenciálu kladné větve, například velmi jednoduchou konstrukcí usměrňovače s kapacitní vazbou (C2) a paralelním stabilizátorem se Zenerovou diodou. Operační zesilovač (IO4) porovnává úbytek napětí na snímacím rezistoru R1 s úbytkem napětí na rezistoru R2 a pomocí vazby přes tranzistory Q1 a Q2 udržuje obě napětí na R1 a R2 shodná. Jelikož jsou rezistory R2 a R3 v sérii, při zanedbání bázevého proudu tranzistoru Q2, protéká jimi totožný proud. Na rezistoru R3, který je 10x větší než R2, je 10x větší napětí než na snímacím rezistoru. Jak je vidět, regulační smyčka rekonstruktoru je frekvenčně korigována jen pro vyšší kmitočty, především proti rušení a je tedy velmi rychlá a neovlivňuje následné zpracování. Hodnoty rezistorů převádějí proud na napětí se stejnou velikostí ($2,5 \text{ A} \cong 2,5 \text{ V}$). Regulátor proudu je obdobný jako v předchozích případech. Prezentované zapojení vyžaduje výstupní napětí větší než 3 V, což je u používaných baterií vždy splněno. Regulace je lineární a nezávislá na velikosti výstupního napětí.

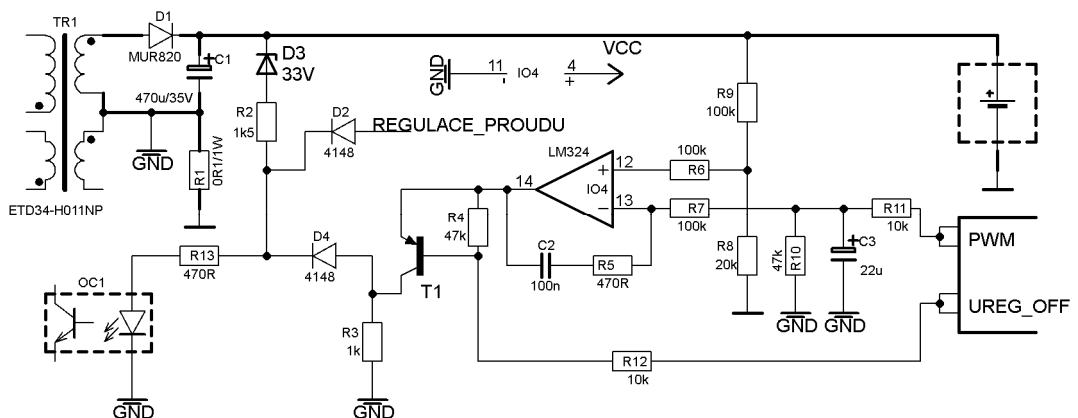
5.4.3 Řízená regulace napětí

Napětěová regulace je v nabíjecím zařízení vždy přítomna ve funkci omezení velikosti výstupního napětí. Základní zapojení omezení se Zenerovou diodou je na obr. 5.4.3.1 a). Omezení slouží k vymezení pracovního rozsahu, jenž je nastavován o 2 V až 3 V vyšší než maximální napětí na baterii během dobíjení, a není nikdy blokováno. Účastní se regulace, pokud dojde k náhlému vyjmutí baterie během nabíjení nebo v některých nabíjecích zařízeních trvale bez připojené baterie anebo při rozepnutém připojovacím tranzistoru. Další napětěové regulace, uvedené níže, jsou používány jen zřídka, jelikož lze napětěovou regulaci dosáhnout regulací proudovou s využitím vhodného algoritmu, viz kapitolu 6.3.3.

Napětěová regulace konstantního napětí může být použita pro nabíjení článků Li-Ion a Pb, kdy je nastaveno konečné nabíjecí napětí podle druhu a počtu článků. Pro takovéto jednoduché nabíjecí zařízení lze využít zapojení regulátoru s obvodem TL431 na obr. 5.4.3.1 b), jenž může mít více regulovaných napětěových úrovní. Tyto úrovně lze měnit napětěovým děličem pomocí unipolárního tranzistoru Q1.



Obr. 5.4.3.1 Zapojení regulátoru konstantního napětí



Obr. 5.4.3.2 Zapojení regulátoru proměnného napětí

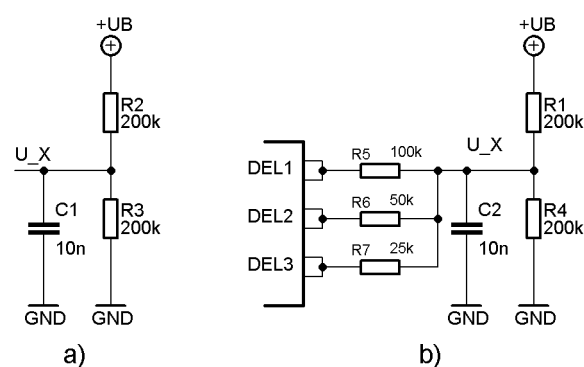
Stejně jako u regulace proudu, tak i u regulace napětí, se přistupuje k regulaci proměnného napětí ovládaného procesorem. Jak naznačuje obrázek 5.4.3.2, vychází se ze zapojení operačního zesilovače, který porovnává zmenšené bateriové napětí odporovým děličem s referenčním napětím, které je generováno filtrovaným PWM signálem. Obecně lze říci, že regulace napětí je snáze regulovatelnější nežli proudová, protože má mnohem menší dynamiku. Zapojení napětěvého regulátoru je spojeno s ostatními regulátory nabíjecího zařízení. Pro případ vyřazení napětěvé regulace je do série s výstupem operačního zesilovače vřazen tranzistor T1, jenž je ovládán výstupní bránou procesoru.

5.4.4 Měření elektrických veličin

Nabíjecí proces a především detekce ukončení nabíjení je založena na vyhodnocení specifického chování bateriové sestavy. Sledované projevy se často týkají napětí baterie, ale informace lze získávat i z proudu a teploty baterie. Požadovanou veličinu zkoumáme podle její velikosti, jestli je větší či menší nebo podle časového vývoje, zda roste či klesá, atd. Při rozhodování může vývoj nabíjecího procesu ovlivňovat i více veličin, například teplota a proud atd. Měření veličiny se provádí obvodovým zapojením, nejčastěji s operačním zesilovačem nebo je použit analogově-digitální převodník a veličina je zpracovávána procesorem.

Měření napětí

Měření či porovnávání napětí je používáno pro všechny sledované veličiny, protože nejsou-li napětíové (proud nebo teplota), vhodným způsobem se na napětí převedou. Nejdůležitější sledovanou veličinou je napětí baterie, které je větší než úroveň vhodná ke zpracování. Základní úprava bateriového napětí je odporovým děličem, jenž je vždy na výstupu filtrován kondenzátorem potlačujícím rušení, jak zobrazuje obrázek 5.4.4.1 a). Velikosti rezistorů děliče bateriového napětí by měly být co největší, poněvadž je to jediná obvodová část, která je trvale zapojena na baterii po skončení nabíjení, má-li nabíjecí zařízení připojující tranzistor. Velikost proudu tekoucího z baterie do nabíjecího zařízení by neměla být po ukončení nabíjecího procesu větší než $100 \mu\text{A}$.

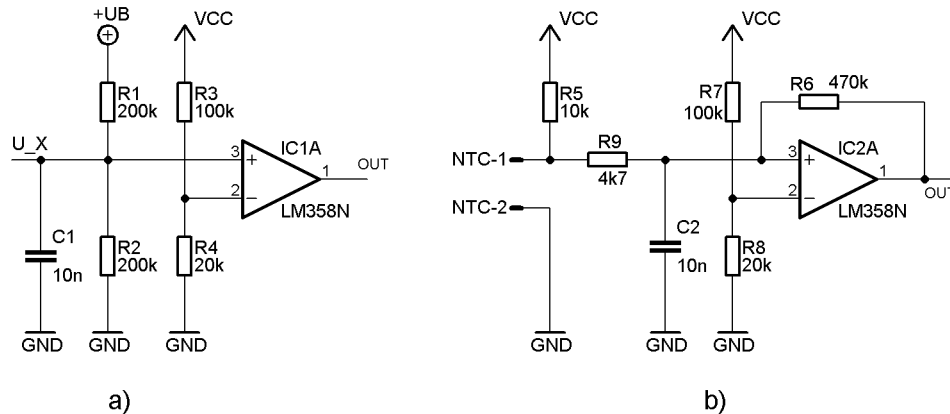


Obr. 5.4.4.1 Odporové děliče pro úpravu bateriového napětí

Bateriové napětí se může pohybovat v širokém rozsahu, protože je nabíjecí zařízení často určeno pro různé bateriové sestavy s různým počtem článků. V takovém případě je možné odporový dělič modifikovat podle velikosti napětí nebo počtu článků, jak je na obr. 5.4.4.1 b).

Prezentovaný odporový dělič je možné upravovat přímo výstupními bránami procesoru, přičemž hodnoty rezistorů jsou voleny tak, aby byl poměr v celých sudých násobcích od 2 do 16, viz [32]. Toto zapojení bylo vyvinuto z důvodu determinističtější modifikace poměru napětí, jež podstatně usnadňuje implementaci do programu a umožňuje využívání analogově-digitálního převodníku v příznivém rozsahu. Podstatný přínos tohoto jednoduchého obvodového uspořádání je především u nabíjecích algoritmů, jež mohou být nezávislé na počtu článků. K nezávislosti algoritmu postačí jeho doplnění o část, která počet článků zohledňuje a automaticky upravuje dělicí poměr, viz kapitolu 6.5.

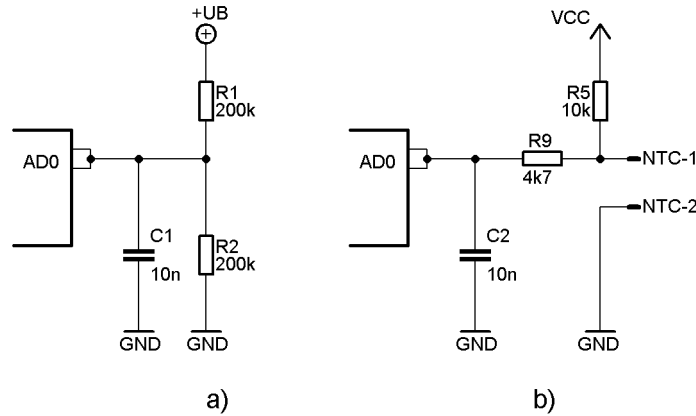
Vlastní detekce nebo měření napětí je prováděno operačním zesilovačem nebo analogově-digitálním převodníkem, jak je na obr. 5.4.4.2. Detekci určitého napětí umožňuje komparátor na obr. 5.4.4.2 a), který je nastaven na přesažení konkrétní hodnoty. Reakce je rychlá a přesná, výstup může sloužit jako informace pro procesor nebo může být využit k modifikaci vlastností nabíjecího zařízení, například ke skokovému snížení proudu, dojde-li k překročení určité teploty. Časté využití je pro detekci dosažení (přesažení) konečného napětí během nabíjení Li-Ion článku. Při detekci určité teploty je zavedena slabá kladná vazba z výstupu na neinvertující vstup operačního zesilovače, na obr. 5.4.4.2 b), která vytvoří hysterezi a zabránění kmitání výstupu komparátoru vlivem rušení nebo zvlnění.



Obr. 5.4.4.2 Zapojení komparátoru pro detekci napěťové úrovně

Analogově-digitální převodník je již standardním vybavením procesoru a jeho aplikace spočívá ve zvolení referenčního napětí a přivedení měřené napěťové úrovně na příslušnou bránu procesoru. Měřicích kanálů bývá k dispozici více. Kanály jsou vnitřně přepínány (multiplexovány) a jeden po druhém mohou být připojeny na vstup pouze jednoho převodníku. Pro kvalitní měření je nutné zajistit stabilní referenční napětí bez rušení a vstupní kanály doplnit o malé kondenzátory potlačující rušení, jak je zobrazeno na obr. 5.4.4.3 a). Je-li na vstup analogově-digitálního převodníku zaveden externí signál (vývod nabíjecího

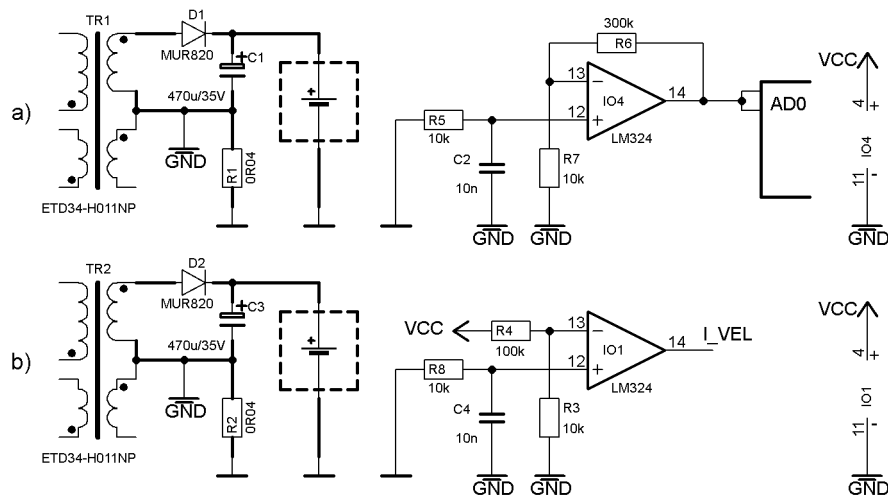
zařízení), například kontakt termistoru nebo kódového rezistoru z bateriové sestavy, musí být vstup chráněn sériovým rezistorem proti poškození, obr. 5.4.4.3 b). Sériový rezistor neovlivňuje měřenou hodnotu, protože vstup procesoru v AD režimu představuje velmi vysokou impedanci.



Obr. 5.4.4.3 Připojení napěťového signálu na AD převodník

Snímání proudu

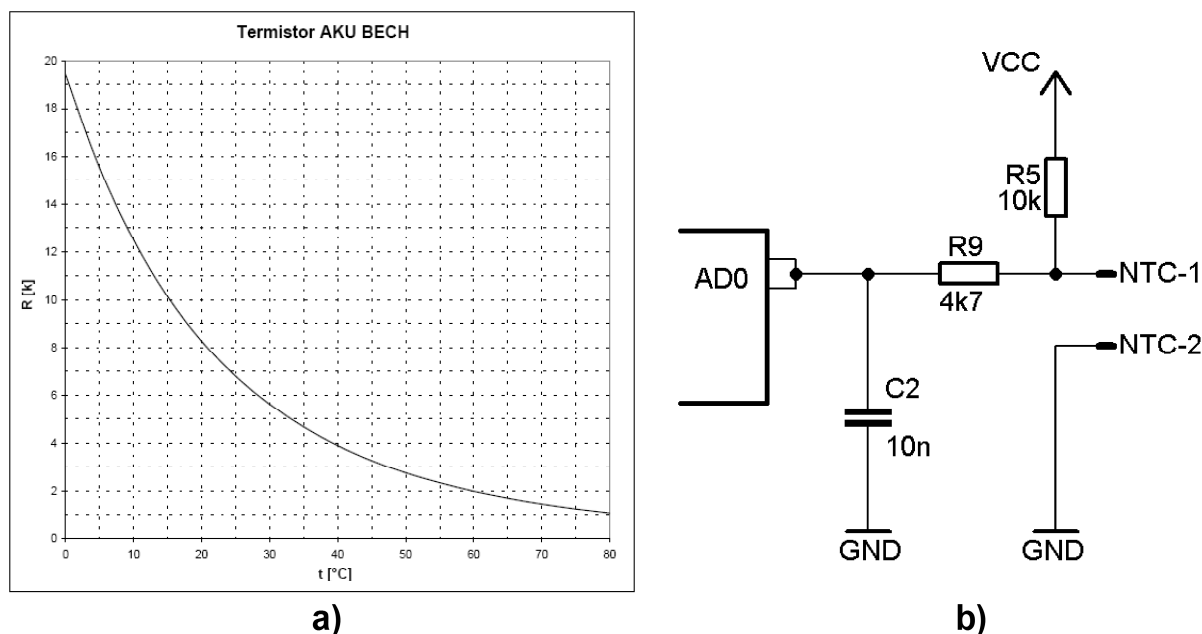
Měření nabíjecího proudu je využíváno pro kontrolu skutečné hodnoty, pokud je instalována regulace proudu anebo pro detekci určité úrovně proudu. Podobně jako při konstrukci proudového regulátoru se využívá malý snímací rezistor a úbytek na něm je zesílen na velikost vhodnou pro převod nebo další zpracování. Na snímacím rezistoru je velké rušení a zvlnění, které je filtrováno, jak zobrazuje obrázek 5.4.4.4 a). Na obr. b) je (znázorněna) úprava zesilovače na komparátor, jež detekuje překročení jedné úrovně proudu, což bývá využíváno při závěrečné fázi nabíjení článků Li-Ion, kdy je nabíjení ukončeno, pokud nabíjecí proud klesne pod 400 mA (záleží na kapacitě článku).



Obr. 5.4.4.4 Převodník proudu na napětí a proudový komparátor

Snímání teploty

Během nabíjecího procesu je nezbytné sledovat teplotu článků baterie a reagovat na příliš nízkou anebo vysokou teplotu snížením nabíjecího proudu nebo ukončením nabíjení. Teplota se nevyvíjí příliš rychle, a protože používané teplotní senzory termistor nebo termostat mají zpoždění jen několik desítek vteřin, není nutné měřit teplotu často. Termistor (NTC) snižuje vlastní odpor se zvyšováním teploty, závislost je nelineární, viz obr. 5.4.4.5 a).



Obr. 5.4.4.5 Závislost termistoru na teplotě a snímání teploty

Nelinearita není pro funkci nabíjecího zařízení překážkou, neboť pro potřeby nabíjecího procesu je využito jen několik teplot, které jsou detekovány (typicky 60 °C, 45 °C, 5 °C a 0 °C). Termistor je pasivní součástka. Pro nejjednodušší snímání velikosti odporu se využívá rezistor připojený na napájecí napětí (5 V) a zapojený sériově s termistorem. Je-li napětí měřeno přímo analogově-digitálním převodníkem, doplňuje se ochranný rezistor a filtrační kondenzátor, jak je zobrazeno na obr. 5.4.4.5 b). Detekce rozpojení termostatu je prováděna stejným způsobem. Rozlišení instalovaného termistoru nebo termostatu je možné, protože v případě termostatu je měřené napětí 0 V nebo 5 V, ovšem termistor těchto hraničních hodnot nedosahuje. Měření kódového rezistoru se provádí stejným způsobem.

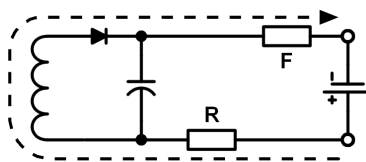
5.5 Ochranné prvky

Nabíjecí zařízení lze poškodit nesprávným vstupním napětím, kdy je na vině uživatel nebo přepětím z rozvodné sítě. Nebezpečí poškození hrozí především na výstupní straně, kde

může být způsobeno rovněž uživatelem, ale ne vždy záměrným nebo nesprávným zacházením. Výstupní část nabíjecího zařízení totiž umožňuje vložení bateriové sestavy opačně nebo s jiným vnitřním uspořádáním. Nebezpečí poškození hrozí i částem nabíjecího zařízení, jež slouží k získávání informací o bateriové sestavě během vkládání, pokud není mechanicky zajištěn správný sled připojovaných kontaktů. V tomto případě by měly být jako první připojeny oba póly baterie a následně ostatní kontakty.

Ochrana před přepólováním baterie

Nejzávažnější poškození hrozí při obráceném vložení baterie, což mohou některé připojovací konektory dovolovat. Nastane-li takový stav, je výstup nabíjecího zařízení vystaven zápornému napětí, pro něž v případě konstrukce spínaného zdroje existuje vodivá cesta přes výstupní vinutí a usměrňovací diodu, jak je zobrazeno na obr. 5.5.1. Připojení opačného napětí vede k nárůstu proudu a poškození výstupní diody, snímacího rezistoru, plošného spoje a elektrolytických kondenzátorů. Baterie, která nemá vlastní vnitřní ochranu, může být přepólováním vážně poškozena. Takovým důsledkům předchází ochranné zapojení, které nárůst proudu při otočení baterie rychle ukončí nebo nárůst vůbec nedovolí. Navíc musí být uživatel o opačně vložené baterii vyrozuměn signalizací nabíjecího zařízení, aby mohl nevhodné vložení odstranit.



Obr. 5.5.1 Cesta proudu při opačném vložení baterie

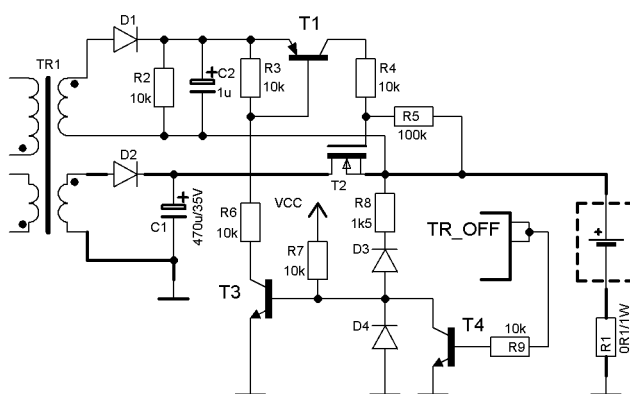
Jednoduchou, ale destruktivní ochranou je vřazení tavné pojistky do kladné větve, jak ukazuje obrázek 5.5.1, nebo záměrné zúžení proudové cesty na plošném spoji, tak aby se při nadměrném proudu místo zahřálo a přetavilo podobně jako pojistka. Tento způsob ochrany je příliš pomalý a nevratný, čímž se celé zařízení stane nefunkčním a vyžaduje zásah servisu nebo pořízení nového zařízení.

Jelikož se přepólování baterie v běžném používání předpokládá, přistupuje se k ochraně, která není destruktivní a eliminuje možné poškození. K elektronické ochraně se používá výhradně výkonový unipolární tranzistor, jenž je ovládán podpěťovou ochranou výstupu nebo procesorem. Umístění, stejně jako typ MOSFET tranzistoru, může být různé, nesmí však omezovat správnou funkci a především měření nabíjecího zařízení. Stejně tak není vhodné, aby na něm vznikl velký úbytek a tepelné ztráty průchodem nabíjecího proudu. Ochrana

reaguje na nízké nebo záporné výstupní napětí, což neovlivňuje nabíjecí proces, který je podmíněn (odstartován) malým kladným výstupním napětím, typicky od 3 V do 5 V.

Samostatně pracující ochranné zapojení musí být velmi rychlé, protože i nárůst proudu při přepólování je rychlý. Reakční schopnost je negativně ovlivňovaná setrvačností výstupního napětí, která je způsobena pomalým vybíjením výstupního kondenzátoru. Nežli výstupní napětí po vyjmutí baterie klesne na nízkou hodnotu, jež způsobí rozepnutí tranzistoru, je uživatel schopen baterii vložit opačně a tranzistor již rozpíná při tekoucím proudu obvodem.

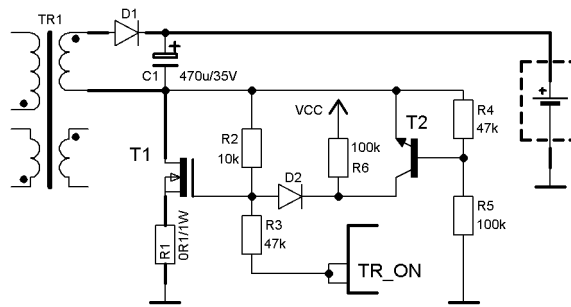
Na obrázku 5.5.2 je autonomní zapojení s N-MOSFET tranzistorem v kladné větvi, kde pro jeho ovládání je zapotřebí pomocný napěťový zdroj. Jak je patrné z obrázku, umístění N-MOSFET tranzistoru do kladné větve je problematické a vyžaduje velké množství součástek. Výhodou tohoto uspořádání je však pracovní rozsah výstupního napětí, který je od 0 V, jelikož budící napětí připojovacího tranzistoru je generované pomocným zdrojem. Odpojení baterie je ovládáno i z procesoru, který jej otevře jen po dobu nabíjení. Klesne-li výstupní napětí do záporných hodnot, odtéká přes diodu D3 a omezující rezistor R8 bázevý proud tranzistoru T3, a tím dojde k rozepnutí připojovacího tranzistoru T2. Dioda D4 ochraňuje tranzistory T3 a T4 před velkým záporným napětím.



Obr. 5.5.2 Ochrana proti přepólování baterie s N-MOSFET tranzistorem v kladné větvi

Zapojení N-MOSFET tranzistoru v záporné větvi před snímacím rezistorem je zobrazeno na obr. 5.5.3. Umístění připojovacího tranzistoru není příliš výhodné pro celkové odpojení sekundární části, poněvadž odpojuje pouze výstupní vinutí. Sepnutí tranzistoru je ovládané procesorem nebo specializovaným nabíjecím obvodem. K automatickému rozpojení dojde, pokud napětí na sériovém zapojení tranzistoru a snímacím rezistoru přesáhne -2 V. Záporné napětí otevře tranzistor T2, který rychle odčerpá náboj z hradla tranzistoru T1. Při sepnutém

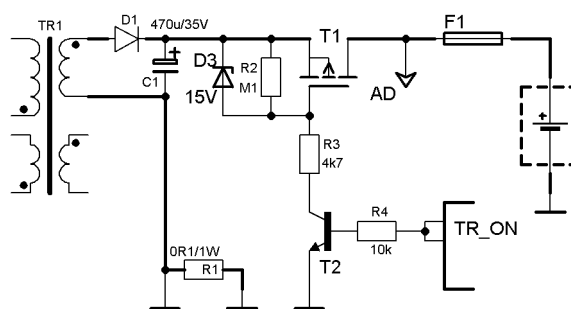
tranzistoru je napětí pro rozepnutí způsobeno velkým proudem na sériových prvcích T1 a snímacím rezistorem.



Obr. 5.5.3. Ochrana proti přepólování baterie s N-MOSFET tranzistorem v záporné větvi před snímacím rezistorem

Připojovací tranzistor není určen jen pro ochranu před přepólováním, ale jeho funkce je také odpojení baterie a zabránění nabíjení (nejde-li primární měnič úplně zastavit, viz kapitolu 5.2) nebo k omezení proudu tekoucího z baterie do sekundární části po skončení dobíjení nebo při nenapájeném nabíjecím zařízení. Jediné, co odebírá proud z baterie po rozepnutí připojovacího tranzistoru, je napěťový dělič, který slouží k měření napětí baterie a podle jeho správné velikosti se rozhoduje, zda může být tranzistor sepnut a začít nabíjení.

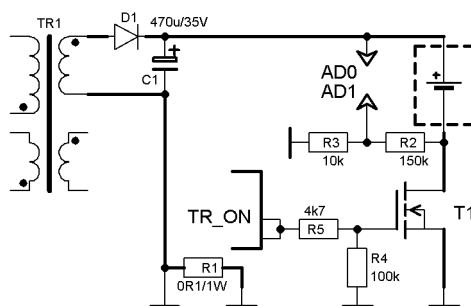
Na obrázku 5.5.4 je zapojení P-MOSFET tranzistoru v kladné větvi. Připojovací tranzistor je ovládán pouze procesorem s pomocí tranzistoru T2. Toto uspořádání omezuje rozsah výstupního napětí. Minimální velikost výstupního napětí je určena napětím tranzistoru U_{GS} , při kterém je dostatečně otevřen (5 V a více). Tranzistor P-MOSFET o stejné ploše čipu má větší odpor kanálu (R_{DS}) než N-MOSFET, a proto je P-MOSFET se stejnými parametry dražší než N-MOSFET, jehož aplikace v kladné větvi je ovšem problematická.



Obr. 5.5.4 Připojovací tranzistor P-MOSFET v kladné větvi

Na obrázku 5.5.5 je zobrazeno zapojení připojovacího tranzistoru N-MOSFET před snímacím rezistorem v záporné větvi. Tranzistor je ovládán přímo výstupní bránou procesoru přes rezistor R5, který ochraňuje procesor při poškození tranzistoru a proražení napětí baterie

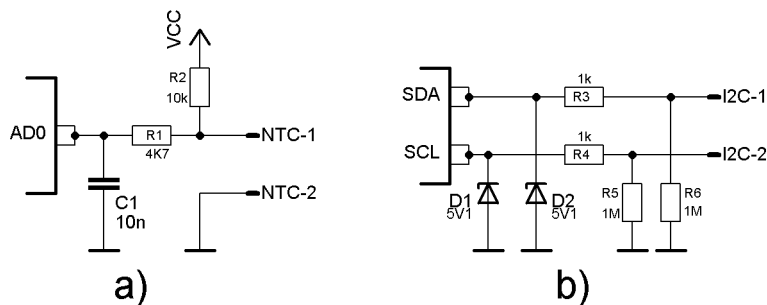
do hradla tranzistoru. Umístění tranzistoru odpojí baterii, jež zůstává kladným pólem spojena s kladnou větví. Aby bylo možné i při rozepnutém tranzistoru měřit napětí baterie, je zde pomocný odporový dělič R2, R3. I přesto je tato varianta řešena malým počtem součástek. Toto zapojení bylo vyvinuto za účelem jednoduchého ovládání výstupní ochrany s nezávislostí na výstupním napětí. Přínos tohoto uspořádání je ve větších možnostech při externím testování nabíjecího zařízení, viz kapitolu 6.6.



Obr. 5.5.5 Připojovací tranzistor N-MOSFET v záporné větvi za snímacím rezistorem

Ochrany rozhraní

Kontakty spojující nabíjecí zařízení s vnitřním vybavením baterie jsou bez ní přístupné okolnímu prostředí, kdy je možné riziko elektrostatického výboje EDS, stejně jako mohou být vystaveny napětí při vkládání baterie, díky nevhodnému pořadí připojování kontaktů. Z těchto důvodů je důležité zamezit poškození nabíjecího zařízení i vnitřního vybavení bateriové sestavy a zároveň umožnit spolupráci obou celků. Na obrázku 5.5.6 je naznačeno, jakým způsobem je eliminováno poškození. Obrázek a) zobrazuje typické zapojení kontaktů termistoru k analogově-digitálnímu převodníku. Vnější vysokým nebo záporným napětím mimo rozsah vstupní brány chrání omezující rezistor. Na obrázku 5.5.6 b) je zapojení komunikačního rozhraní I2C. Nezbytné omezující rezistory, které vzhledem k funkci sběrnice nemohou být příliš velké, jsou doplněny o Zenerovy diody, které eliminují proudy při nebezpečném napětí na obou signálových vodičích sběrnice.

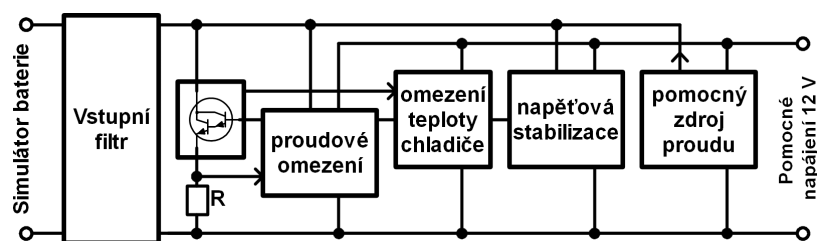


Obr. 5.5.6 Ochranné zapojení rozhraní s baterií

5.6 Diagnostické a testovací vybavení

Vývoj nabíjecího zařízení je spojen s ověřováním dosažených parametrů a neobejde se bez úprav výchozího schématu. Ověřování funkce výkonové části je zdoluhavý proces, protože je nutné testovat chod v celém rozsahu vstupního napětí a v pracovním rozsahu výstupního napětí a proudu. Při testech se sleduje přesnost regulace a její stabilita, akustické projevy, zahřívání a orientačně elektromagnetická kompatibilita. Testování je možné provádět na baterii, ale v prvních fázích ověřování je výhodnější volit jako zátěž reostat.

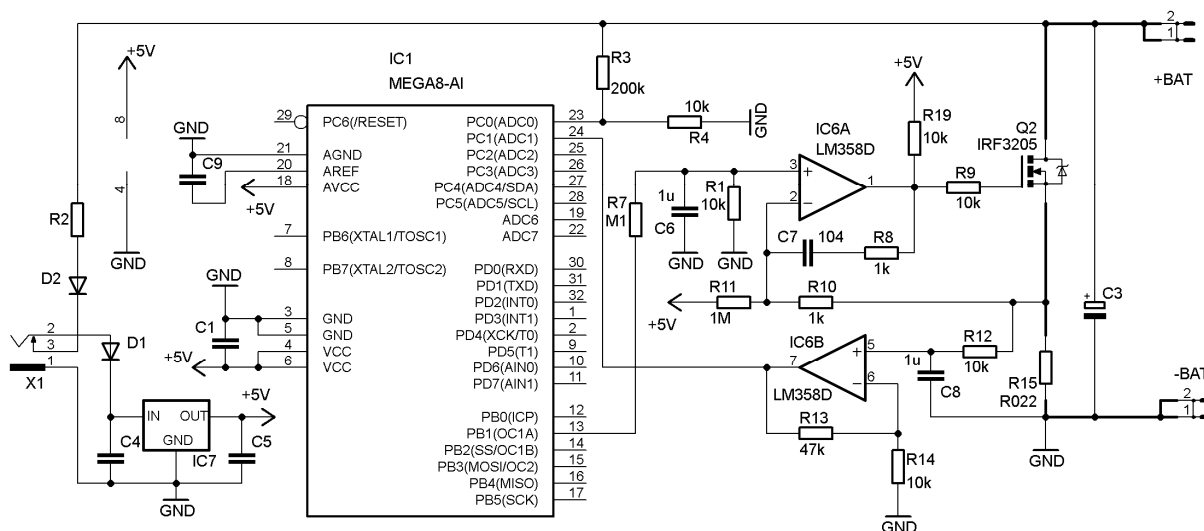
Velmi prospěšné je při testování využívání náhradu baterie (simulátor), což je elektronické zařízení s nabíjecími parametry baterie. Simulátor přeměňuje nabíjecí energii v teplo a na rozdíl od reálné baterie lze trvale dobíjet velkým proudem a je možné měnit nominální napětí. Ideové zapojení simulátoru baterie je na obr. 5.6.1. Konkrétní zapojení je součástí přílohy A, které je výsledkem bakalářské práce [29]. Simulátor baterie je paralelní stabilizátor, který na vstupních svorkách udržuje nastavené napětí. Maximální proud je omezen a lze skokově nastavit. Maximální teplota chladiče výkonného prvku způsobí přerušování funkce až do vychladnutí. Simulátor je vybaven vstupním filtrem, aby rušení z nabíjecího zařízení neovlivňovalo stabilizaci. Pomocný zdroj proudu zajišťuje stálou činnost regulátoru. Nabíjecí zařízení při měření napětí na simulátoru je přesvědčeno, že se jedná o skutečnou baterii.



Obr. 5.6.1 Simulátor baterie – idea

V pokročilejší fázi vývoje, kdy se testuje algoritmus nabíjení, se bez reálné baterie neobejdeme, a tak je potřeba pro testování zařízení baterie rychle připravovat (vybíjet). Vybíjení není složitý proces, avšak je nutné dodržet konečné vybíjecí napětí baterie a pro účely testování, například NiCd a NiMH stačí vybit jen část kapacity, jelikož je důležitý především závěr nabíjení. Proto se osvědčí vybíjecí zařízení, které je řízeno procesorem a umožňuje zmiňované funkce. Schéma vybíjecího zařízení je na obr. 5.6.2. Jedná se o výkonový prvek zapojený paralelně k baterii, ale činnost je založená na přesné regulaci

proudu. Procesor generuje referenční napětí pro regulaci proudu a pomocí zesilovače měří skutečnou velikost proudu. Procesor měří prošlý proud v čase a vypočítává odebranou kapacitu (energii), také kontroluje velikost napětí. Regulovaný proud je až 20 A a ztrátový výkon 200 W už vyžaduje ventilaci.



Obr. 5.6.2 Vybíjecí zařízení

Diagnostika

Při vývoji nabíjecího zařízení se musí také uvažovat o budoucí výrobě a diagnostice hotového výrobku. Diagnostické zařízení je nákladné, a proto se usiluje o jeho jednoduchost a maximální odhalitelnost závady výrobku. Navržená koncepce testování vychází z úvahy, že nabíjecí zařízení s procesorem je možné navrhnout a naprogramovat tak, že skrze procesor bude možné ověřit všechny funkce. V průběhu vývoje se ukázalo, že návrh konstrukce není nutné nijak upravovat, neboť procesor připravený pro nabíjení může pouhým programovým vybavením konfigurovat své okolí tak, aby odhalil případnou závadu. Způsob testování vyžaduje velmi jednoduchý přípravek, který je na obr. 5.6.3 a v příloze C.



Obr. 5.6.3 Diagnostický přípravek

Program procesoru je kromě algoritmů nabíjení doplněn o sadu příkazů, jež přicházejí sériovou komunikací, a procesor na jejich základě konfiguruje své okolí anebo měří a výsledky odesílá. Diagnostický program na PC má soubor se sledem odesílaných příkazů a vyhovujících odpovědí. Pokud jsou všechny odpovědi správné, test je úspěšný, ale pokud ne, je závada částečně lokalizována podle toho při jaké testované části nebo funkci nastal nežádoucí stav. Více v kapitole 6.6. Pokud by nebyl procesor limitován velikostí paměti, kvůli ceně, mohl by být test implementován přímo v něm.

5.7 Zásady návrhu zohledněné pro funkci a elektromag. kompatibilitu

Vlastnosti nabíjecího zařízení jsou závislé na návrhu desky plošných spojů (DPS). Návrh DPS ovlivňuje několik faktorů, které jsou protichůdné, a při vývoji se hledá kompromis. Prvním faktorem je cena, jež limituje počet vodivých vrstev DPS a výrobní přesnost, jakož i počet drátových propojení a klasických součástek s nákladným osazováním obecně. Rozměry DPS jsou často předem známe, avšak problémem nebývá nedostatek místa na DPS, ale omezený výškový profil, který podstatně zmenšuje oblast pro vysoké součástky až na jednu třetinu celkové plochy DPS nebo neumožňuje umístování radiálních součástek vůbec. Další faktory se pojí s odvodem tepla a elektromagnetickým vyzařováním.

Návrh DPS spínaných zdrojů

Obvody spínaných zdrojů se vyznačují velkými pulsními proudy a rychlými napěťovými změnami. Spoje s velkými proudy musí být co nejširší a nejkratší, vedené dostatečně daleko od citlivých částí obvodů bez ostrých hran a kolmých ohybů. Eliminace parazitních prvků a galvanických vazeb je důležitá především u vztažného potenciálu (země, GND). Vztažný potenciál je maximálně rozšířen po celé desce (netvoří uzavřené smyčky) a svádí různé cesty proudů do jednoho centralizovaného bodu (uzlu). Tento bod je zpravidla umístován přímo u řídicího obvodu nebo analogových obvodů sloužících k regulaci či měření. Vytvoření a správné umístění vztažného bodu je nejdůležitější předpoklad pro budoucí stabilní a přesnou regulaci a chod měniče. Části obvodu, jež jsou zdroji rušení (impulsní proudy, velké napěťové změny) se neumísťují na okraj DPS a jsou obklopeny zemnicím potenciálem. Obecně se u spoje maximálně snižuje odpor a indukčnost a vůči zemnímu vodiči se vytváří kapacitní vazba. Analogové obvody jsou umístovány dál od zdrojů rušení, jejich napájení je blokováno kondenzátory a jejich vstupy jsou filtrovány.

Potlačení vyzařování

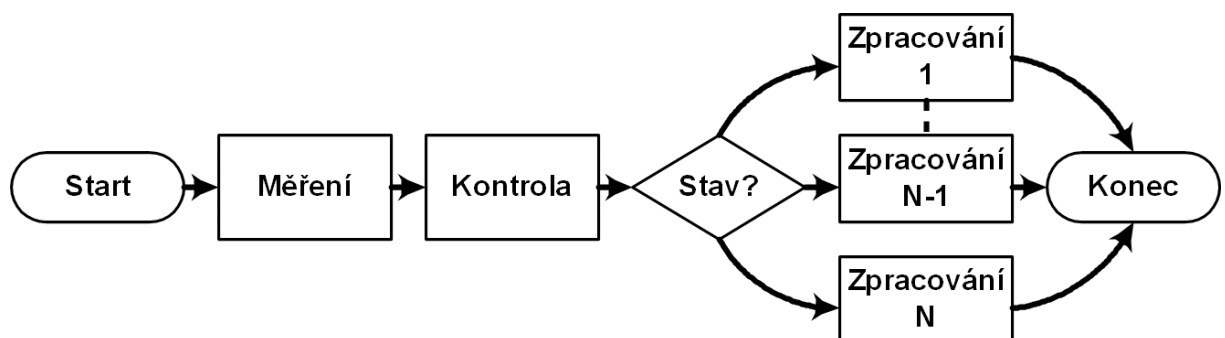
Z principu činnosti vznikají při chodu spínaného zdroje vysoké kmitočty, které se snadno šíří obvodem, ale také vzduchem. Místa, kde vznikají nebo se šíří vysoké kmitočty, jsou označována zdroji rušení. Primární snahou je snižovat intenzitu zdrojů rušení tlumiči a vysokofrekvenčními filtry s keramickými nebo fóliovými kondenzátory. Velkým zdrojem rušení je transformátor, a proto se jeho primární vinutí na vysoké napětí vine jako první, aby sekundární vinutí částečně zabránilo přímému vyzařování. Transformátor může být také doplněn o stínící pásek. Spoje, které jsou zdrojem rušení, se navrhují co nejmenší a nejkratší, dostatečně vzdálené od okolních spojů. Prostup vzniklého rušení ze zařízení je vždy eliminován vstupním filtrem. Přívodní vodiče a spoje před filtračním obvodem by neměly být umístovány blízko částem, které jsou za ním, což je častá chyba výrazně zhoršující emisi. Zařízení musí vyhovovat normě o emisích (ČSN) EN 61000-6-3 v prostředí obytném, obchodním a lehkém průmyslu, která specifikuje dovozené úrovně sledovaných kmitočtových pásem pro vyzařování přívodním vodičem a vzdušným prostorem.

6 Programové vybavení nabíjecích systémů

Processor se v nabíjecích zařízeních začal používat teprve nedávno, z důvodu vyšších nároků na funkce nabíjecích zařízení a přijatelné ceny signálových procesorů. Z počátku sloužil procesor jen k úkonům, jež bylo obtížné realizovat jiným způsobem. V současné době se naopak procesor stává hlavní částí, která konfiguruje (upravuje) podružné části, plně ovládá primární měnič a řídí celý nabíjecí proces. Program procesoru musí především maximálně spolupracovat s okolními částmi. Je nutná dostatečná ovladatelnost a modifikace okolí a přístup k měření důležitých veličin. Má-li procesor k dispozici velké množství přesných informací ze svého okolí týkajících se proudu, napětí, teploty, druhu a počtu článků, je schopen využívat více metod nabíjení a ukončení, jež vedou k šetrnému a bezpečnému nabíjení. Používané metody nabíjení nejsou náročné na realizaci ani na programovou paměť, ovšem samotný algoritmus musí být doplněn o regulační, kontrolní, ochranné a signalizační části, které splňují požadované provozní parametry nabíjecího zařízení.

6.1 Algoritmizace obecně

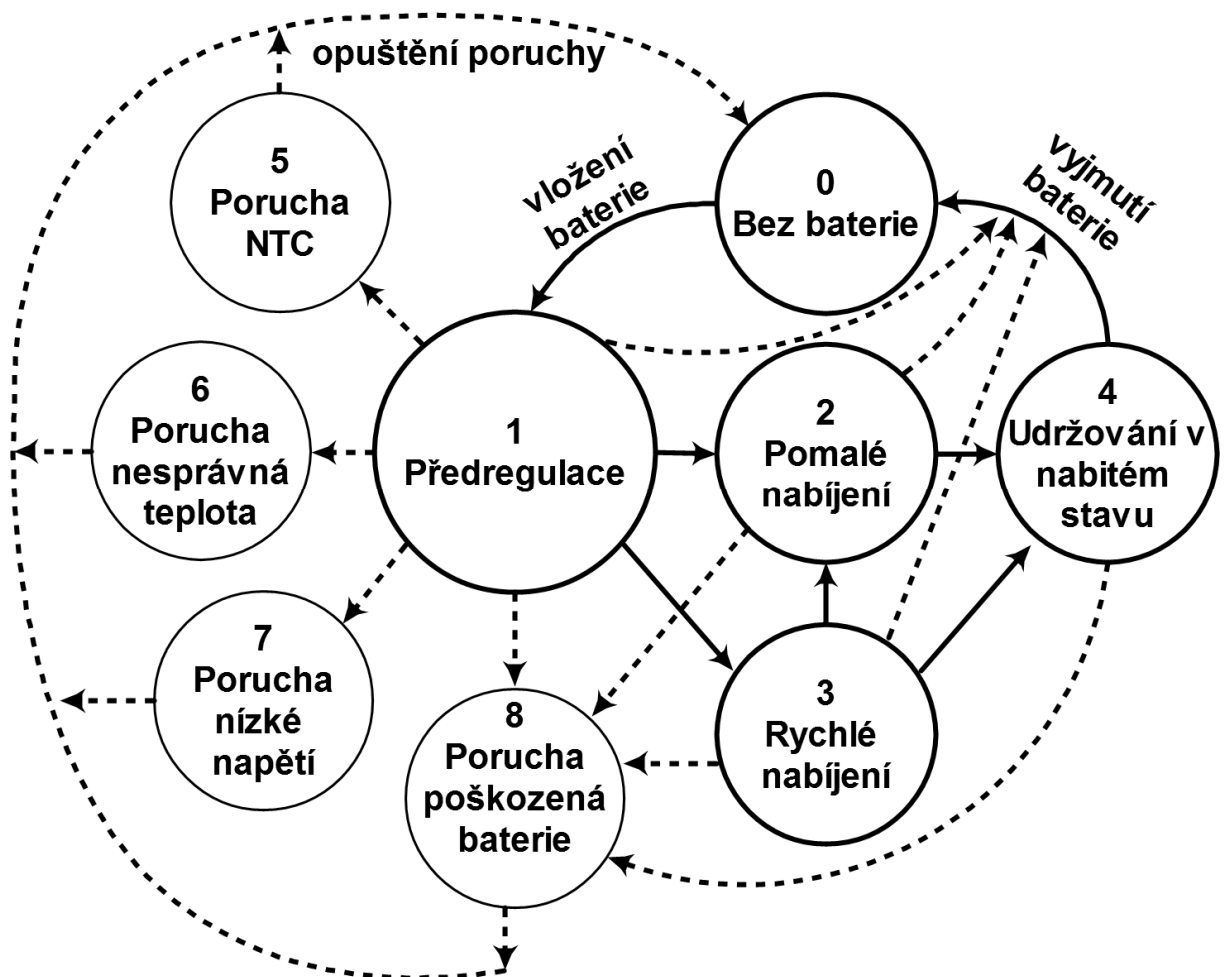
Nabíjecí proces je velmi pomalý, chemické a elektrické děje probíhají spojitě, proto není nutné kontrolovat (vyhodnocovat) stav nabíjení neustále. V praxi se volí perioda vyhodnocování nabíjení od 0,1 s do 5 s. Horní hranice je vzhledem k dynamickému chování nabíjecího procesu dostatečná, ale pro obsluhu nabíjecího zařízení je potřeba vyhodnocovat a signalizovat aktuální stav rychleji.



Obr. 6.1.1 Sled procedury nabíjecího procesu, který se pravidelně opakuje

Vyhodnocení se pravidelně opakuje podle schématu na obr. 6.1.1. Nejprve jsou změřeny aktuální analogové veličiny a logické úrovně vstupních bran detekující hlídané hodnoty

veličin. Poté se kontrolují získaná data, zda nedošlo k nestandardní nebo limitní situaci. V případě, že ne, pokračuje se jedním z bloků zpracování. Jednotlivé bloky zpracování obsahují algoritmus pro různé druhy článků a různé fáze nabíjení. Rozčlenění algoritmů zvyšuje přehlednost programu a snadnou modifikaci.



Obr. 6.1.2. Přejechy mezi stavy v průběhu nabíjení

Stavové chování

Nabíjecí proces je možné rozdělit na několik stavů, jichž může nabíjecí zařízení nabývat. Tohoto rozdělení se využívá pro jednodušší popis a orientaci v programu. Počet stavů se může lišit podle požadovaných vlastností, na nichž závisí i podmínky přechodů mezi stavy. Ukázka běžného stavového diagramu je na obr. 6.1.2. Základní stavy (0 – 4), jsou doplněny o poruchové stavy, které by v běžném provozu neměly nastat, ale nabíjecí zařízení s nimi musí počítat a o poruchovém stavu uživatele informovat. Jak je patrné z diagramu, poruchové stavy a jejich podmíněné přechody značně zvyšují složitost celého diagramu. Výchozí stav je bez vložené baterie (0), do něhož se nabíjecí zařízení dostane po připojení k napájení nebo

z libovolného stavu při vyjmutí baterie. Po vložení baterie do nabíjecího zařízení se automaticky přejde do stavu předregulace (1). Poté se stav mění na základě podmíněných přechodů. V bezporuchové situaci, po přednabíjení začne rychlé nabíjení (3) a následuje poslední stav udržování v nabitém stavu (4), ve kterém nabíjecí zařízení setrvává až do vyjmutí baterie [2, 30].

Zásady vytváření programu

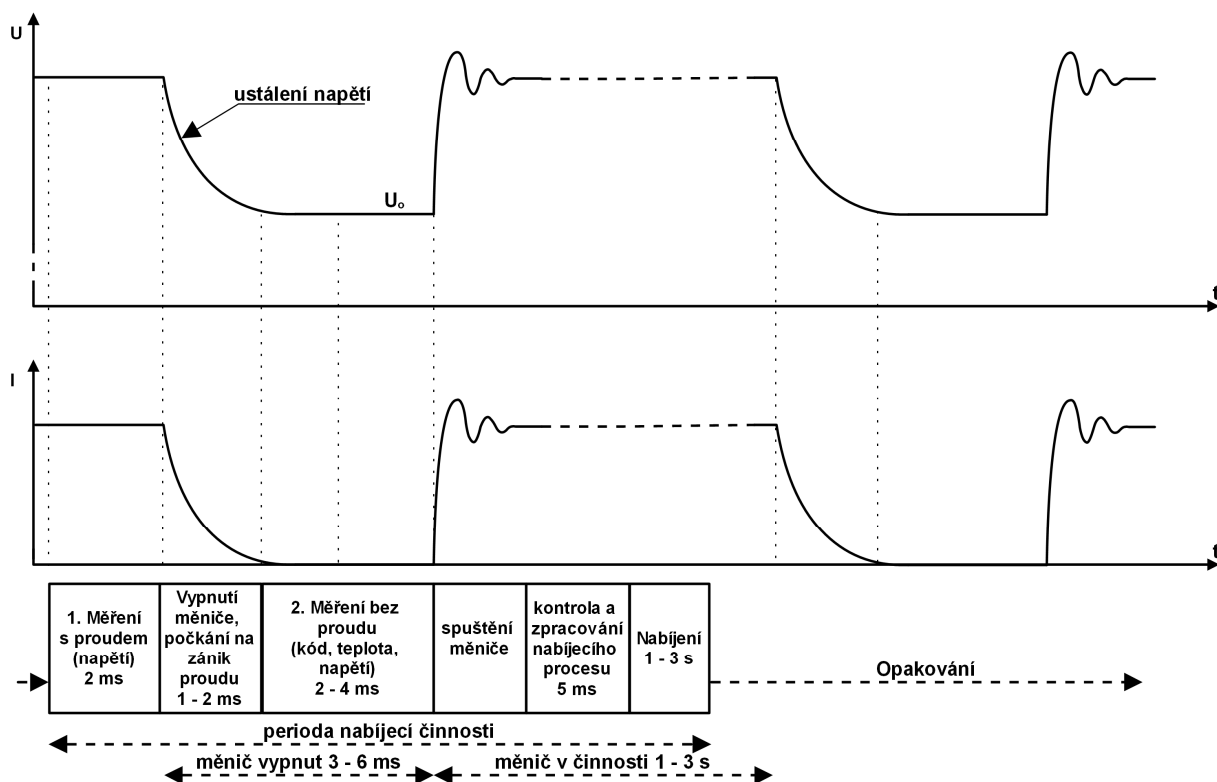
Struktura programu s výše uvedeným rozdělením a stavovým chováním je složena z mnoha dílčích úseků, které je nutné i přes jejich jednoduchost doplňovat podrobným komentářem. Algoritmy i podmíněné přechody jsou spjaty s konstantami zadanými specifikací požadovaných vlastností. Tyto konstanty by měly být pojmenovány výstižně a definovány ve zvláštním hlavičkovém souboru a to i v případě, že jsou v programu použity jen jednou. Podstatně se tímto způsobem zvyšuje efektivita při hromadné úpravě parametrů, jež jsou v průběhu vývoje měněny konstruktérem i zákazníkem bez nutnosti vyhledávání míst jejich použití. Ze stejného důvodu je vhodné maximálně využívat překladač k přepočítávání konstant, které jsou závislé na hodnotách součástí. Definuje se hodnota součástky a následně je tato použita ve vzorci pro výpočet konstanty, jež je na hodnotě součástky závislá. Využití překladače k výpočtu konstant pro teplotní, napěťové či proudové úrovně, stejně jako pro rozlišení velikosti kódovacího rezistoru, usnadňuje ruční výpočet desítek konstant. Také odstraňuje možnost špatného výpočtu nebo zadání nesprávné konstanty a opomenutí všech provázaností měněného parametru.

6.2 Číslíkové zpracování naměřených veličin a jejich využívání

Bezprroudové měření

Nabíjecí proces vyžaduje přesné měření sledovaných veličin. Je-li primární měnič v činnosti, měření je ovlivňováno velkým rušením a zároveň nabíjecím proudem. Proud způsobuje napěťové úbytky na vodičích připojené baterie a zabraňuje přesnému měření napětí a teploty baterie. Je samozřejmě možné vycházet z hodnot naměřených při činnosti měniče, ale častěji se provádí bezprroudové měření. Jak naznačuje obrázek 6.2.1, bezprroudové měření je založeno na úplném zastavení měniče a vyčkání několika ms na ustálení hodnot. Následuje měření vnitřního napětí baterie a ostatních veličin, po němž se měnič znovu aktivuje. Aktivace měniče a uzavírání zpětné vazby je doprovázeno přechodovými jevy. Jsou-li

požadovány naměřené hodnoty i při nabíjecím proudu, provádí se měření těsně před přerušением proudu. Primární měnič se aktivuje okamžitě po bezproudovém měření, aby se nabíjecí proces přerušением zbytečně neprodlužoval. Jelikož vyhodnocení naměřených hodnot nějakou dobu trvá, případná změna nabíjecího proudu se vykoná o několik ms později.



Obr. 6.2.1 Časový průběh bezproudového měření

Zpracování naměřených hodnot

Přestože je analogově-digitální převodník rychlý a přesný, převod je prováděn s nižším hodinovým kmitočtem a je několikrát opakován, aby se dostatečně potlačilo rušení, které je i při vypnutém primárním měniči v malé míře přítomno. Počet opakování závisí na intenzitě zbytkového rušení a požadované citlivosti. Součtem opakovaně naměřených hodnot získáme větší rozlišení. Rušení, jež má nulovou střední hodnotu, se součtem částečně vyruší. Pro zvláště citlivé aplikace, jako je metoda $-\Delta V$, se měření opakuje 8 – 16krát a dále se zpracovává.

Během měření mohou nastat nepříznivé podmínky, které mohou výrazně ovlivnit jedno měření, jež může být nesprávně vyhodnoceno, a proto se využívá digitální filtrování naměřených hodnot, které značně sníží citlivost negativně ovlivněného měření. Nejjednodušším filtrem je dolní propust, která je založena na částečném ovlivňování velikosti

předchozí hodnoty (akumulátor A) nově naměřenou hodnotou (D), viz rovnici (6.2.1). Konstanta N udává řád filtru, jenž znamená pro diskrétní aplikaci délku časové odezvy. Pro aplikace pracující s celými čísly je normování (dělení N) nevhodné, a tak se neprovádí, což má za následek, že hodnota akumulátoru je N-krát větší než naměřené hodnoty. Filtr řádu 4 až 16 bez normování se používá pro metodu $-\Delta V$.

$$A_1 = \frac{(N-1) \cdot A_0 + D_1}{N} \quad (6.2.1)$$

Naměřené hodnoty jsou v celých číslech o velikosti závislé na měřeném napětí, referenčním napětí, odporovém děliči, rozlišení analogově-digitálního převodníku, počtu opakování a použitém řádu filtru. Mnoho faktorů ovlivňujících zpracovávané hodnoty znesnadňuje orientaci při sledování nabíjecího procesu, a proto se především elektrické veličiny (proud a napětí) přepočítávají na skutečné velikosti v základních jednotkách nebo tisícinách jednotek. Přepočet také usnadňuje zadávání a úpravu konfiguračních konstant požadovaných vlastností nabíjecího zařízení.

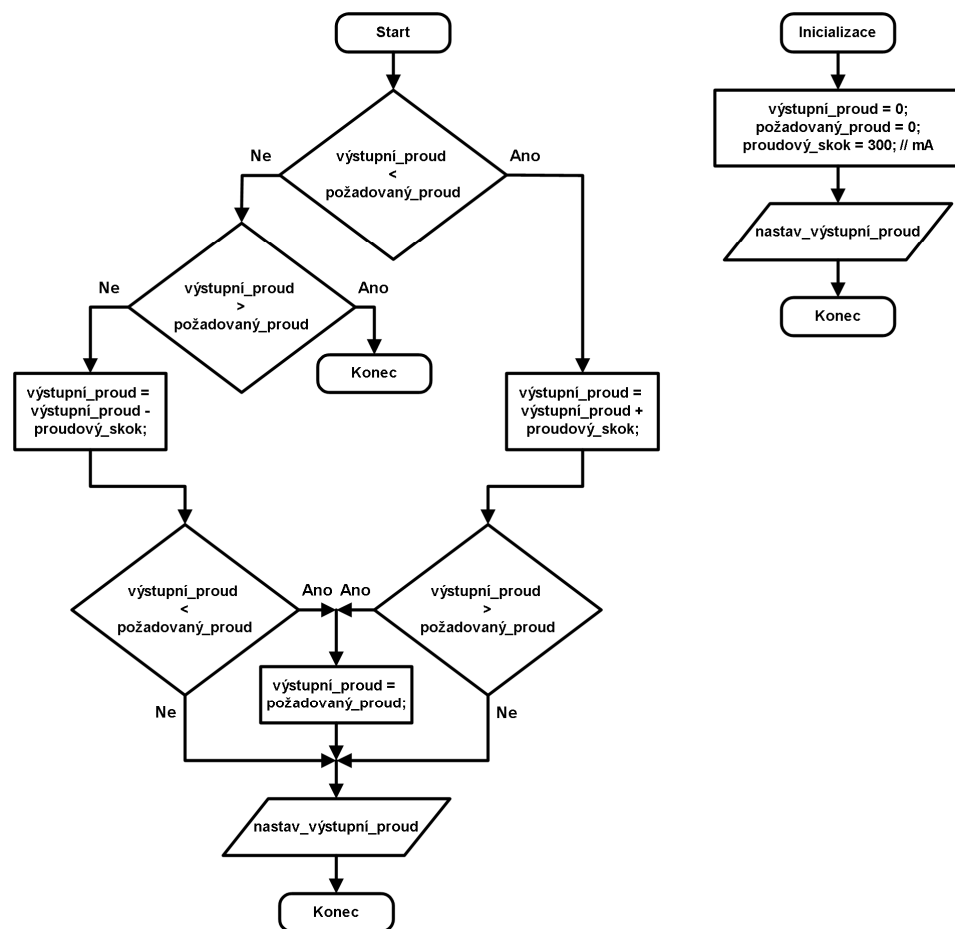
6.3 Elementární způsoby regulace a detekce

Celý nabíjecí proces může být složen z mnoha fází, ale každá fáze obsahuje nepříliš složité regulace a jen výjimečně rozsáhlé detekce. Vstupními daty jsou naměřené analogové hodnoty převedené na skutečnou velikost nebo jednobitové informace o stavu externího detektoru (komparátoru). Výstup je často analogová hodnota ovládající velikost nabíjecího proudu nebo výstupního napětí. Poskládáním elementárních způsobů regulace a detekce lze splnit libovolné požadavky na nabíjecí proces.

6.3.1 Pozvolný nárůst proudu

Pozvolný nárůst proudu je vhodné využít při začátku nabíjecího procesu. Baterii okamžitý nárůst proudu nepoškodí, ovšem pokud je baterie již poškozena, pomalým zvyšováním proudu se defekt odhalí dříve. Baterie nemusí být vystavena maximálnímu výstupnímu napětí, které při okamžitém nabíjení maximálním proudem může nastat. Pozvolný nárůst proudu a s tím související pozvolný nárůst odebíraného výkonu je výhodný i pro nabíjecí zařízení napájené z automobilové palubní sítě. Při nízkém nabití autobaterie

podpěťová kontrola zareaguje dříve, aniž by došlo k hlubokému poklesu napětí náhlým odběrem maximálního výkonu. Regulace pozvolného nárůstu je vhodná i pro nabíjení Li-Ion baterií, kdy při téměř plné baterii přechází regulace plynule na regulaci konstantního napětí, aniž by proud dosáhl maximální hodnoty. Regulace doplněná o plynulé snižování proudu na požadovanou hodnotu je vhodná pro změny proudu během nabíjení ovlivněné, například vnitřní teplotou baterie. Snižování nabíjecího proudu na polovinu kvůli nedostatečnému chlazení při 40 °C až 45 °C je typické pro NiCd a NiMH. Baterie Li-Ion se během nabíjení ohřívají mnohem méně.

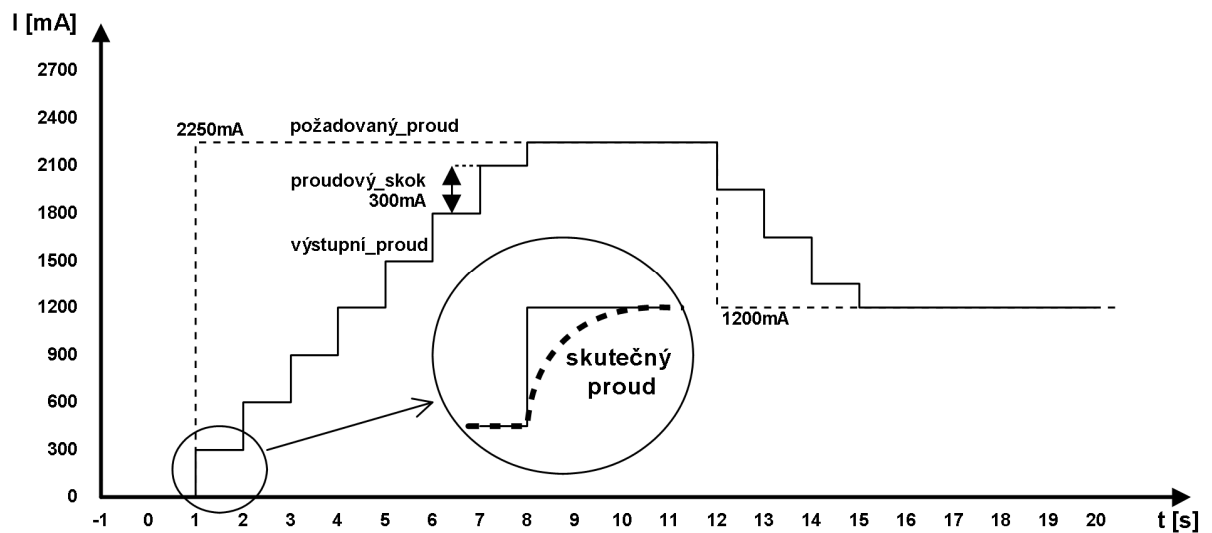


Obr. 6.3.1.1 Vývojový diagram pozvolné regulace nabíjecího proudu

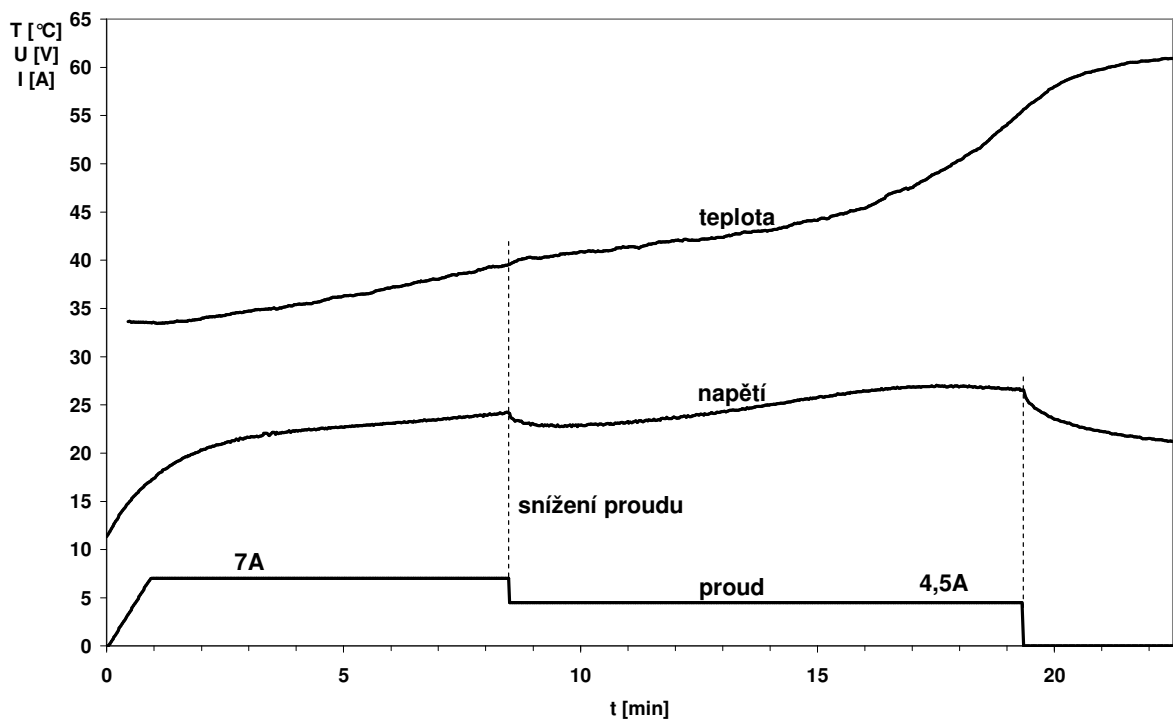
Na obrázku 6.3.1.1 je zobrazen diagram regulace proudu s pozvolnou změnou řízenou na základě požadované hodnoty. Regulace je založena na porovnávání velikosti požadovaného proudu a výstupního proudu. V případě různých hodnot dochází ke zvětšení nebo snížení výstupního proudu o velikost danou proudovým skokem. Pracuje se s celými čísly v jednotkách mA. Pokud poslední změna přesáhne požadovanou hodnotu, je do výstupního proudu zapsána hodnota požadovaného proudu. Při každé změně výstupního proudu se spustí

funkce nastavení proudu, jež hodnotu výstupního proudu přepočítá a nastaví komparační mez PWM generátoru tak, aby nabíjecí proud odpovídal hodnotě proměnné výstupní proud.

Na obrázku 6.3.1.2 je zobrazeno časové chování regulace proudu s pozvolnou změnou. Výstupní proud se po skocích přibližuje požadované hodnotě, dokud jí nedosáhne, přičemž požadovaná hodnota může měnit během nabíjení svoji velikost. Po přednastavení PWM generátoru se skutečný proud mění se zpožděním způsobeným výstupním filtrem.



Obr. 6.3.1.2 Časové chování pozvolné regulace nabíjecího proudu

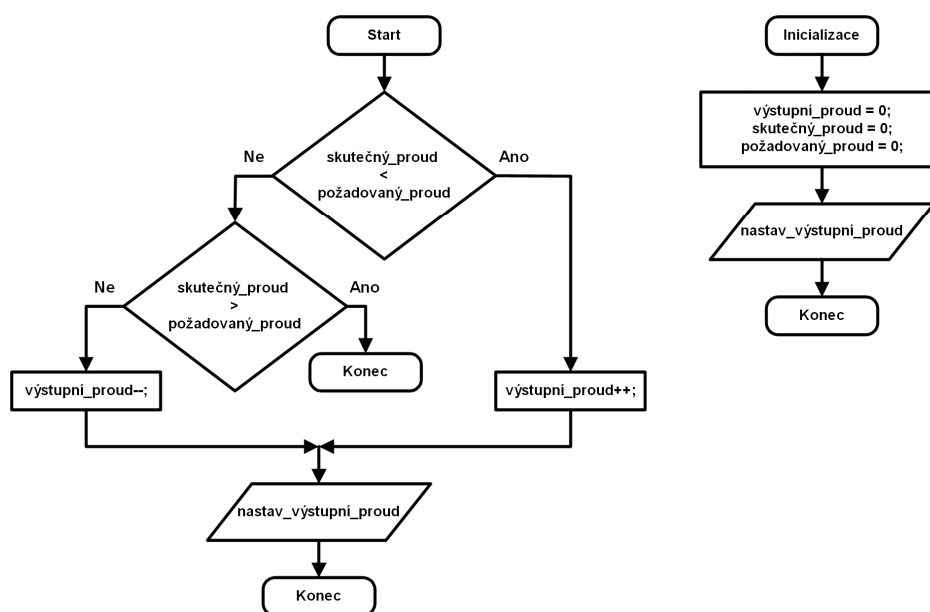


Obr. 6.3.1.3 Nabíjecí průběh NiMH baterie se změnou nabíjecího proudu.

Snížení nabíjecího proudu na polovinu u článků NiCd a NiMH vyvolá vždy také pokles vnitřního napětí baterie, jak je zobrazeno na obr. 6.3.1.3. Aby tento pokles nezpůsobil ukončení nabíjení metodou $-\Delta V$, algoritmus toto vyhodnocující se zároveň se změnou inicializuje a jeho činnost se několik vteřin (10 s až 20 s) nevykonává. Snížení proudu způsobí časové oddálení $-\Delta V$ baterie a to i v případě, že již při plném nabíjecím proudu pokles probíhal. Při opačné změně z polovičního proudu na plný nabíjecí proud, není nutné algoritmus detekce $-\Delta V$ inicializovat, protože se vnitřní napětí zvýší a probíhal-li pokles $-\Delta V$, jeho pokračování se oddálí a projeví se s větší rychlostí poklesu.

6.3.2 Regulace konstantního proudu

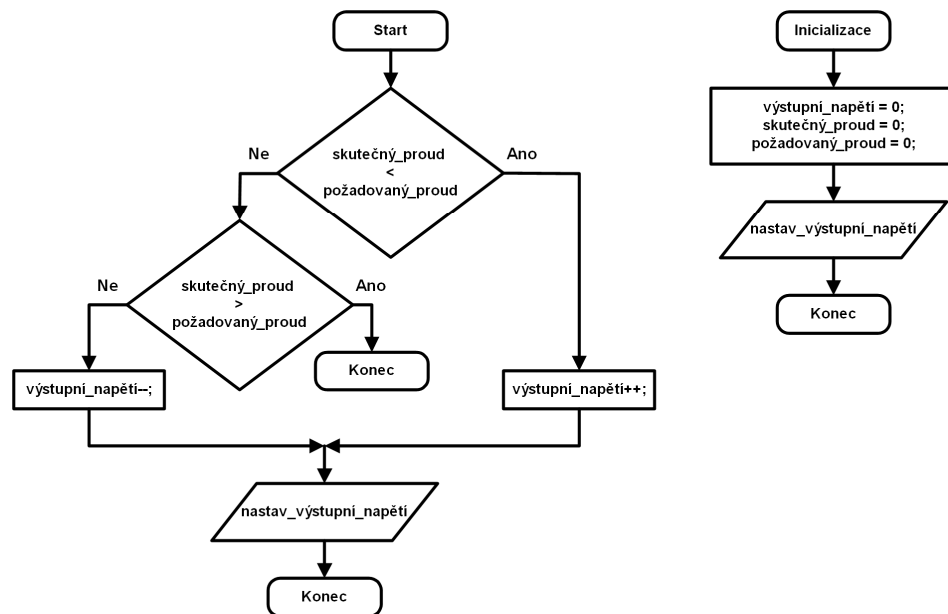
Pro regulaci konstantního proudu postačí aplikace některého regulátoru z kapitoly 5.4.2. Existují ovšem i aplikace, kdy je regulátor navrhnut nevhodným způsobem a regulovaná hodnota nelze určit jednoduchým přepočtem a nastavením PWM generátoru nebo je výsledná hodnota nepřesná či negativně ovlivněna. V tomto případě je použito zapojení, které snímá nabíjecí proud a ve známém a neovlivněném převodu (poměru) jej převádí na napětí, jež je měřeno analogově-digitálním převodníkem. Naměřená a případně i integrovaná hodnota (součet několika posledních měření) slouží jako zpětná vazba regulace proudu. Algoritmus regulace konstantního proudu, viz obr. 6.3.2.1, je zjednodušená obdoba regulace pozvolné změny proudu z předchozí kapitoly.



Obr. 6.3.2.1. Regulace konstantního proudu pomocí proudového regulátoru a zpětné vazby měřením skutečného proudu.

Regulace však využívá nejmenší změnu, kterou umožňuje PWM generátor, aby bylo možné dosáhnout požadované hodnoty co nejpřesněji. Spouštění této regulace je nutné provádět častěji, aby doregulování bylo dostatečně rychlé.

Obdobným případem, kdy je zapotřebí programová regulace proudu, je využití napěťového regulátoru, což je velmi výjimečná aplikace. Dosažitelná přesnost nastavení požadovaného proudu je dána nejmenším napěťovým krokem a velikostí vnitřního odporu baterie a odporu přírodních vodičů, bez nichž by se proud měnil se skokovou změnou napětí s příliš velkými změnami. Regulace vyžaduje měření nabíjecího proudu, podle kterého se mění nastavení PWM generátoru pro regulaci napětí. Algoritmus na obr. 6.3.2.2 se odlišuje od předchozího pouze výstupní modifikovanou veličinou.



Obr. 6.3.2.2 Regulace konstantního proudu pomocí napěťového regulátoru a zpětné vazby měřením skutečného proudu.

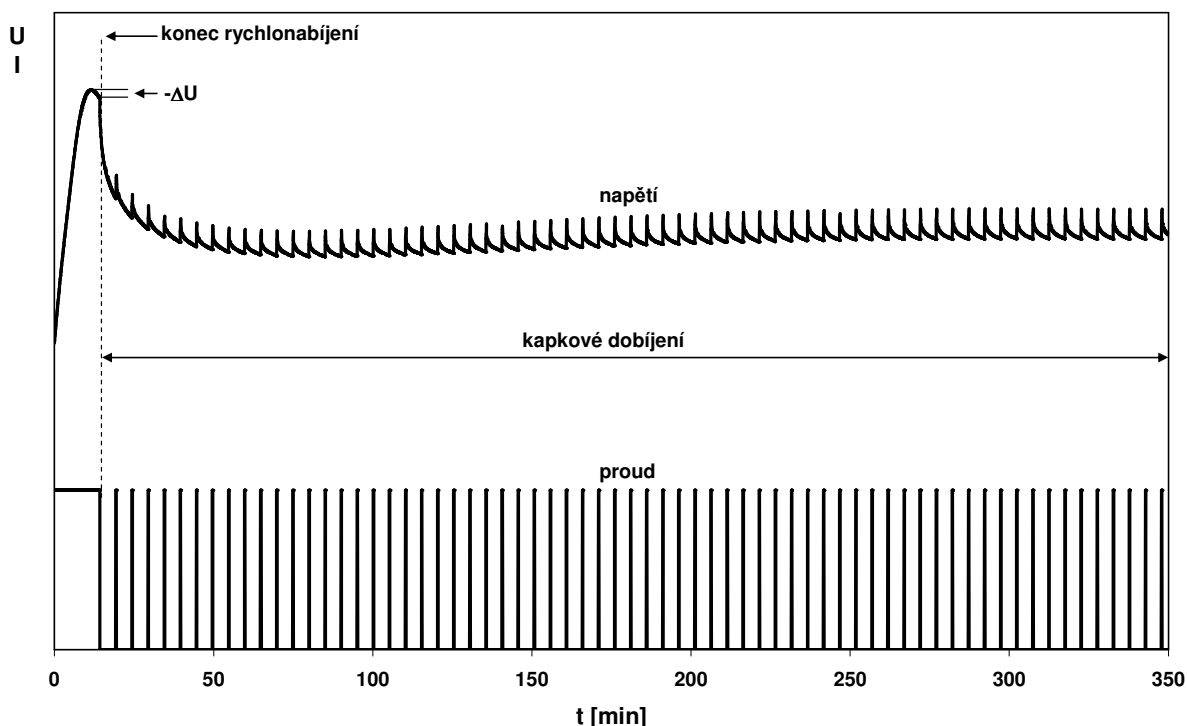
Nabíjecí systém může velikost proudu regulovat také pulsní metodou. Poměr doby aktivní (t_A) ku neaktivní (t_N) lze vypočítat z požadované hodnoty ($I_{POŽ}$) a maximálního regulovaného proudu (I_{MAX}) při aktivní době vzorcem (6.3.2.1).

$$I_{POŽ} = I_{MAX} \cdot \frac{t_A}{t_A + t_N} \quad (6.3.2.1)$$

Aktivní doba se často volí konstantní a negativní doba se určuje upraveným vzorcem (6.3.2.2).

$$t_N = \left(\frac{I_{MAX}}{I_{POŽ}} - 1 \right) \cdot t_A \quad (6.3.2.2)$$

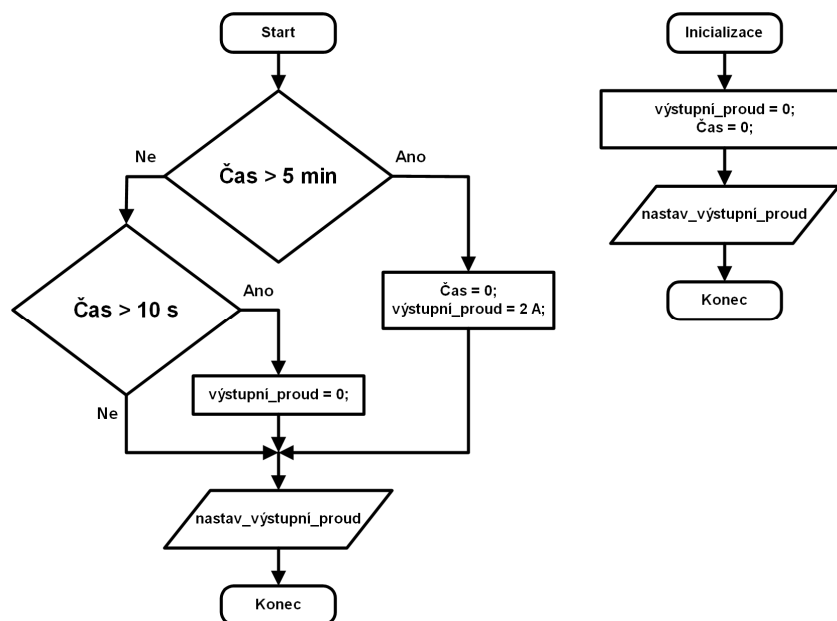
Nejčastější použití je pro velmi malé proudy v konečné fázi nabíjení NiCd nebo NiMH článků, kdy se tímto způsobem dosahuje proudů $0,01 I_c$, které slouží k bezpečnému a šetrnému dobití článků do 100 % kapacity. Ukázka kapkového nabíjení je na obr. 6.3.2.3, kde se jedná o dlouhodobé setrvání baterie v nabíjecím zařízení.



Obr. 6.3.2.3 Průběh napětí a proudu NiMH baterie při kapkovém dobíjení.

Algoritmus regulující kapkové dobíjení je na obr. 6.3.2.4. Vychází z principu generování PWM signálu pomocí časové proměnné (čítače) a dvou časových konstant (perioda a komparační mez), přičemž větší konstanta (perioda) je hodnota t_N nebo přesněji $t_N + t_A$ a menší konstanta (komparační mez) je t_A . Na konci periody se časový údaj nastaví na nulu a aktivuje se nabíjecí proud. Po překročení komparační meze se nabíjecí proud přeruší.

Aplikace algoritmu na obrázku 6.3.2.1 lze s výhodou použít v situaci, kdy není kontinuálně dodáván výkon primární částí. V praxi může být prioritní snižování vstupních neharmonických proudů, kdy primární měnič omezuje přenášený výkon podle okamžité velikosti vstupního napětí, což má za následek velké zvlnění výstupního proudu o frekvenci 100 Hz. Průměrováním naměřených hodnot během několika period síťového napětí je opět možné získat zpětnou vazbu pro algoritmus regulace proudu požadované hodnoty.



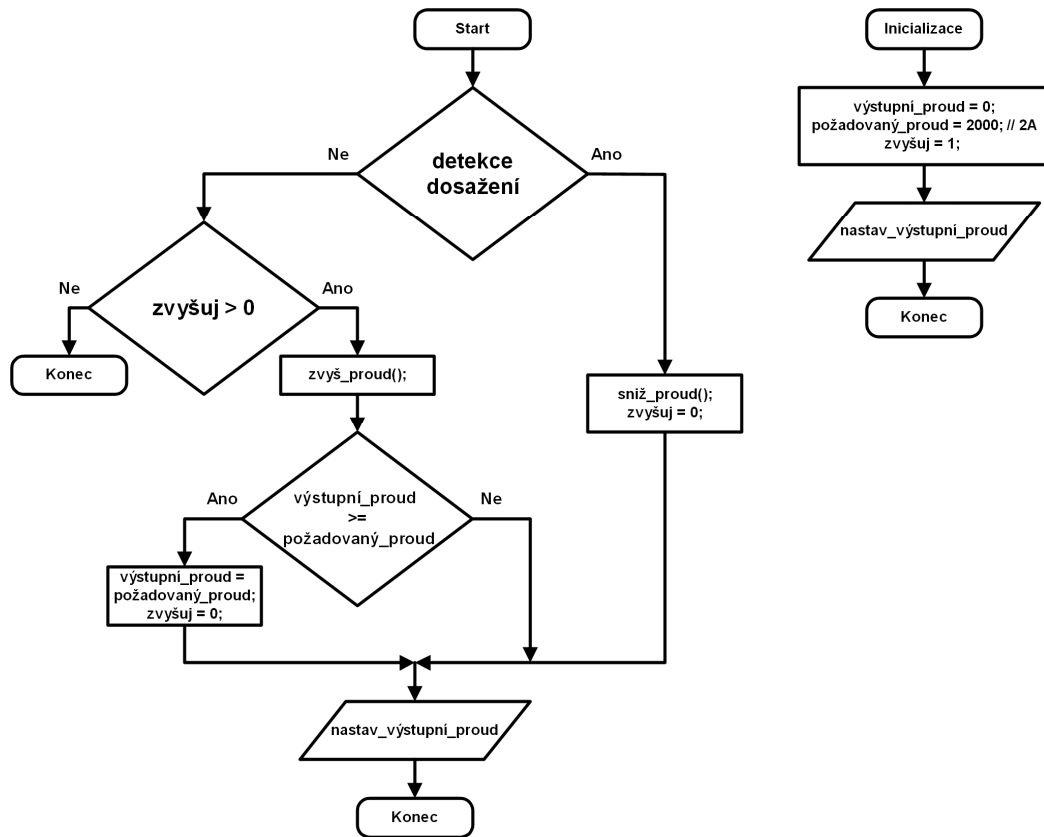
Obr. 6.3.2.4 Regulace malého pulsního proudu (kapkové dobíjení 67 mA)

6.3.3 Regulace konstantního napětí

Jelikož regulátor napětí není běžný a k dispozici je jen přesný proudový regulátor, regulace konstantního napětí je řešena programem. Algoritmus umožňující regulaci libovolné velikosti napětí je založen na podobně jednoduchém principu jako předchozí regulace. Vstupní signál, jímž je algoritmus ovlivňován, je například bitová informace z detektoru konkrétní hodnoty napětí, viz obr. 5.4.4.2 a). Algoritmus se může rozhodovat také na základě velikosti naměřeného napětí baterie analogově-digitálním převodníkem, což vyžaduje velmi časté a dostatečně filtrované měření. Cílem regulace je upravovat velikost nabíjecího proudu tak, aby se výstupní napětí pohybovalo těsně kolem požadované hodnoty. Ovládaný proudový regulátor by měl mít známý převod, aby byla velikost aktuálně nastaveného proudu známa, což zároveň zjednoduší konstrukci, protože nebude potřeba operační síť pro měření proudu.

Na obrázku 6.3.3.1 je zobrazen algoritmus regulace konstantního napětí řízený pomocí externího detektoru napětí s postupným zvyšováním proudu a s omezenou velikostí výstupního proudu. Inicializace algoritmu nastaví nabíjecí proud na nulovou hodnotu. Pomocná proměnná *zvyšuj* slouží pro počáteční růst proudu, který se po prvním dosažení regulovaného napětí nebo po zvýšení proudu nad požadovanou hodnotu přestane zvyšovat. Počáteční zvyšování je důležité, aby se algoritmus dostal na cílové napětí bez jeho velkého přesažení. Za běžných podmínek se v napěťovém režimu bude proud nadále jen snižovat. Popsaný algoritmus je přímo určený pro nabíjení Li-Ion článků. První fáze nabíjení Li-Ion je

ryze proudová a druhá fáze, počínající prvním dosažením konečného napětí, spočívá v udržování konečného napětí a pomalém snižování proudu.



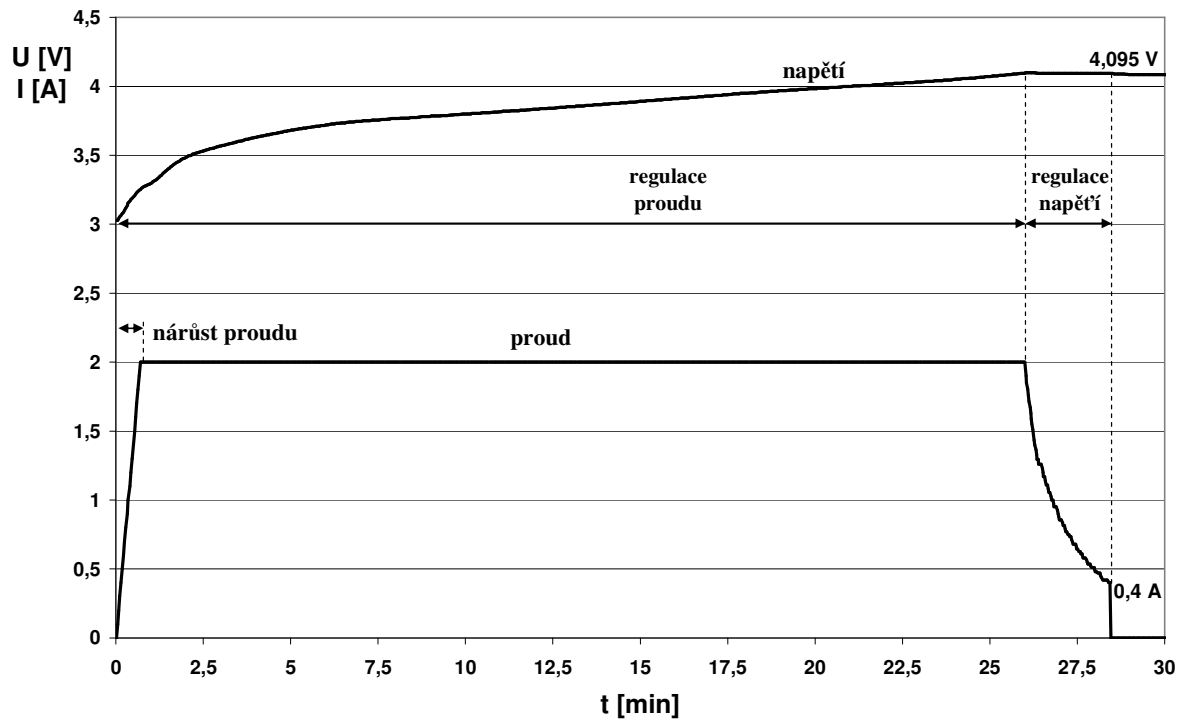
Obr. 6.3.3.1 Regulace konstantního napětí

V praxi je možné snižovat proud o konstantní velikost, například 50 mA, ovšem vývoj proudu je exponenciální, to se projevuje nejprve dosti rychlým poklesem proudu, jehož rychlost poklesu se stále snižuje. Proto je vhodnější snižovat proud o poměrnou část (N) z aktuální velikosti výstupního proudu, viz vzorec (6.3.3.1), což představuje exponenciální pokles proudu.

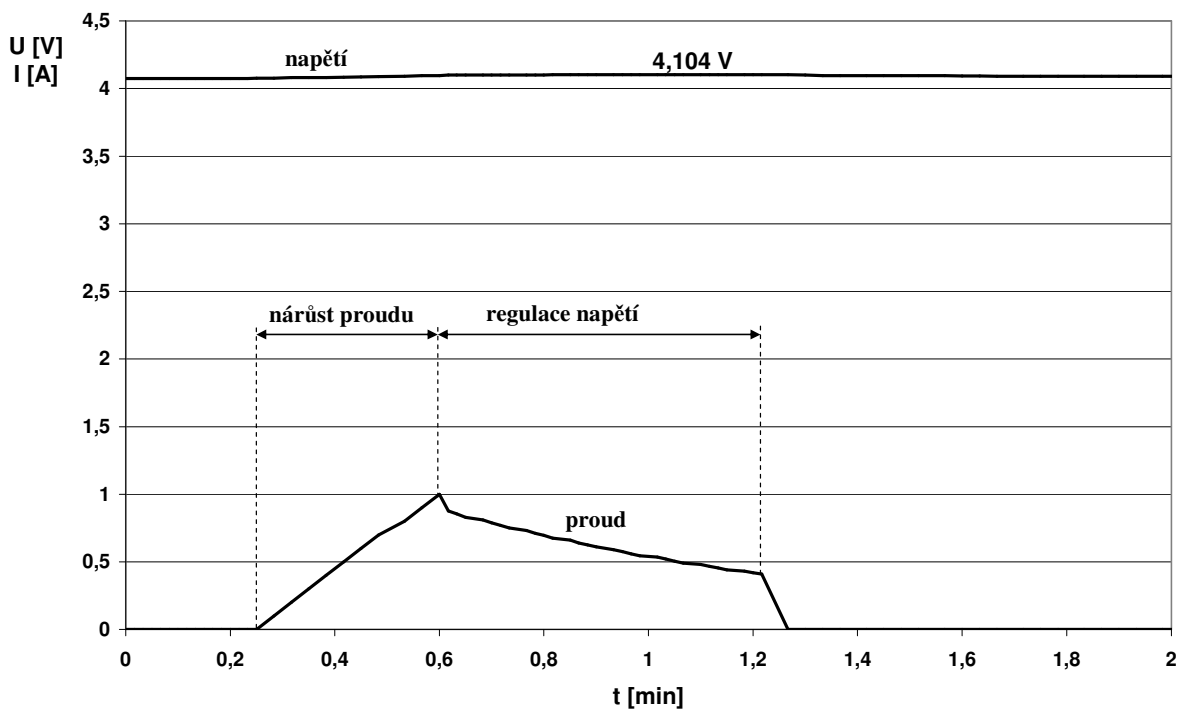
$$I_{VYST1} = I_{VYST0} - \frac{I_{VYST0}}{N} \quad (6.3.3.1)$$

Pro kvalitní regulaci snižování proudu je potřebné najít optimální poměrnou část (N), která je závislá na kapacitě dobíjené Li-Ion baterie a délce vyhodnocovací periody. Pro kapacity 2,1 Ah až 3 Ah a periodu vyhodnocování 1s je vhodný poměr (N) 30 až 40. Aby byl tento algoritmus úplný pro nabíjení Li-Ion baterií, je zapotřebí jej doplnit vyhodnocením velikosti proudu menším než například 400 mA v druhé fázi nabíjení, kdy je dosaženo konečného napětí. Reálné chování algoritmu je na obr. 6.3.3.2, kde je kompletní napěťový a proudový průběh nabíjení z velké části vybité baterie. Jsou zde obě fáze proudová a napěťová s typickým exponenciálním průběhem proudu. Kvalitu regulace druhé fáze je možné

klasifikovat podle rovnoměrnosti a pravidelnosti snižování proudu. U některých variant nabíjecích zařízení se objevují velké proudové skoky, které nemají vliv na kvalitu nabíjení, ovšem prodlužují druhou fázi.



Obr. 6.3.3.2 Průběh napětí a proudu kompletního nabíjecího procesu vybité Li-Ion baterie.

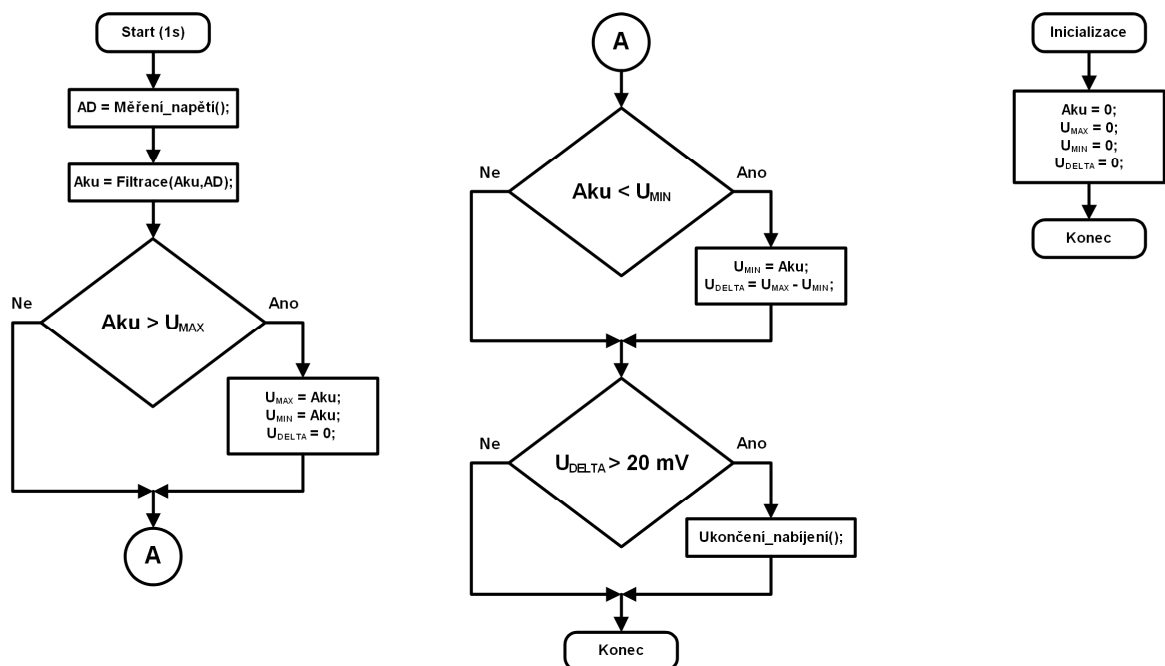


Obr. 6.3.3.3 Průběh napětí a proudu nabíjecího procesu téměř plné Li-Ion baterie

Chování této algoritmu, ovšem s téměř nabitou baterií je na obr. 6.3.3.3, kde pozvolný nárůst proudu ještě nedosáhne maximální hodnoty a již regulace plynule přejde do druhé fáze a záhy je nabíjecí proces ukončen.

6.3.4 Detekce poklesu napětí

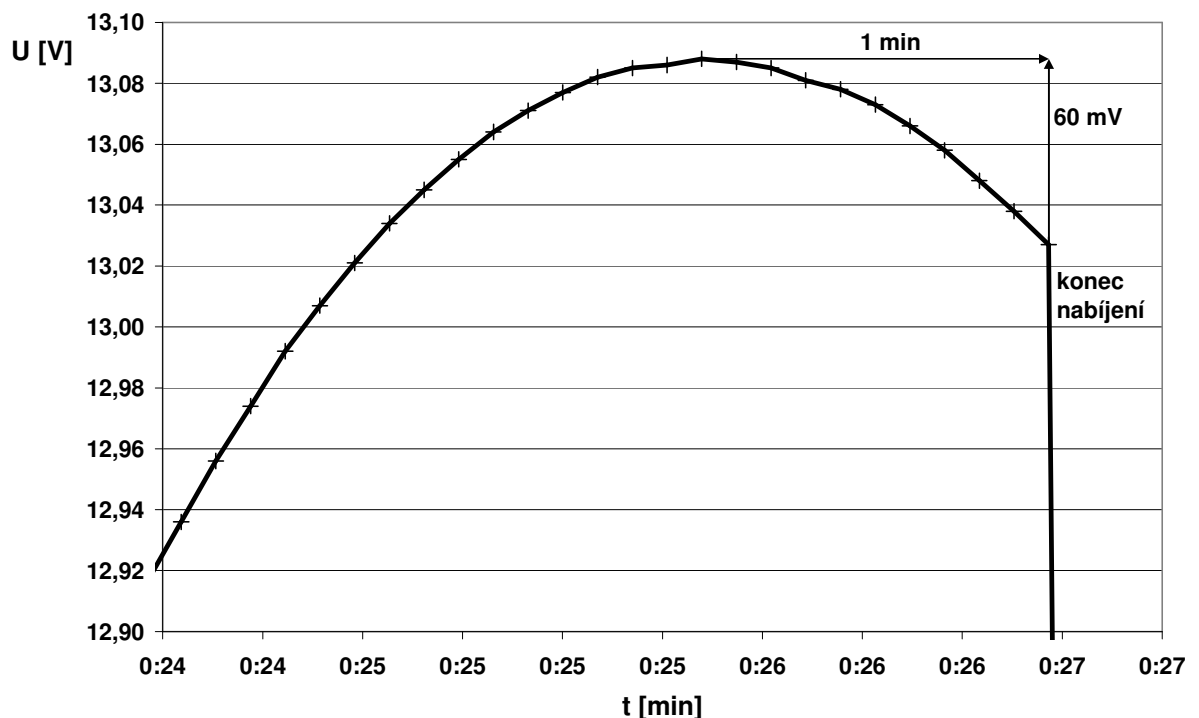
Detekce poklesu napětí je důležitá pro ukončení nabíjení metodou $-\Delta V$. Její aplikace není složitá, ale svým principem jde o velmi citlivé chování, s nímž je nutné počítat a zamezit předčasnému vyhodnocení a ukončení nabíjecího procesu ještě před plným nabitím baterie. Metoda $-\Delta V$ je určena pro NiCd a NiMH články, sledovaný efekt poklesu napětí vyžaduje rychlé nabíjení (alespoň $1 I_t$). Charakteristický pokles pro správnou detekci u NiCd je 20 mV na článek, ovšem technologie NiMH, jež se v současné době převážně využívá, má sledovaný efekt méně výrazný. Správná detekce u NiMH se uvádí 5 mV na článek, která může být negativně ovlivněna teplotou a nižší rychlostí nabíjení.



Obr. 6.3.4.1 Algoritmus detekující pokles napětí pro ukončení nabíjení NiCd článků

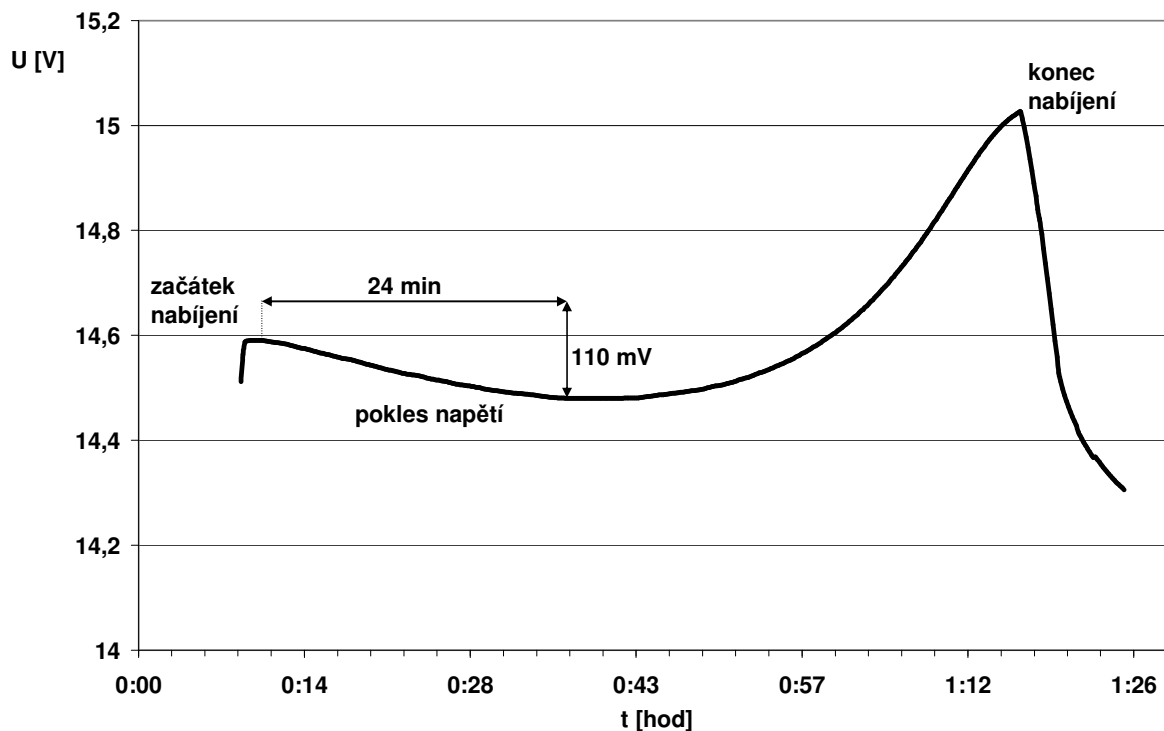
Na obrázku 6.3.4.1 je algoritmus, jenž detekuje pokles napětí. Vstupní informací je měřené napětí, které je filtrováno alespoň filtrem 4. řádu. Filtr snižuje vliv rušení nebo kolísání vstupního napětí, při němž může měnič snížit přenášený výkon a nastane krátkodobý propad vnitřního napětí dobíjené baterie. Obecně je tato metoda na podobné rušivé a přechodové děje

velmi citlivá. Výstupní proměnná filtru (A_{ku}) se dále porovnává s pomocnými proměnnými U_{MIN} a U_{MAX} . Dosáhne-li A_{ku} větší hodnoty než je U_{MAX} , nastaví se obě proměnné U_{MIN} a U_{MAX} na A_{ku} a U_{DELTA} na nulu, což se opakuje, dokud napětí baterie roste. Začne-li klesat, nejnižší hodnota A_{ku} se ukládá do U_{MIN} a vypočítává se aktuální napěťový pokles U_{DELTA} . Přesáhne-li U_{DELTA} požadovaného poklesu, nabíjení se ukončí. V praxi se reakce na dostatečně velkou deltu ještě zpožďuje o 5 s až 10 s, což má předcházet reakci na nestandardní děje. Nabíjecí charakteristika NiCd je zobrazena na obr. 6.3.4.2. Sledovaný pokles signalizující stupeň nabití okolo 90 % je poměrně rychlý.



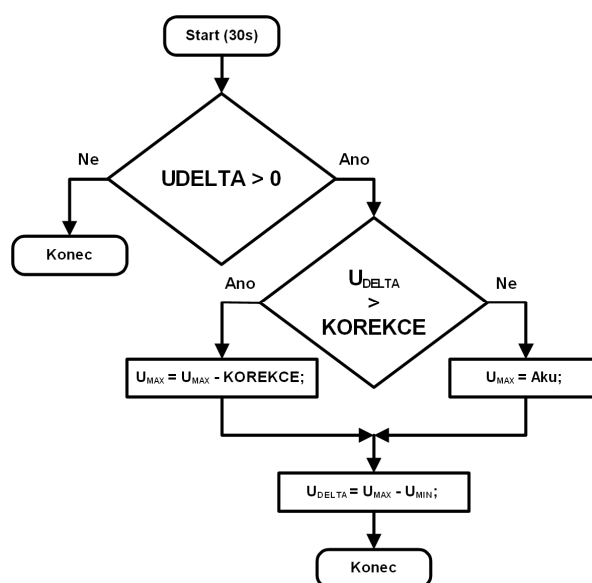
Obr. 6.3.4.2 Závěr nabíjecí charakteristiky NiCd baterie s poklesem $-\Delta V$

Kromě okolních negativních vlivů, které mohou způsobit předčasnou detekci, existuje u NiMH článků velkých kapacit negativní chování v průběhu nabíjení projevující se velmi pomalým, ale hlubokým poklesem napětí. Tento pokles napětí, obr. 6.3.4.3., je tím větší, čím delší je její skladování nebo nepoužívání. Při tomto negativním jevu výše uvedený algoritmus reaguje předčasně a bez dalších úprav je neschopen správné činnosti. Způsobů, jak zabránit předčasnému ukončení, je více. Některé algoritmy před detekcí poklesu nejprve čekají až nastane inflexní bod napětí na vzrůstající části druhého vrcholu, to ale přináší další potíže. Jednodušší je využít fakt, že tento efekt je vůči sledovanému poklesu $-\Delta V$ pomalý. Lze tedy původní algoritmus doplnit o korekci negativního jevu, která je prováděná například po 30 vteřinách, viz obrázek 6.3.4.4.



Obr. 6.3.4.3 Nabíjecí charakteristika NiMH baterie s negativním poklesem napětí během nabíjecího procesu umocněným dlouhodobým skladováním

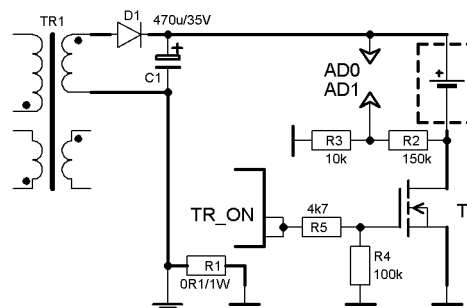
Princip spočívá v odečtení určité konstanty od maximální hodnoty, je-li nějaká delta detekována. Zároveň se vypočte nová hodnota. Občasným snížením maximální hodnoty U_{MAX} , o díl větší než nejhorší možný negativní projev, se během nabíjení udržuje U_{DELTA} na malé úrovni. S touto korekcí je ovlivňována detekce skutečného poklesu signalizujícího plné dobití baterie, a proto je třeba zvýšit citlivost na velikost detekovaného poklesu.



Obr. 6.3.4.4 Algoritmus korigující negativní pokles napětí během nabíjení NiMH baterie

6.3.5 Detekce vložené baterie a ochrana před přepólováním

Detekce vložené baterie probíhá na základě vyhodnocení velikosti napětí, kódového rezistoru, termistoru nebo úspěšného navázání sériové komunikace s baterií. Za předpokladu, že výstupní část není vybavena připojovacím tranzistorem nebo je umístěn v kladné větvi, potom po úspěšné detekci a správném napětí baterie je tranzistor sepnut a může začít nabíjecí proces. Je-li připojovací tranzistor umístěn v záporné větvi za snímacím rezistorem, není možné detekci baterie provést na základě vnitřního vybavení baterie. Před připojením baterie tranzistorem je nezbytné rozpoznat vloženou a správně orientovanou baterii.

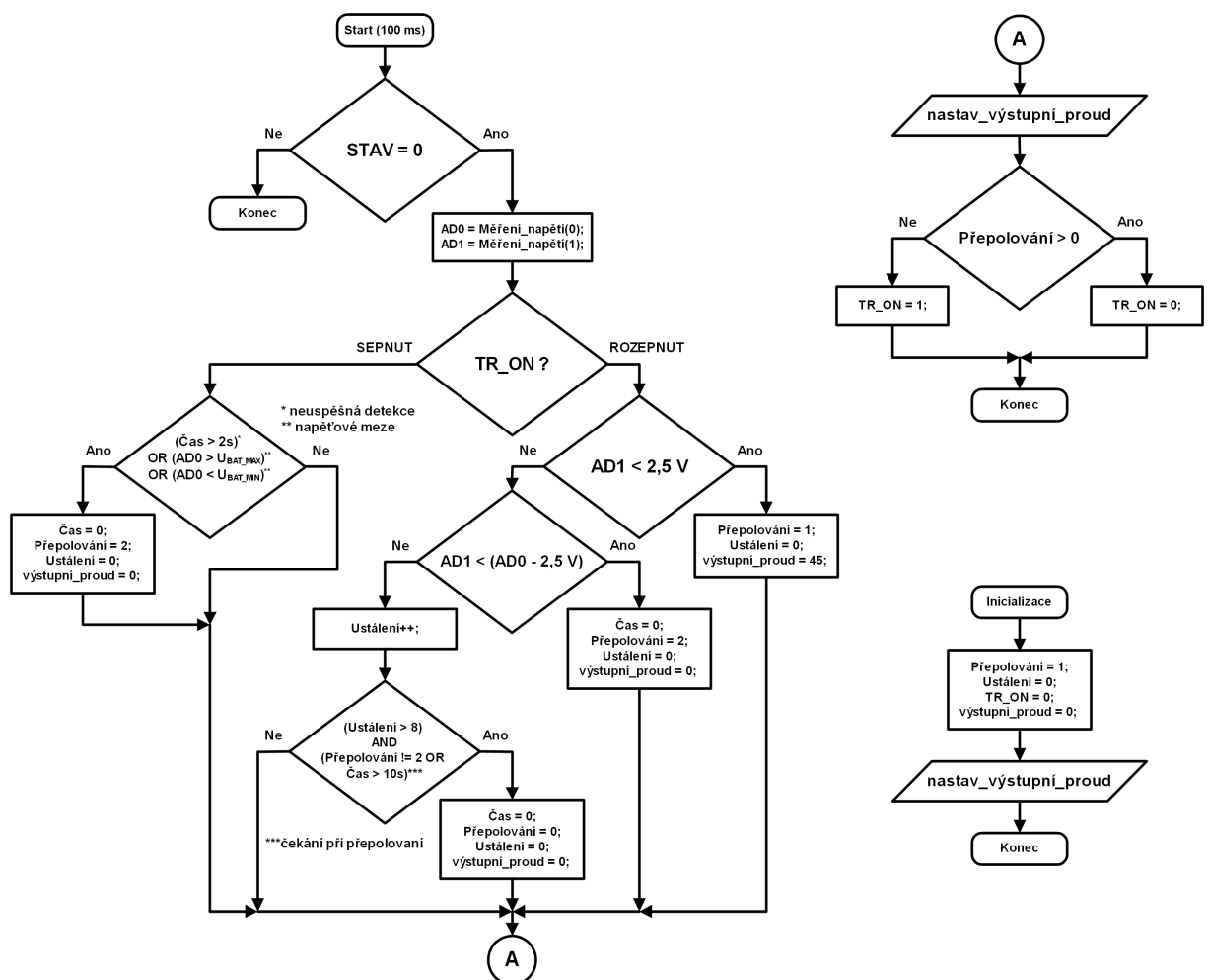


Obr. 6.3.5.1 Připojovací tranzistor N-MOSFET v záporné větvi za snímacím rezistorem

Na obrázku 6.3.5.1 je znovu uvedeno ochranné zapojení z kapitoly 5.5. Jelikož se při rozepnutém tranzistoru T1 nulový potenciál baterie pohybuje oproti vztažnému potenciálu procesoru o několik jednotek nebo desítek voltů výše, jak při správně, tak při opačně vložené baterii, řídí se ochranný algoritmus ovládající připojovací tranzistor pouze napětími AD0 a AD1. Aby bylo možné rychle vyhodnotit situaci je měnič aktivován a proudový regulátor nastaven na detekční proud o hodnotě 45 mA. To je záměrně malá hodnota proudu, jež při rozepnutém připojovacím tranzistoru způsobuje, že je výstupní napětí AD0 na maximálním napětí, kupříkladu 30 V. Není-li baterie přítomna, napětí AD1 na připojovacím tranzistoru je nulové. Připojí-li se baterie správně orientovaná, napětí AD1 je nižší než AD0 a zároveň vyšší než 2,5 V, pokud předpokládáme podporované baterie se jmenovitým napětím do 24 V. Opačně vložená baterie způsobí, že napětí AD1 je o napětí baterie vyšší než AD0.

Na obrázku 6.3.5.2 je ochranný algoritmus, jenž ovládá připojovací tranzistor. Jeho vyhodnocování je rychlejší (100 ms) než u nabíjecího algoritmu, aby ochranná procedura nezpožďovala začátek nabíjení. Algoritmus je podmíněn nulovým stavem nabíječky, což značí, že nabíjecí zařízení je bez vložené baterie. Z nulového stavu se po sepnutí připojovacího tranzistoru detekcí vnitřního vybavení baterie přejde do jiného stavu. Ovšem

kdyby tato situace nenastala, což je možné při poškození nebo neúplném vložení baterie, po určitém čase se tranzistor opět rozezne, aby bylo nabíjecí zařízení chráněno. Proměnná *Čas* se automaticky inkrementuje každou vteřinu a používá se k časově závislým reakcím v celém nabíjecím zařízení. Ochranný algoritmus využívá dvě proměnné: *Přepólování*, pro informaci o stavu ochrany a *Ustálení*, pro pozdržení reakce. Jak již bylo řečeno, pokud je tranzistor rozeznut, kontroluje se, zda je napětí AD1 větší než 2,5 V. Pokud není, značí to nepřítomnost baterie anebo baterii s vysokým napětím, což je také nežádoucí stav, označuje se *Přepólování* = 1. Je-li napětí AD1 větší, kontroluje se dále velikost rozdílem obou napětí AD0 a AD1.



Obr. 6.3.5.2 Algoritmus ochrany výstupní části nabíjecího zařízení před přepólováním, s N-MOSFET tranzistorem v záporné větvi za snímacím rezistorem

V případě, že má připojená baterie napětí alespoň 2,5 V a dojde-li k vyhodnocení totožné situace několikrát za sebou, je stav označen *Přepólování* = 0. Pokud je napětí baterie menší než 2,5 V nebo záporné, stav je označen *Přepólování* = 2 a zároveň je uživateli tento stav přepólované baterie signalizován. Po kontrole napětí se nastaví výstupní proud a podle stavu

Přepólování se sepne nebo rozezne připojovací tranzistor. Situace při vkládání je problematická, poněvadž sled připojovaných kontaktů nemusí být definovaný, záleží na uživateli, jak rychle a správně baterii vkládá. Algoritmus musí předpokládat, že situace se může měnit a musí být schopen reagovat na správné a opačné vložení rychleji, než sama obsluha. Situace při rozpojeném tranzistoru je přehlednější, než když je tranzistor sepnut, protože se výstupní napětí po vyjmutí baterie mění pomalu díky výstupnímu kondenzátoru.

6.3.6 Detekce poškozené baterie

Detekce poškozené baterie se provádí z důvodů zabránění nabíjení takovéto baterie a podání informace uživateli. Nejčastěji baterie ztratí svoji kapacitu během dlouhodobého používání, což může být uspíšeno nešetrným provozem, především přebíjením, hlubokým vybitím a následným skladováním nebo přetěžováním. Snižování kapacity se u všech článků vyvíjí shodně a uživatel může baterii stále provozovat jen po kratší čas a s omezeným maximálním výkonem. Jelikož se baterie stále jeví jako nepoškozená, jen s nižší kapacitou, vyřazení provádí sám uživatel. Je-li do sestavy zařazen odlišný článek s nižší kapacitou nebo výkonnostní dispozicí, je tento během provozu více namáhán, a tím se jeho parametry zhoršují. Zvláště u velkého počtu sériově řazených článků v baterii je jeden článek namáhán, aniž by příliš ovlivňoval práci s baterií. Tento případ uživatel neodhalí anebo až příliš pozdě. Jeden poškozený článek se může při zátěži nebo při nabíjení výrazně zahřívat, a tak způsobit explozi, uvolnění plynu nebo další poškození sestavy. Je-li jeden článek výrazně poškozen, je možné jej detekovat a zabránit nabíjení.

Detekce podle napětí

Neklamnou známkou, že není baterie v pořádku, je nízké napětí baterie. Li-Ion články mající napětí nižší než 2,5 V na článek, ztrácejí zcela schopnost akumulovat energii. Nabíjení Li-Ion baterie se podmiňuje napětím vyšším než 2,7 V na článek. NiCd nebo NiMH mohou hluboké vybití krátkou dobu snést bez většího zhoršení parametrů, ovšem je potřeba co nejdříve zahájit nabíjení. Jelikož technologie NiCd a NiMH není vždy vybavena informací o počtu článků, napětí pro spuštění musí být vyšší než 3 V.

Především u technologie NiCd a NiMH je často používané přednabíjení, označované také jako formování. Spuštění formování je podmíněno malým, ale ne zase příliš nízkým napětím, které svědčí o hluboce vybité baterii. Formování má za úkol malým proudem přivést baterii

do stavu s dostatečně velkým napětím, například 10 V. Během formování je baterie sledována, zda nevykazuje známky poškození. Malý proud se volí proto, aby se chemické procesy hluboce vybité baterie dostaly (zformovaly) šetrně do stavu, v němž se bude moci pokračovat rychlým nabíjením. Stejný proces je používán u Li-Ion článků od 2,7 V do 3 V. Přednabíjení je časově omezeno. Nedojde-li po určité době k dosažení napětí potřebného k zahájení rychlého nabíjení, formování se ukončí a signalizuje se poškozená baterie.

Napětí lze zkoumat také dynamicky při nabíjecím procesu. Zpočátku nabíjení se vždy napětí baterie prudce zvýší. I přesto lze stanovit maximální napěťový skok, nejde-li o přednabíjení, nebo o rychlé nabíjení během 10 s až 30 s po zahájení nabíjení. Stejně tak nesmí napětí přesáhnout maximální hodnotu, která je pro NiCd a NiMH 1,5 V na článek. Po ukončení nabíjecího procesu napětí baterie rychle klesá. Ovšem příliš velký propad napětí mezi hodnotou při nabíjení a po 1 minutě ustálení značí poškozené články.

Detekce podle vnitřního odporu

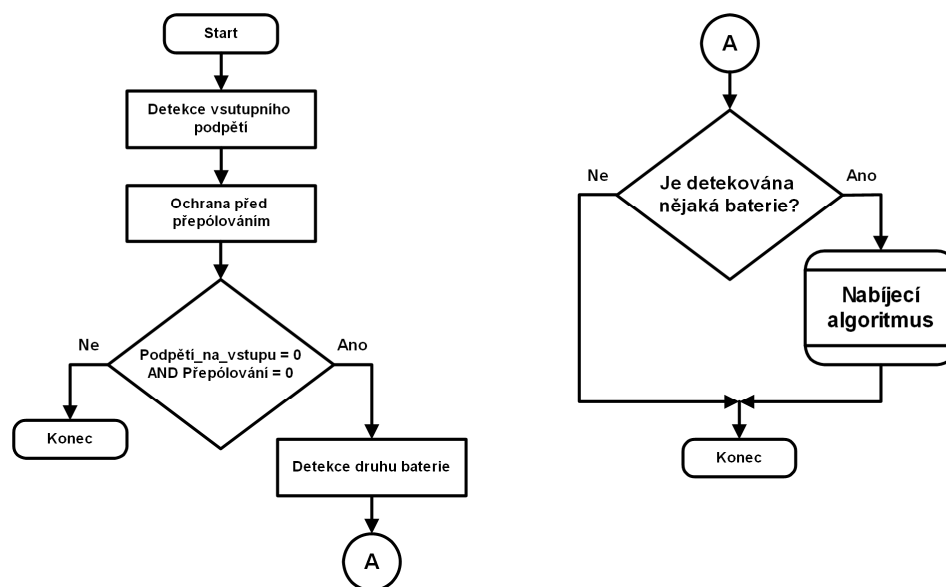
Nejvíce vypovídajícím údajem o stavu baterie je její vnitřní odpor. Jeho zvýšení nad určitou mez, od 100 mΩ do 1 Ω, je spolehlivý důkaz vážného poškození nebo ztráty velké části kapacity. Vnitřní odpor je vhodné měřit až po ustálení napětí, po 10 s až 30 s. Určení vnitřního odporu R_{IN} vyžaduje hodnotu napětí U_{I_NAB} při nabíjecím proudu I_{NAB} a bez nabíjecího proudu U_{I_0} , viz vzorec (6.3.6).

$$R_{IN} = \frac{U_{I_NAB} - U_{I_0}}{I_{NAB}} \quad (6.3.6)$$

Obě naměřené hodnoty napětí lze získat, pracuje-li nabíjecí zařízení v přerušovaném režimu. V případě, že nabíjecí zařízení neměří v bezproudovém stavu, je možné provést měření samostatnou rutinou, ovšem je třeba měření provést rychle, aby přerušení nenavodilo falešné vyhodnocení $-\Delta V$ u NiCd nebo NiMH baterií. Mez vnitřního odporu není nutné nastavovat příliš přísně, protože parametry baterie jsou závislé na mnoha vlivech. Použitým způsobem se změří nejenom vnitřní odpor, ale také odpory přívodních vodičů a přechodové odpory kontaktů, jež také nejsou zanedbatelné a jsou rovněž závislé na okolních podmínkách.

6.4 Aplikace elementárních algoritmů pro různé druhy článků

Předchozí kapitola se zabývala základními znalostmi regulace a detekce během nabíjecího procesu. Tyto algoritmy lze aplikovat s drobnými úpravami na libovolně složité požadované chování nabíjecího zařízení. Tvoření větších částí programu jednoduchých algoritmů by mělo opět dodržovat pravidla přehledného a modulárního diagramu. Právě kvůli přehlednosti je vhodné rozčlenit celý program na co nejmenší části a tyto potom poskládat do větších celků s hierarchickou strukturou. Programové vybavení nabíjecího zařízení obsahuje především nabíjecí algoritmy, ovšem mnohem důležitější jsou části ochranné a kontrolní. Právě části, jež jsou spíše podpůrné pro nabíjecí proces, mají vyšší prioritu. Jak je zobrazeno na obr. 6.4.1, samotný nabíjecí algoritmus je až posledním článkem, kterému předchází měření, v základní kontrolní smyčce programu, viz obr. 6.1.1. Je-li výstupní část nabíjecího zařízení chráněna připojovacím tranzistorem, stává se detekce vložení baterie a ochrana před přepólováním prioritní. Stejně důležitá je kontrola velikosti vstupního napětí v případě napájení z palubní sítě automobilu. Poslední, ale také velmi důležitou částí, je detekce druhu baterie a počtu článků, jež se vykonává při každé vyhodnocovací periodě a má možnost přejít kdykoli do stavu 0.

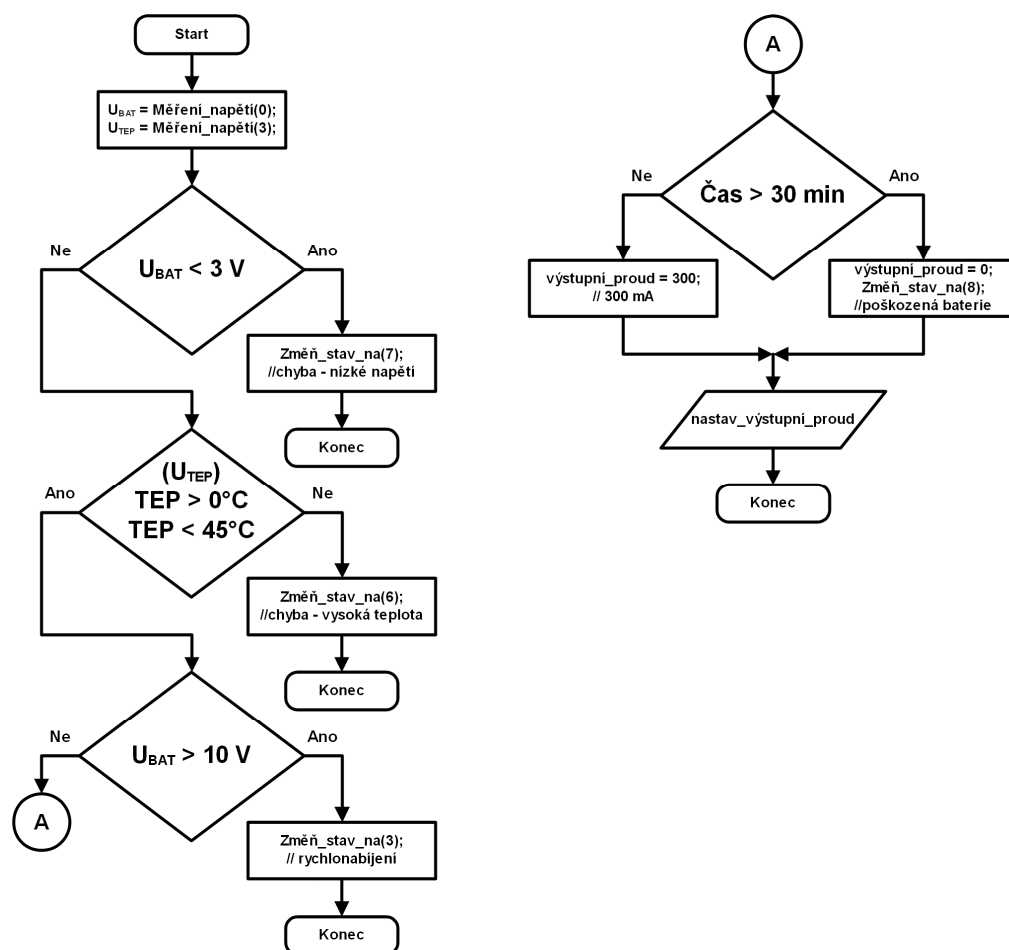


Obr. 6.4.1 Základní kontrolní smyčka programu

Nabíjecí algoritmus je založen na stavovém chování, viz obr. 6.1.2, kromě stavu 0 jsou ostatní stavy nabíjecího zařízení závislé na vývoji nabíjecího procesu konkrétního druhu baterie.

Přednabíjení

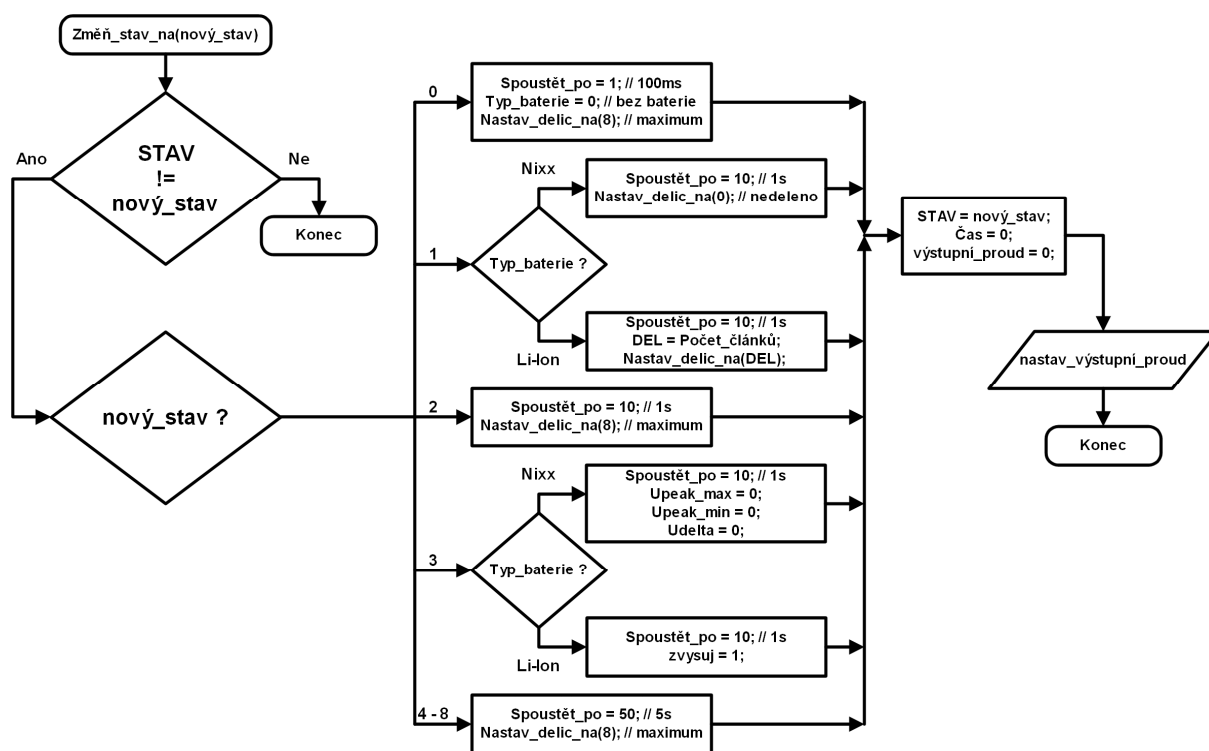
O přednabíjení se částečně zmiňuje předchozí kapitola 6.3.6 ve spojitosti s hluboce vybitou nebo poškozenou baterií. Tento proces je možné aplikovat pro všechny druhy článků, ale při běžném používání baterie se automaticky přejde na rychlé nabíjení stav 3, jelikož napětí baterie je dostatečné velké. Na obrázku 6.4.2. je zobrazen algoritmus přednabíjení Nixx článků. Úkolem je zvýšit napětí baterie, je-li nízké, na úroveň dostačující pro zahájení rychlého nabíjení. Je-li napětí nižší než například 3 V, přednabíjení se nezahájí a rovnou se přechází do stavu 7, který značí nízké napětí baterie a tedy její závažný stav bránící nabíjecí činnosti. Kontroluje se také vhodná teplota ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $45\text{ }^{\circ}\text{C}$) pro zahájení nabíjení, je-li nepříznivá, přechází se do chybového stavu 6, kde se vyčkává na příznivou teplotu. Pokud se během přednabíjení dosáhne požadovaného napětí baterie, například 10 V, přechází se do stavu 3 rychlé nabíjení. Pokud se ovšem napětí nezvýší na požadovanou mez do 30 minut, nastaví se nulový proud a přejde se do stavu 8 poškozené baterie. Po celou dobu přednabíjení se udržuje malý nabíjecí proud 300 mA.



Obr. 6.4.2 Algoritmus přednabíjení baterie Nixx článků

Změna stavu

V předchozím algoritmu se objevovalo několik přechodů mezi stavy nabíjecího zařízení, jež zajišťují návaznost mezi jednotlivými algoritmy. Při změně stavu se nemění pouze proměnná *STAV*, ale zároveň se provádí další řada nastavení, inicializací a také konfigurace procesorového okolí v závislosti na druhu baterie a novém stavu. Změna stavu, a s ní spojené nové nastavení, vychází z konkrétních možností konstrukce nabíjecího zařízení a zvoleného způsobu činnosti jednotlivých stavů. Je velmi výhodné tohoto přechodu využít a zařadit sem nastavení a konfigurace, které se nebudou muset vyskytovat nebo opakovat v algoritmu příslušného stavu. To opět zlepší přehlednost a orientaci v tvořeném kódu. Ukázka změny stavu s nastaveními je na obr. 6.4.3.



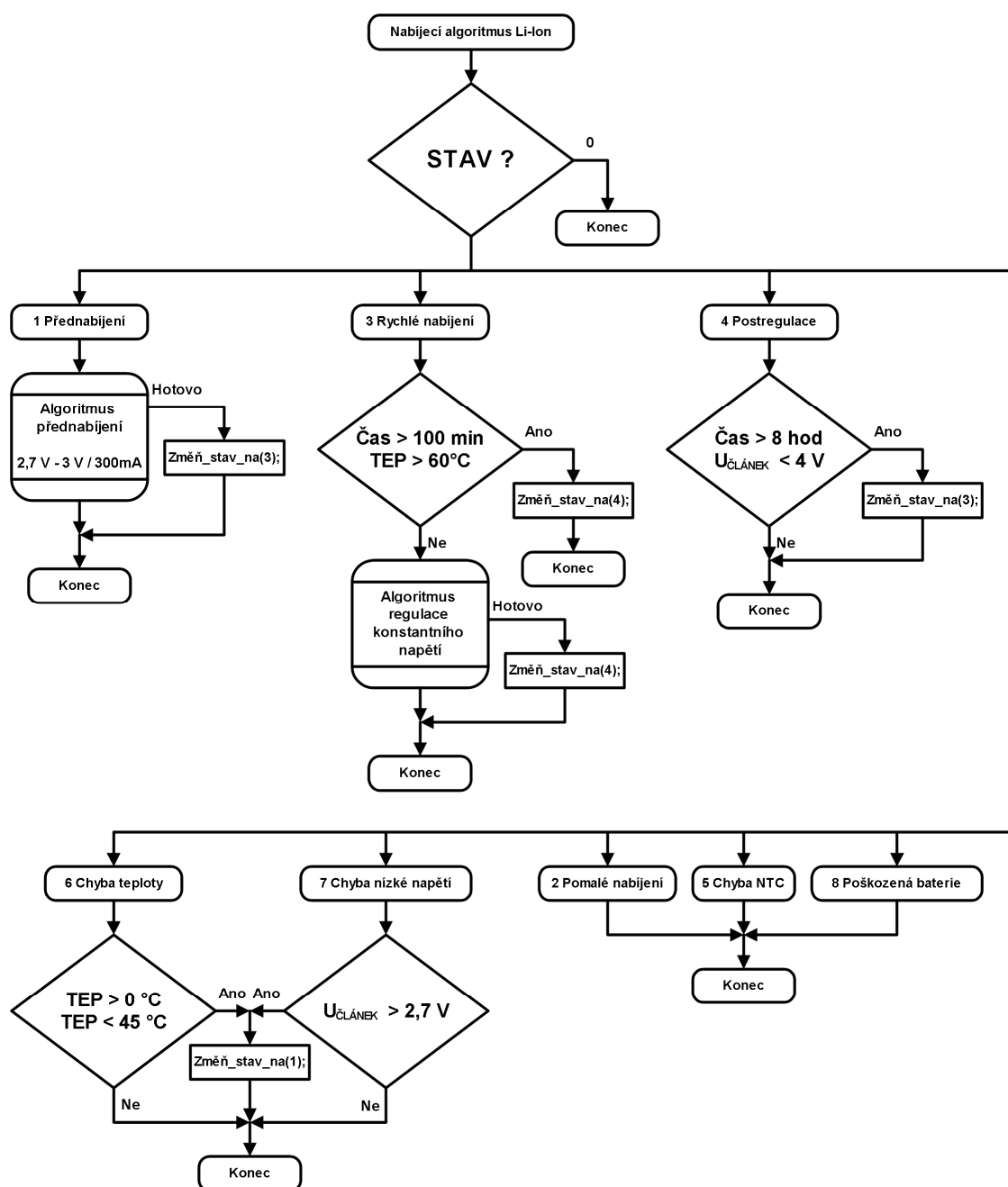
Obr. 6.4.3 Ukázka konkrétních nastavení při změně stavu

Funkce se provádí pouze tehdy, je-li argument *nový_stav* různý od aktuálního stavu, tedy jen v případě pokud se jedná o změnu. Pro požadovaný nový stav se provedou důležitá nastavení a inicializace, jež se mohou lišit podle typu baterie umístěné v nabíjecím zařízení. Jako ukázka konfigurace procesorového okolí je zde úprava napěťového děliče, jež se například pro Li-Ion baterii nastaví podle počtu článků. V jiném případě dle potřeby algoritmu pro daný stav. Je také nastavován čas, po kterém se vyhodnocuje nabíjecí proces, neboť různé stavy vyžadují častější reakci, ale u jiných, například u rychlého nabíjení je zase

časté přerušování nevhodné. Méně důležitých parametrů je mnohem více a závisí na konkrétní funkci navazujících algoritmů. Na závěr se nový stav stane aktuálním a nastaví se nulový proud.

6.4.1 Nabíjecí algoritmus Li-Ion článků

Základní a zároveň nejběžnější způsob nabíjení Li-Ion článků spočívá v regulaci konstantního napětí s omezenou velikostí proudu, viz kapitolu 4.1.



Obr. 6.4.1.1 Nabíjecí algoritmus Li-Ion článků

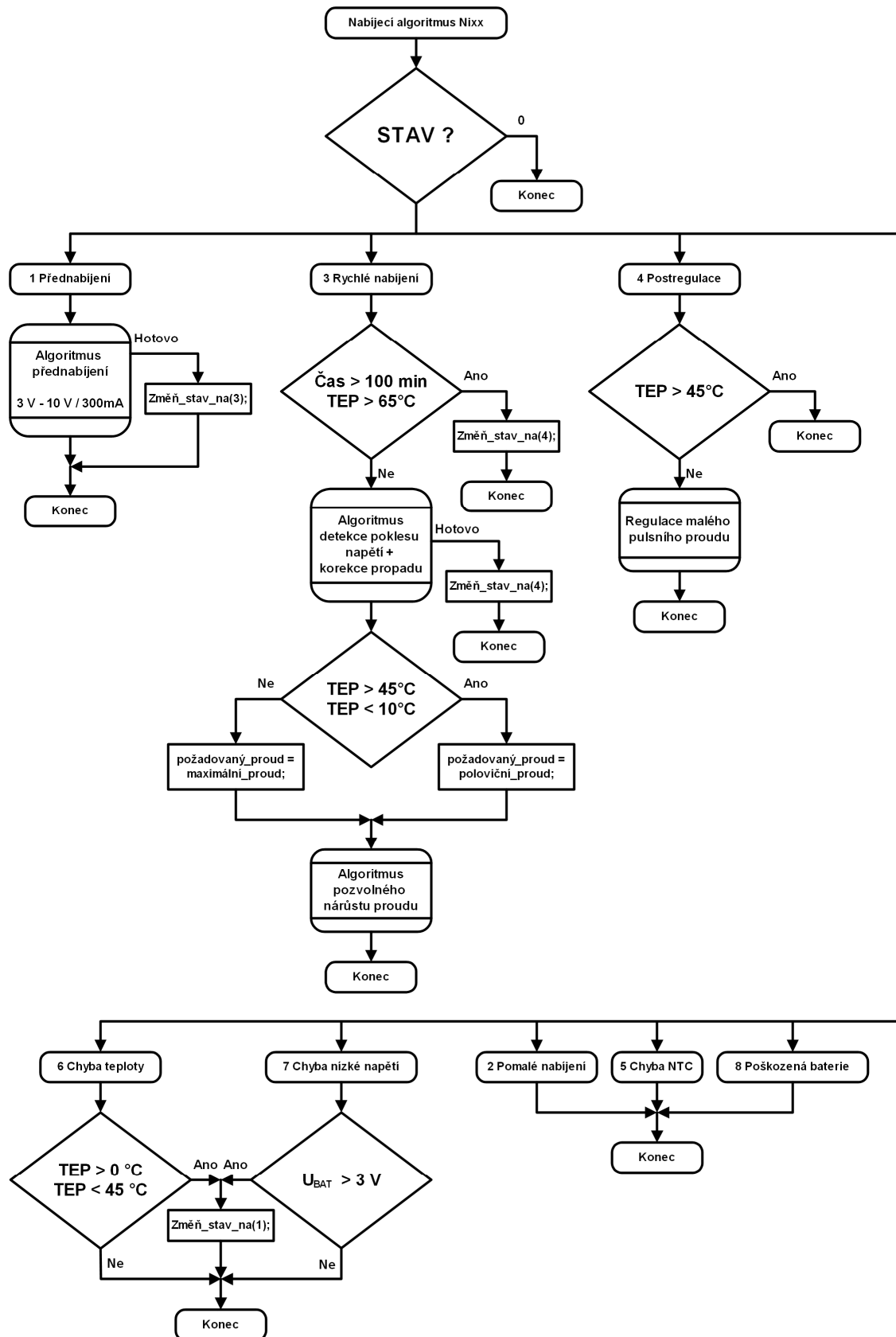
Jak zobrazuje obrázek 6.4.1.1, celý nabíjecí proces se zaměřuje jen na rychlé nabíjení. Přednabíjení je sice přítomno, ale v praxi se využije jen při hlubokém vybití baterie, což je velmi nepravděpodobné vzhledem k vždy přítomné ochranné elektronice instalované v baterii, jež hlubokému vybití zabrání. Čtvrtý stav nabíjení (udržování v nabitém stavu) u Li-Ion nemá nabíjecí funkci, ale jen kontroluje, zda napětí článků nekleslo pod určitou mez, v tom případě je spuštěno rychlé nabíjení. Nelze opominout teplotní a časové limity v jednotlivých stavech nabíjecího zařízení. Stav, který se ve stavovém diagramu nevyužívají (2 – pomalé nabíjení) nebo ty, které jsou konečné (5 – chyba NTC, 8 – poškozená baterie), neobsahují žádné změny stavu a jsou ukončeny až při vyjmutí baterie.

6.4.2 Nabíjecí algoritmus Nixx článků

Standardem nabíjení NiCd a NiMH článků je aplikace metody $-\Delta V$ v kombinaci s kontrolou teploty baterie. Velkým nedostatkem současných bateriových sestav je chlazení, což neumožňuje příliš rychlé nabíjení. Při nabíjení zcela vybité baterie při pokojové teplotě je nabíjecí proces předčasně ukončen kvůli přehřátí baterie na hodnotách 70 % až 80 % její nabitě kapacity.

Na obrázku 6.4.2.1 je zobrazen nabíjecí algoritmus NiCd a NiMH článků. Přednabíjení je zde oproti technologii Li-Ion nutností, neboť v praxi může hluboké vybití baterie nastat. Pokud se šetrně zformuje chemické složení baterie, nemusí být její parametry tímto stavem příliš ovlivněny. Bohužel tato záležitost nelze v případě univerzální nabíječky s možností nabíjení baterií o různém počtu článků, které nemají kódové rozlišení, optimalizovat pro všechny podporované sestavy. Rychlé nabíjení je omezeno maximální teplotou baterie a případným ukončením. Hlavní metodou ukončení je detekce poklesu napětí $-\Delta V$, viz kapitolu 6.3.4, doplněná o korekci propadu napětí, především u NiMH článků. Regulace nabíjecího proudu je řízena algoritmem pozvolného nárůstu proudu, viz kapitolu 6.3.1, kdy je požadovaný proud měněn podle teploty baterie. Teplota vyšší než 45 °C vyžaduje snížení proudu, aby nedošlo k přehřátí a předčasnému ukončení nabíjení. V praxi je nutné doplnit vyhodnocení teploty o malou hysterezní konstantu, aby nenastalo díky rušení více změn rychle po sobě. Posledním typickým stavem dobíjení Nixx je kapkové dobíjení. To je opět podmíněno maximální velikostí teploty, která je po rychlém nabíjení vysoká a trvá desítky minut, než klesne na přípustnou úroveň. Kapkové dobíjení řídí algoritmus pulsního proudu,

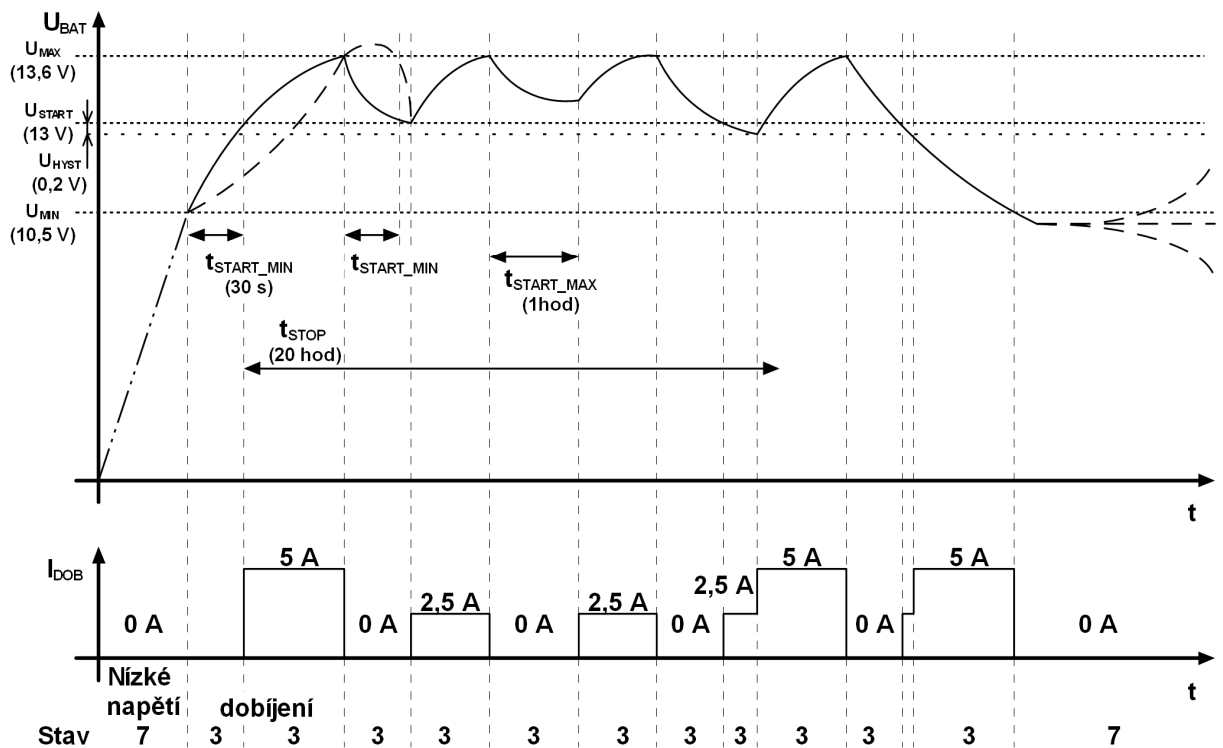
viz kapitolu 6.3.2. Chybové a nepoužité stavy jsou řešeny obdobně jako u nabíjecího procesu Li-Ion.



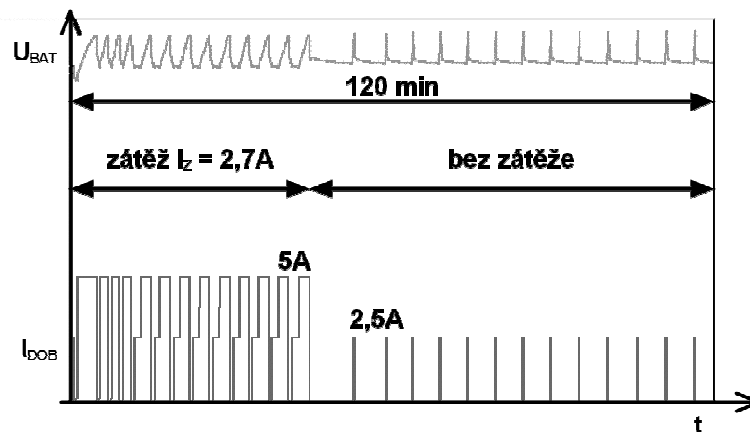
Obr. 6.4.2.1 Nabíjecí algoritmus Nixx článků

Olověné baterie nejsou využívány v aplikacích pro ruční nářadí, protože jsou příliš těžké a jejich nabíjení je výrazně delší než u technologií Li-Ion nebo NiMH. Nabíjecí zařízení se používá k nabíjení olověných baterií v aplikacích spojených se záložními systémy nebo malými vozítky. Následující algoritmus slouží pro ukázkou aplikace nabíjecího zařízení i v jiných oblastech použití.

Na obrázku 6.4.3.1 je nabíjecí algoritmus olověných článků s hodnotami napětí pro 12 V baterii. Algoritmus je navržen pro nabíjení baterií velkých kapacit v záložním provozu, kde je potřeba trvale udržovat baterii v nabitém stavu. Jedná se o rychlé nabíjení doplněné o přednabíjení, které je však v provozu značně nepravděpodobné. Rychlé nabíjení je rozděleno do tří fází, indexovaných proměnnou *Průběh*. Aktuální fáze určuje velikost dobíjecího proudu takto: fáze 0: 0 A (bez proudu), fáze 1: 5 A (maximální proud), fáze 2: 2,5 A (poloviční proud). Přechody mezi jednotlivými fázemi jsou závislé na třech napěťových úrovních a čase. Přesněji řečeno, do aktivní fáze (1 a 2) se může přejít, pokud je napětí baterie větší než minimální napětí (10,5 V), ovšem nejdříve po 30 s a nejpozději po 1 hodině setrvání ve fázi 0. Přechod do aktivní fáze je také závislý na velikosti napětí, jež musí být menší než $U_{START} = 13 \text{ V}$ pro přechod do fáze 2 a je-li ještě napětí menší než $(U_{START} - U_{HYST}) = 12,8 \text{ V}$ přechází se do fáze 1, stejně jako když napětí poklesne pod tuto hodnotu během probíhající fáze 2. Ukončení aktivní fáze nastává po překročení maximálního napětí $U_{MAX} = 13,8 \text{ V}$.



Obr. 6.4.3.2 Grafické zobrazení chování nabíjecího algoritmu olověných článků



Obr. 6.4.3.3 Chování nabíjecího algoritmu olověných článků při zatížení a bez zátěže

Grafické zobrazení různých případů napěťového a časového průběhu během nabíjení je na obr. 6.4.3.2. Skutečný průběh napětí a proudu při zatížení a bez zátěže je zobrazen na obr. 6.4.3.3. Jak je patrné z průběhů, algoritmus pracuje v pulsním režimu, kdy velikost proudu a četnost nabíjecích pulsů závisí na odebíraném proudu z baterie. Pulsní proud je výhodný z hlediska vyšší účinnosti nabíjecího zařízení a zároveň nezpůsobuje zhoršování parametrů baterie, jako je tomu u kontinuálního nabíjení s konstantním napětím. Algoritmus je také doplněn o kontrolu doby v aktivní fázi, jež nesmí přesáhnout 20 hodin, což je známkou poškozené baterie. Algoritmus nevyhodnocuje teplotu baterie, poněvadž není k dispozici. Doplnění o kontrolu teploty by bylo podobné jako u předchozích algoritmů Li-Ion a Nixx článků.

6.5 Aplikace algoritmů pro více druhů článků

Je-li požadováno, aby nabíjecí zařízení bylo schopné pracovat s různými bateriovými sestavami, je nutné program vhodně upravit. Úpravy by neměly zhoršit přehlednost programu a ani příliš paměťovou náročnost. Nabíjení různých sestav musí konstrukce nabíjecího zařízení umožňovat a zároveň by se ovládání procesorového okolí nemělo příliš zkomplikovat. Takovéto nabíjecí systémy jsou označovány přízviskem univerzální, což má vliv na jejich obvodovou složitost a také na programovou náročnost oproti jednocelovým nabíjecím zařízením.

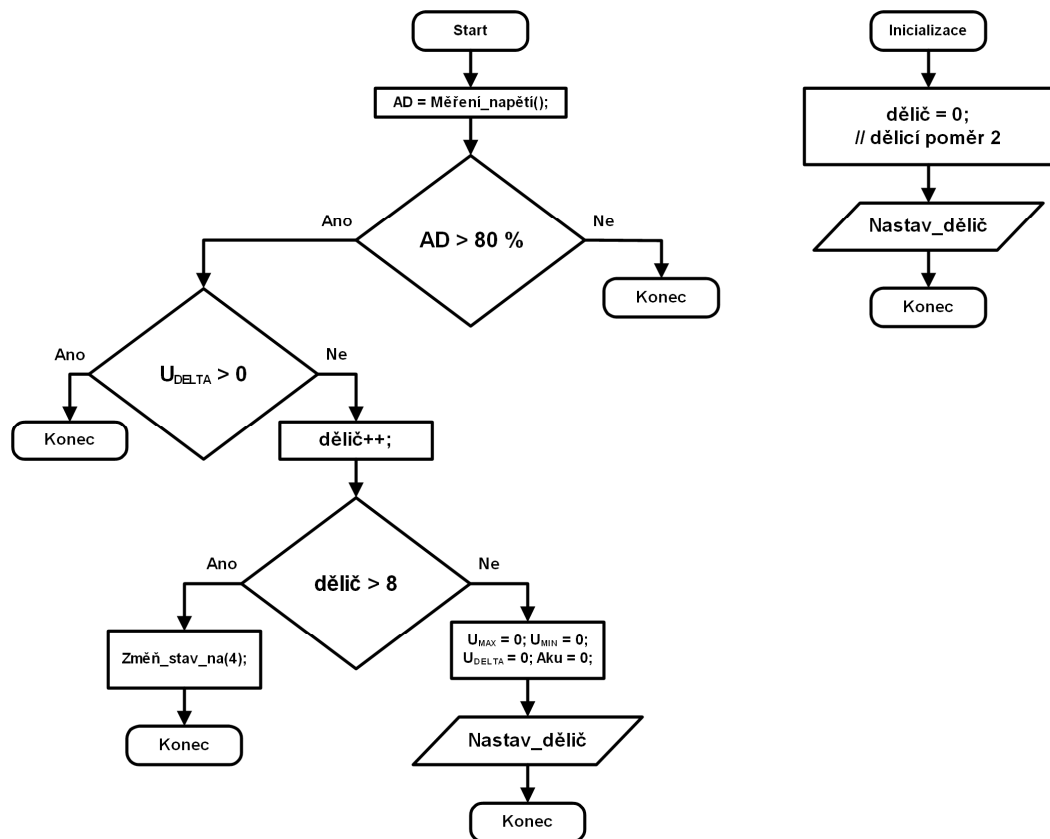
Větší počet článků

Bateriové sestavy jednoho výrobce mají většinou několik provedení s různými kapacitami a nominálním napětím. Pochopitelným cílem je univerzální nabíjecí zařízení, které je schopno nabíjet všechny sestavy, nebo alespoň početnou množinu sestav určených pro stejnou aplikaci nebo trh v dané zemi.

U technologie Nixx je zpravidla rozsah článků velmi široký (6 – 14 článků). Navíc není počet znám, jelikož identifikace kódovým rezistorem udává jen druh článku. Jak již bylo zmíněno, z důvodu velkého rozsahu jmenovitých napětí podporovaných sestav není přednabíjení (formování) optimální pro všechny sestavy, zvláště ty s větším počtem článků není možné správně formovat, protože napěťová úroveň konce formování je vyšší než maximální napětí sestavy s nejmenším počtem článků.

Jiný problém nastává u detekce $-\Delta V$, neboť napětí se mění v širokém rozsahu, tudíž se mění i citlivost a poměr měřeného napětí na článek, což ovlivňuje velikost detekovaného poklesu. Toto lze řešit programově, budeme-li podle aktuálního napětí stanovovat počet článků a měřená data tímto počtem normovat, ovšem s menší citlivostí pro sestavy s malým počtem článků. Kombinace programové a obvodové úpravy zaručí velkou citlivost pro všechny články a nezávislost algoritmu na jejich počtu. Obvodová část využívá lineární napěťový dělič, jenž se před začátkem nabíjecího algoritmu nastaví na nejmenší poměr a při vzrůstajícím napětí svůj poměr zvyšuje.

Na obrázku 6.5.1 je zobrazen algoritmus upravující napěťový poměr spolupracující s metodou ukončení $-\Delta V$, viz obr. 6.3.4.1. Překročí-li napětí hodnotu 80 % z maximálního rozsahu analogově-digitálního převodníku a není-li detekován žádný pokles (U_{DELTA}), zvýší se dělicí poměr. Při úpravě poměru je nutné nastavit důležité proměnné metody $-\Delta V$ na nulu, neboť následující měření bude již s jiným poměrem a nastal by fiktivní pokles napětí. V případě zaznamenání nějakého poklesu se však další zvyšování poměru neprovádí, protože již nehrozí, že se napětí dostane mimo rozsah analogově-digitálního převodníku. Méně pravděpodobná situace může nastat, pokud napětí bude vysoké i při maximálním dělicím poměru, což značí baterii s vyšším jmenovitým napětím, než pro jakou je nabíjecí zařízení konstruováno a přechází se do stavu 4, čímž se nabíjení ukončí. Baterie Li-Ion jsou vždy identifikovány i s počtem článků, a proto se napěťový dělič nastavuje podle počtu článků hned před spuštěním přednabíjení, viz ukázkou změny stavu na obr. 6.4.3.



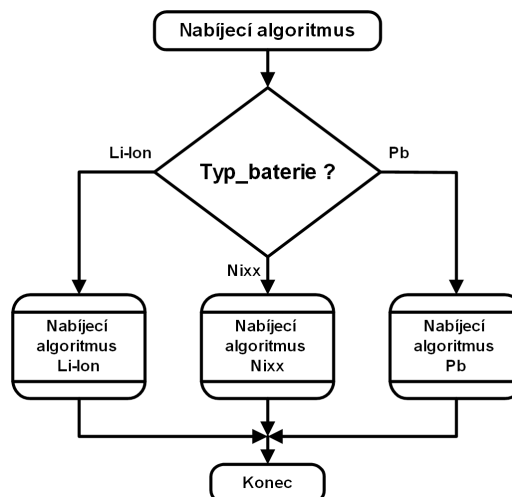
Obr. 6.5.1 algoritmus upravující dělicí poměr při nabíjení Nixx článků

Více druhů článků

Má-li být nabíjecí zařízení schopno nabíjet sestavy s různými druhy článků, musí být tyto baterie od sebe bezpečným způsobem rozlišitelné a nezaměnitelné. Záměna článku Li-Ion za Nixx by mohla takovou baterii vážně poškodit, jelikož je vyhodnocení konce nabíjení odlišné. Pokračováním nabíjení Li-Ion článků nad maximální napětí se značně zhoršují jejich parametry a může dojít i k úplnému zničení. Proto je při kombinaci různých druhů článků kladen důraz na detekci baterie. Je-li identifikace zprostředkovávána skrze sériové rozhraní, chybné určení druhu článku nehrozí. Ovšem u klasické identifikace kódovým rezistorem závisí úspěšnost rozeznání bateriové sestavy především na kvalitě kontaktu. Nastane-li nevodivé spojení na kontaktu kódového rezistoru, jedna z možných variant vnitřního zapojení baterie, je to zaměnitelné se stavem označujícím Nixx baterii, viz kapitolu 4.5. V případě nevodivého spojení kontaktů kódového rezistoru a NTC se jedná o variantu Nixx baterie s rozpojeným termostatem.

Různé druhy článků využívají jiné nabíjecí algoritmy, proto je nezbytné program ve vhodném místě rozvětvit. Na obrázku 6.5.2 je ukázka rozvětvení algoritmů podle druhu článku. Rozvětvení je umístěno v základní kontrolní smyčce programu, obr. 6.4.1, blok

nabíjecí algoritmus. Odlišné části pro jednotlivé algoritmy se vyskytují také ve funkci sloužící ke změně stavu. Jak ukazuje obrázek 6.4.3, nastavení a konfigurace procesorového okolí se při změně stavu provádí jen pro aktuální druh článku.



Obr. 6.5.2 Rozvětvení programu nabíjecích algoritmů podle druhu baterie

6.6 Diagnostické a testovací vybavení

Jak již bylo uvedeno v kapitole 5.6, návrh nabíjecího zařízení zahrnuje také možnosti testování zhotoveného výrobku. Obecně je prvotní testování nákladný proces na testovací přípravek i čas. Jelikož jsou moderní nabíjecí zařízení vybavena procesorem, jenž má zpravidla velké možnosti v konfiguraci svého okolí i široké možnosti v měření elektrických veličin, je výhodné pro testování tyto možnosti využít.

Praxe ukázala, že zařízení zkonstruované podle postupů z kapitoly 7, jež využívá doporučené zapojení, je bez nutnosti konstrukčních změn schopno testování pouze s malým programovým doplňkem. Nezbytným doplňkem je sada kódů přijímaných skrze sériové rozhraní, které procesor přijme a na jejichž základě provede určitou činnost a výsledek odešle. Pro tento účel se režim nabíjecího zařízení rozděluje na „nabíjecí“, kdy se zařízení chová zcela samostatně, a „diagnostický“, kdy se přestane provádět nabíjecí funkce a je možné pomocí kódů libovolně využívat zařízení.

Testovací kódy

Popisované kódy, přestože jich je jen pár, jsou kompletní sadou, jež umožňuje navození jakékoli situace a pokrývá odhalení všech funkčních závad a drtivou většinu výrobních závad

týkajících se neosazení nebo poruchu součástky. Pro komunikaci s procesorem je využito rozhraní USART s přenosovou rychlostí 9600 baudů. Počet přenášených bytů je 4, a to pro příchozí i odchozí zprávu v následujícím tvaru:

kód	D1	D2	CRC
-----	----	----	-----

Tab. 6.6.1 Význam testovacích kódů

Kód	Název	Směr	Popis
0x88	chyba	Odchozí	Chyba se odesílá při neshodě CRC, nesprávném kódu, nesprávném požadavku
0x00	Povolení	Příchozí	Slouží pro zápis do proměnné REZIM v paměti EEPROM, podle které se přepíná mezi nabíjecím (D2 = 0x01) a diagnostickým (D2 ≠ 0x01) režimem, zápis do EEPROM je podmíněn D1 = 0xFF
0x01	Napětí	Příchozí	Měření se nastavuje hodnotou v datech D1 – pin, na kterém se má měřit PCx D2 – počet opakování převodu Správné rozsahy D1 <0 - 7>; D2 <1 - 16>
		Odchozí	Odesílá se naměřené číslo AD D1 = LSB, D2 = MSB Rozdělení čísla D1 = AD%256, D2 = AD>>8 Zpětné sestavení čísla AD = D2*256 + D1
0x02	Proud	Příchozí	Přijmutí proudu většího než nula automaticky povoluje měnič (ne však tranzistor), nulový proud měnič zastavuje PROUD, D1 = LSB, D2 = MSB Max 7000 – hodnota je v mA
0x03	Dělič napětí	Příchozí	Dělicí poměr je nastavován podle D1 <2 - 6>, dělicí poměr je dvojnásobný, Př: 2 je (U _{BAT} /4)
0x04	Tranzistor	Příchozí	Tranzistor se nastavuje posledním bitem D1 Signál je pozitivní – 0x00 vyp., 0x01 zap.
0x05	Led	Příchozí	Led diody jsou na posledních 3 bitech D1 Bit.2 = LED_RED, Bit.1 = LED_RG_GREEN Bit.0 = LED_RG_RED, signál je pozitivní
0x06	Pískání	Příchozí	Pískot se spustí D1 <1 - 2>
0x07	Text verze	Příchozí	Text je umístěn v paměti flash – 80 znaků D1 = 0, D2 = pozice <0-79>
		Odchozí	Odešle se D1 = znak, D2 = přijaté D2 + přijaté D1
	Text ID	Příchozí	Text je umístěn v paměti EEPROM – 40 znaků D1 = 0x80, D2 = pozice <0-39>
		Odchozí	Odešle se D1 = znak, D2 = přijaté D2 + přijaté D1
0x08	Komparátor	Příchozí	Získání informace o stavu komparátoru D1 = 0, D2 = 0
		Odchozí	Log „0“ D1 = 0, Log „1“ D1 = 1, D2 = 0

Soubor testovacích kódů v tabulce 6.6.1 je kompletní pro nabíjecí zařízení popsané v kapitole 7. Implementace protokolu odesílání a příjmu dat do PC aplikace je velmi snadné. Ruční odesílání příkazů se uplatní při vývoji, především během kompenzace proudové zpětné

vazby, kdy lze nastavit libovolný nabíjecí proud bez nutnosti zásahu do obvodové části. Ovšem hlavní využití PC aplikace je odesílání a příjem kódů a jejich porovnání s požadovanými výsledky ze souboru, kterému přísluší konkrétní test funkce nabíjecího zařízení. V tabulce 6.6.2 jsou názvy a popis všech testovaných funkcí pokrývajících detekci celého spektra funkčních závad.

Tab. 6.6.2 Seznam testů

	Test	Popis testu
1	LED diody	optický test signalizace, vyhodnocuje obsluha
2	Verze	přečtení a porovnání správné verze programu
3	Palubní síť	změření a porovnání správného napětí (12 V, 3 %)
4	Maximální napětí	kontrola omezení výstupního napětí (24 V, 5 %)
5	Tranzistor	kontrola připojovacího tranzistoru, sepnutý a rozepnutý
6	Proud	měření velikosti proudu do zátěže (10 Ω , 1 A a 2 A, 3 %)
7	NTC	kontrola kontaktu pro NTC
8	Kód	kontrola kontaktu pro kódový rezistor
9	Komparátor	kontrola obou stavů komparátoru napětí pro Li-Ion
10	Dělič	kontrola všech dělicích poměrů (3 %)

Během testování je potřeba zařízení připojit k testovacímu přípravku, viz obr. 5.6.3, jenž zahrnuje napájení a rezistory připojené ke vstupním kontaktům. Příklad sledu testovacích kódů při kontrole maximálního napětí je následující:

- zapnutí diagnostického režimu,
- rozepnutí připojovacího tranzistoru (odpojení výstupu od zátěžového rezistoru 10 Ω),
- nastavení výstupního proudu na 100 mA (proud 100 mA způsobí nárůst výstupního napětí až na hodnotu, kdy začne pracovat vazba omezující napětí na 24 V, zároveň takto malý proud nezpůsobí poškození, kdyby omezující vazba nebyla v pořádku),
- nastavení napěťového děliče na největší poměr (takový poměr, ve kterém je možné měřit požadovanou hodnotu s tolerancí),
- naměření napětí a přijmutí naměřené hodnoty,
- porovnání s napěťovými mezemi (poslední přijatá data z měření se porovnají s blízkými hodnotami, například 23,5 V až 24,5 V, hodnota nesmí být mimo tuto oblast jinak test skončí neúspěšně),
- nastavení proudu na 0 A (po skončení testu se měnič vypne),
- vypnutí diagnostického režimu.

Jednotlivé kódy mohou být odesílány v intervalu 100 ms nebo celých násobcích. Jelikož jsou některé děje pomalé, tak se pro ověření některé testy opakují po 1 – 2 s, zda se funkce v čase nemění. Během měření je měnič často v chodu, a tak se musí předpokládat, že měřená data jsou rušená. Napěťový údaj se porovnává s oblastí okolo předpokládané hodnoty v řádu procent, nikoli s konkrétní hodnotou. Širší oblast vychází také z tolerancí pasivních součástek a rozptylů parametrů analogových obvodů (OZ). Ovšem principiálně se závada vzniklá při výrobě projevuje diametrálně odlišnými odezvami a odhalitelnost je takřka úplná.

Odhalí-li test vzniklou poruchu, je možné porovnáním výsledků dalších testů zjistit závadu nebo ji alespoň částečně lokalizovat. Jedná-li se o součástku, pak lze z výsledků testů snadno rozpoznat, o kterou se jedná, ovšem lokalizace nesprávných spojení (studených spojů) nebo vodivých můstků vzniklých při pájení vlnou je pro tento způsob obtížná a vyžaduje podrobnou analýzu. Z provozu testování se jednotlivé závady přidávají společně s výsledky testů, lokalizací a způsobem odstranění do tabulky. Tabulka při opakování stejné poruchy zrychlí proces opravy. Ovšem četnost výrobků s poruchou je malá a spojená především s procesem pájení.

7 Realizace technického a programového vybavení nabíjecích systémů dle požadovaných vlastností

Tato kapitola se zabývá vzorovým návrhem konkrétního nabíjecího zařízení od výchozího požadavku (specifikace) až po finální výrobek. Při návrhu se vždy vychází z předchozích zkušeností, bez nichž by se vývoj nového zařízení extrémně prodloužil. Tento návrh vychází z prezentovaných konstrukčních a programových řešení, postupů a aplikací hlavní části práce, které jsou rovněž výsledkem dlouhodobého získávání zkušeností a zlepšování řešení v oblasti nabíjecí techniky. Je nutné říci, že vývoj nového zařízení není vždy přímočarý, především na počátku při návrhu výkonové a regulační části se zvažuje více alternativ. Po ověření dosažených vlastností se jedna alternativa zvolí a dále se optimalizuje, nebo se hledá další možné řešení. Stejně tak při ověření nabíjecího procesu se přistupuje k drobným změnám algoritmů a konstant, aby byl nabíjecí systém optimalizovaný na podporované bateriové sestavy. Hrubý postup jednotlivých kroků návrhu je následující [31].

- 1) Návrh a realizace výkonové části (nalezení vhodné topologie a řídicího obvodu).
- 2) Testování výkonové části (úprava regulační smyčky).
- 3) Návrh celého nabíjecího zařízení s procesorem a jeho periferními obvody.
- 4) Vytvoření programu.
- 5) Testování nabíjecích režimů (úprava programu).
- 6) Testování nabíjení baterií, zkušební provoz.
- 7) Uvolnění zařízení do výroby.

Specifikace

Novému výrobku předchází soupis požadovaných parametrů a popis chování, souhrnně nazývaných specifikace. Konstruktor ze specifikace vychází při hledání vhodného řešení, programátor podle specifikace aplikuje požadované chování vhodným algoritmem a konstantami. Zjednodušená specifikace pro tento ukázkový návrh je v tabulce 7.1.

Tabulka 7.1 Vzorová specifikace nového nabíjecího zařízení

Popis nového výrobku: Autonabíječka Li-Ion, NiMH aku												
Nabíječka pracující z automobilové sítě 12 V (24 V). Slouží pro nabíjení akumulátorů o kapacitě až 3,5 Ah												
a) NiMH 9,6 – 14,4 V s NTC 6k8 (nebo 20k), bimetal												
b) Li-Ion akumulátorů 2 – 5 článků s kódovým rezistorem, který je vyveden na separátním kontaktu												
Po vypnutí nabíjecího procesu při poklesu napětí automobilové sítě pod $10.4 \pm 0,5$ V, kterým se chrání autobaterie před poškozením vybitím, dojde k obnovení nabíjecího procesu automaticky po nárůstu napětí automobilové sítě na $11,4 \pm 0,3$ V. (V případě obnovení nabíjení je zahájeno na napětí, při kterém došlo k vypnutí a při nabíjení NiMH aku je ignorován inflexní bod. Nabíjení probíhá maximálním proudem do ukončení tohoto nabíjecího cyklu.)												
Požadované technické parametry												
<u>A. Připojení na napájecí automobilovou síť</u>												
Max. rozsah napájecího napětí:	$10,4 \pm 0,5$ V až 30 V											
Vypnutí nabíjení při napětí automobilové sítě pod	$10,4 \pm 0,5$ V											
Start nabíjení při napětí automobilové sítě nad	$11,4 \pm 0,3$ V											
Krátkodobý pokles pod $10.4 \pm 0,5$ V ignorován (startování vozidla)	5 sec											
Jmenovitý příkon:	max. 60 W											
Výstupní napětí naprázdno:	max. 24 V											
<u>B. Nabíjení aku NiMH (algoritmus nabíjení jako 3WK 026 02.2)</u>												
Jmenovité napětí akumulátorů:	9,6 V ÷ 14,4 V											
Nabíjecí doba:	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Kapacita (Ah)</th> <th colspan="2">doba nabíjení (minut)</th> </tr> <tr> <th>typ.</th> <th>max</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2,0</td> <td>55</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td>2,6</td> <td>70</td> <td>75</td> </tr> </tbody> </table>	Kapacita (Ah)	doba nabíjení (minut)		typ.	max	2,0	55	60	2,6	70	75
Kapacita (Ah)	doba nabíjení (minut)											
	typ.	max										
2,0	55	60										
2,6	70	75										
Nabíjecí proud:												
nabíjení:	$2,1$ A \pm 10 %											
cyklický udržovací impuls												
po dokončení nabíjení:	$2,1$ A s periodou 5 min											
Ukončení rychlého nabíjení:	a) komplexní nabíjecí algoritmus založený na detekci 2. inflexního bodu a poklesu nabíjecího napětí (-delta U) b) nárůst teploty nad stanovenou mez - buď bimetal nebo NTC v akumulátoru c) po dosažení doby nabíjení 100min											
Povolená teplota akumulátorů při nabíjení:	$+5$ °C ÷ $+65$ °C											
Hodnota NTC 6k8 pro ukončení nabíjení:	1k8 (65 °C)											
Hodnota NTC 6k8 pro automatický start nabíjení horkého/studeného aku	3k9/17k (40 °C / 3 °C)											
Hodnota NTC 20k pro ukončení nabíjení:	4k7 (60 °C)											
Hodnota NTC 20k pro automatický start												

nabíjení horkého/studeného aku	10k/65k (40 °C / 0 °C)
Časová prodleva automatického startu	
nabíjení po sepnutí bimetalu horkého aku	45 sec
Maximální doba nabíjení	100 minut
C. Nabíjení Li-Ion aku	
<p>Kódový rezistor určuje limitní napětí, na které bude aku nabit. Akumulátor se nabíjí v režimu konstantního proudu až dosáhne Li-Ion aku limitního napětí, určeného kódovým rezistorem. Pak začne nabíječka snižovat hodnotu nabíjecího proudu tak, aby se limitní napětí neměnilo. Při poklesu nabíjecího proudu na 1,4A začne nabíječka signalizovat „aku nabit“, nabíjí však dál až do poklesu proudu na 400 mA, kdy přejde do úsporného režimu, ve kterém neteče do aku žádný nabíjecí proud a aku je zatížen jen měřením napětí.</p> <p>Tento stav je signalizován stejně jako ukončení nabíjení a trvá cca 8 hodin, po kterých se nabíječka opět probudí, dobije aku o ztrátu způsobenou odporovou zátěží pro měření napětí a opět přejde do úsporného režimu se signalizací konec nabíjení na cca 8 hodin.</p>	
D. Signalizace	
Pomocí červené a dvoubarevné LED	
E. Klimatické a další podmínky	
Pracovní teplota (teplota okolí):	+5 °C ÷ + 45 °C
Skladovací teplota:	-20 °C ÷ + 60 °C
Krytí:	IP 30
Rozměry:	152 x 86 x 76 mm
Hmotnost:	max. 500 g

7.1 Výpočet potřebného výkonu a zvolení topologie primárního měniče

Jak již bylo řečeno, primární měnič je nejdůležitější částí celého zařízení, touto problematikou se zabývá kapitola 5.2. Důležitými parametry při volbě topologie primárního měniče je výstupní výkon, vstupní a výstupní napětíové rozsahy, účinnost, rozměry, hmotnost, cena atd. Pro jednoduchost postupu při návrhu se vychází pouze z elektrických parametrů.

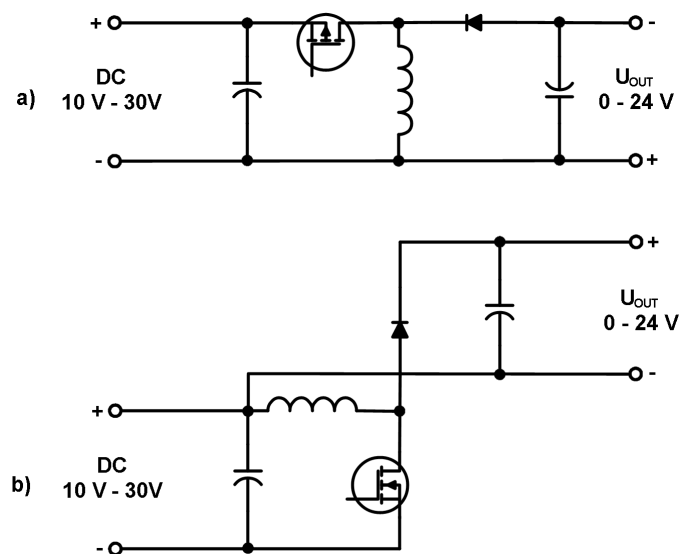
Výpočet výkonu

Ze specifikace je znám maximální příkon zařízení $P_0 = 60 \text{ W}$. Budeme-li uvažovat horší účinnost měniče $\eta = 80 \%$, výstupní výkon bude $P = 48 \text{ W}$. Maximální výstupní napětí při nabíjecím proudu $I_{\text{NAB}} = 2,1 \text{ A}$ je $U_{\text{MAX}80\%} = 22,86 \text{ V}$. Rozsah nabíjecího napětí pro NiMH lze předpokládat od 3 V do maximálního napětí na bateriové sestavě s nejvyšším počtem článků. Sestava NiMH o nominálním napětí 14,4 V má 12 článků ($U_{\text{N_NiMH}} = 1,2 \text{ V}$ na článek). Při nabíjení nepřesahuje napětí $U_{\text{MAX_NiMH_CELL}} = 1,5 \text{ V}$ na článek. Maximální napětí při dobíjení NiMH je $U_{\text{MAX_NiMH}} = 18 \text{ V}$. Rozsah nabíjecího napětí pro baterie Li-Ion lze uvažovat od 2,7 V na článek pro sestavu s nejmenším počtem článků, což je $U_{\text{MIN_LiION}} = 2 \times 2,7 \text{ V} = 5,4 \text{ V}$, do konečného napětí 4,15 V na článek pro sestavu s největším počtem článků, což je

$U_{\text{MAX_LIION}} = 5 \times 4,15 \text{ V} = 20,75 \text{ V}$. Maximální nabíjecí napětí nabíjecího zařízení je pro pětičláňkovou baterii Li-Ion, ovšem z důvodů úbytků na vodičích a napěťové rezervy se maximální napětí zvyšuje o 2 V, tedy $U_{\text{MAX_NAB}} = 22,75 \text{ V}$. Teoretické maximální napětí dané příkonem a účinností je shodné s maximálním napětím při nabíjení. Napěťový údaj vyhovuje i maximálnímu výstupnímu napětí naprázdno danému specifikací $U_{\text{MAX0}} = 24 \text{ V}$. Tato maximální hodnota napětí bude zajištěna zpětnou vazbou se Zenerovou diodou $U_{\text{ZD}} = 24 \text{ V}$, viz kapitolu 5.4.3.

Volba topologie

Jedná se o nabíjecí zařízení napájené z nízkého stejnosměrného napětí. Vstupní napětí se pohybuje od 10 V do 30 V, činnost od 11,5 V, což je velmi široký rozsah. Vstupní poměr je téměř 1:3. Výstupní napětí je potřeba regulovat od 0 V do 24 V, činnost od 3 V. Výstupní poměr je 1:8. Jelikož je vstupní napětí nízké a bezpečné, nemusí mít hledaná topologie galvanické oddělení. V případě použití impulsního transformátoru je nejvhodnější topologie flyback. Velmi široký vstupní a výstupní rozsah by znamenal nevhodný pracovní režim ve většině případů. V kategorii DC/DC měničů bez galvanického oddělení je různá velikost vstupního a výstupního napětí také problém. Pro klasické DC/DC měniče by jejich aplikace znamenala buď vytváření záporného výstupního napětí, nebo jeho posun na kladný potenciál vstupního napětí, což by v obou případech už vytvářelo napětí, které je téměř nebezpečné $U_{\text{NEB}} = 60 \text{ V}$ ($U_{\text{MAX_IN}} + U_{\text{MAX0}} = 30 \text{ V} + 24 \text{ V} = 54 \text{ V}$). Obě klasické varianty jsou na obr. 7.1.1. Jejich použití by značně zkomplikovalo umístění procesoru a ostatních obvodů.



Obr. 7.1.1 Klasické topologie DC/DC měničů bez galvanického oddělení, a) invertující zapojení, b) zvyšující zapojení s plovoucím potenciálem

Méně běžné zapojení DC/DC měniče bez galvanického oddělení s názvem SEPIC (*Single-ended primary-inductor converter*) požadované vlastnosti splňuje. Zapojení obsahuje dvě tlumivky a vazební kondenzátor. Uspořádáním měniče se dosáhne vstupní a výstupní napěťové nezávislosti, což je potřebné právě v tomto případě. Předpokládaný přenášený výkon je pro toto zapojení optimální. Zapojení měniče SEPIC je na obr. 5.2.2.1, blíže se tímto měničem zabývá kapitola 5.2.2.

7.2 Návrh regulační a řídicí části

Po zvolení topologie se přistupuje k výpočtu a výběru součástek primárního měniče splňujících provozní kritéria s ohledem na přenášený výkon. Vstupní část je chráněna pojistkou a vybavena filtrem omezujícím průchod rušení ze zařízení do palubní sítě. Pro tuto aplikaci byl použit řídicí obvod UC3843, jenž obsahuje primární proudovou smyčku zlepšující stabilitu a má dostatečnou dynamiku, viz kapitolu 5.2.2. Nabíjecí zařízení bude mít pouze proudový regulátor, protože jak vyplývá z popsaných algoritmů v kapitole 6.3 a 6.4, lze vhodným algoritmem dosáhnout libovolného nabíjecího chování. Pro regulaci proudu bude použit snímací rezistor umístěný v záporné větvi se vztažným potenciálem na záporném pólu baterie. Zapojení proudového regulátoru bude shodné se zapojením na obr. 5.4.2.6. Zpětná vazba bude mít tři cesty tvořené napěťovým omezením 24 V, proudovým regulátorem a přímou saturační vazbou. Elektronika sekundární strany bude napájena pomocným lineárním stabilizátorem, viz obr. 5.2.4, poněvadž je to v tomto případě nejsnazší řešení a zároveň bude napájení trvalé.

Procesorové okolí

Nejdůležitější částí procesorového okolí jsou analogové vstupy. Ze specifikace vyplývá požadavek na ukončovací metodu $-\Delta V$ pro NiMH baterie, což vyžaduje velmi přesné měření. Proto se využije externí reference TL431 s referenčním napětím 2,5 V pro analogově-digitální převodník. Měření bateriového napětí bude využívat lineární odporový dělič, viz obr. 5.4.4.1, který zajistí rovnoměrnou přesnost v celém rozsahu napětí a také bude sloužit pro nabíjení Li-Ion, které je popsáno dále. Další analogové vstupy budou měřit s pevným poměrem vstupní napětí palubní sítě, napětí na kontaktech NTC a kódovém rezistoru.

Vnitřní čítač bude vytvářet pomocí PWM analogovou hodnotu pro proudový regulátor, což umožní nastavit libovolný proud od 0 A do 2,5 A, viz obr. 5.4.1.5. Z důvodu dodržení

přesnosti a také možnosti změny konečného napětí pro Li-Ion články se změnou hodnoty součástek (rezistorů) přistoupilo k externí detekci konečného napětí pomocným komparátorem, viz obr. 5.4.4.2 a). Lineární dělič je v tomto případě nastaven na dvojnásobný dělicí poměr než je počet článků v baterii, napětí zmenšené tímto poměrem se porovnává s pevným napětím o hodnotě $2,075 \text{ V} = 4,15 \text{ V} / 2$. Výstup komparátoru je zaveden na vstupní bránu procesoru. Výstupní brány procesoru jsou použity pro signalizační LED diody a zastavení měniče. Procesor je doplněn také o rozhraní pro programování a komunikaci s testovacím zařízením.

7.3 Návrh programového vybavení

Vytvoření programu by mělo předcházet vytvoření analýzy požadovaných vlastností nabíjecího zařízení daných specifikací a vytvoření blokového diagramu struktury programu. Jako v obvodové části i zde se vychází z dřívějších řešení, což podstatně snižuje časovou náročnost na vytvoření hrubé konstrukce programu a zároveň se snižuje počet případných chyb. Následující postup vytváření nového programu nebo implementace starého programu v nové aplikaci vychází z praktických zkušeností, jež značně usnadňují a urychlují vývoj programového vybavení budoucího nabíjecího zařízení.

1) Oživení procesoru (osazení DPS a zprovoznění programovacího rozhraní)

Program je možné začít vytvářet i před kompletním vytvořením všech obvodových částí, to je ale komplikované. Jelikož nelze vytvořené části programu otestovat v součinnosti s okolím, je vytvářený kód více chybový.

2) Navázání komunikace s okolím (PC aplikace)

Pro snadné monitorování a ladění programu je výhodné si hned na začátku vytvořit rozhraní s procesorem a získat tak možnost sledování důležitých proměnných. Základní monitorování umožňují i vývojové a programovací prostředí, ovšem vlastní jednoduchý PC program umožňuje daleko více nejen při vytváření programu. Později může sloužit i pro testování poruchy nabíjecího zařízení, viz kapitolu 5.6.

3) Konfigurace okolí (nastavení vstupních a výstupních bran)

Ze zapojení, je-li již známo, vyplývá jakou úlohu budou jednotlivé vstupy procesoru plnit. V mnoha případech bude jejich funkce neměnná. Zde se mění

brány ze vstupních na výstupní a opačně v určité kombinaci, proto je vhodné pro snadné použití v programu vytvořit funkci, jež konkrétní konfiguraci provede, například *Nastav_dělič_na(DEL)*, kde *DEL* je číslo požadovaného dělicího poměru. Dále je potřeba nastavit využívané periferie jako analogově-digitální převodník, čítač, watchdog atd.

- 4) Vytvoření procesu měření (proudové i bezproudové měření všech analogových vstupů)

Analogové veličiny jsou pro celé nabíjecí zařízení důležité. Pro nabíjecí algoritmy je přesné měření dokonce bezpodmínečné, a proto se nejčastěji aplikuje bezproudové měření, viz kapitolu 6.2. Vycházíme-li ze základní struktury nabíjecí procedury, viz obr. 6.1.1, měření se provádí ještě před vyhodnocením. Je vhodné naměřit všechny analogové veličiny najednou a pro tuto činnost si vytvořit asynchronní proceduru, která měření provede a výsledné naměřené hodnoty uloží do příslušných proměnných pro další zpracování v různých částech programu.

- 5) Vytvoření detekčního algoritmu baterií (detekce vložené baterie, určení druhu a počtu článků)

V okamžiku, kdy jsou k dispozici naměřená data, může být sestaven detekční algoritmus. V tomto případě, kdy má být podporováno velké množství různých bateriových sestav s různými druhy článků, musí být detekce jednoznačná. Důležité je vycházet z více detekcí v řadě, které jsou vyhodnocené se stejným výsledkem. Vyhodnocují se i nesprávné kombinace na kontaktech NTC a kódovém rezistoru.

- 6) Vytvoření základní kontrolní smyčky (podpěťová ochrana, detekce baterie, nabíjecí algoritmus)

Nyní je možné vytvořit základní kontrolní smyčku, jež obsahuje podpěťovou ochranu palubní sítě s nejvyšší prioritou a poté detekci baterie, kterou je podmíněn samotný nabíjecí algoritmus, viz obr. 6.4.1.

- 7) Vytvoření algoritmů pro jednotlivé druhy baterií

Postup vytvoření algoritmu pro určitý druh baterie vychází ze specifikace a požadovaných fází nabíjecího procesu, viz obr. 6.1.2. Algoritmy jsou pro tuto aplikaci uvedeny v kapitole 6.4, ovšem kvůli přehlednosti bez méně významných doplňků. Důležité je při návrhu algoritmu neopomenout na zásady přehledného programu při doplňování algoritmu podpůrnými algoritmy, jako je úprava děliče nebo korekce poklesu napětí u NiMH baterií, viz kapitoly 6.5 a 6.3.4.

8) Testování programu (úpravy konstant a podmínek)

Splněním specifikace nejsou pokryty všechny možné situace, jež mohou nastat během nabíjení nebo mimo něj. Na tyto zvláštní situace se musí vhodně reagovat a jejich výskyt předpokládat nebo odhalit během nabíjení v praxi. Příkladem může být pokles vstupního napětí během nabíjení NiMH baterie vlivem startování motoru automobilu na dobu kratší než 5 s, jak je uvedeno ve specifikaci. Při nízkém napětí není zaručeno, že bude měnič dodávat požadovaný výkon (od 10,5 V), což zapříčiní pokles napětí nabíjené baterie a předčasné vyhodnocení konce nabíjení metodou $-\Delta V$. Řešením je blokování spouštění algoritmu během nízkého vstupního napětí a po krátkou dobu poté nebo při nízkém vstupním napětí resetovat (inicializovat) vyhodnocovací metodu $-\Delta V$, podobně jako při změně dělicího poměru, viz kapitolu 6.5. Testování se týká také zjišťování bezporuchového stavu nabíjecího zařízení. V tomto případě jde o samostatné testování na základě jednoduchého přípravku a PC aplikace, jež odesílá příkazy a přijímá a vyhodnocuje přijímaná data, viz kapitolu 5.6.

9) Uvolnění hotového programu do výroby

Odzkoušený program a zároveň i ověřené konstrukční řešení výrobcem i zákazníkem umožňuje prohlásit vytvořený program za provozuschopný. Program i konstrukce jsou neoddělitelné a jakákoli změna v programu nebo změna například výrobce řídicího obvodu se musí opět pečlivě testovat a porovnat parametry staré a nové varianty.

7.4 Zhotovení a dosažené parametry

Od slovního zadání se podle uvedeného postupu návrhu obvodové a programové části dospělo ke zhotovení nabíjecího zařízení. Dosažené parametry jsou závislé nejvíce na primárním měniči, jehož topologie SEPIC se ukázala jako velmi výhodná v mnoha ohledech. Jelikož se jedná o měnič bez transformátoru pouze se dvěma tlumivkami, náklady na primární část jsou výrazně sníženy. Výkonové prvky vzhledem k malému přenášenému výkonu nevyžadují rozměrné chladiče. Teplo vznikající uvnitř nabíjecího zařízení nevyžaduje větrací otvory. K návrhu desky plošných spojů postačila jedna vodivá vrstva.

Elektrické parametry zařízení jsou velmi dobré. Klidová spotřeba je 26 mA na 12 V síti a 28 mA na 24 V síti. Použitý řídicí obvod je schopen dodávat plný výkon od napětí 9 V,

měřeno na vstupních svorkách desky. Účinnost při maximálním výkonu je vyšší než 85 %, což je při relativně malém výkonu s topologií SEPIC příznivější než byl původní předpoklad 80 %.

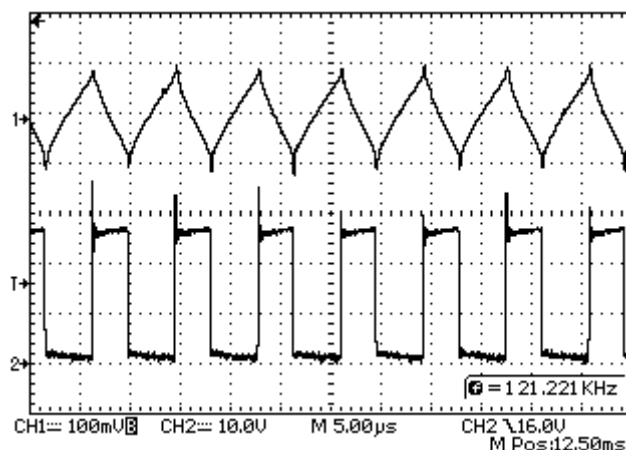
Tabulka 7.4.1 Naměřené statické parametry nabíjecího zařízení

zátěž	síť	napětí		proud		výkon		účinnost	
40 W	12 V	U_{IN}	11 V	I_{IN}	4,54 A	P_0	49,94 W	η	85,0 %
		U_{NAB}	20,22 V	I_{NAB}	2,1 A	P_{NAB}	42,46 W		
	24 V	U_{IN}	21,2 V	I_{IN}	2,3 A	P_0	48,76 W	η	87,0 %
		U_{NAB}	20,2 V	I_{NAB}	2,1 A	P_{NAB}	42,42 W		
20 W	12 V	U_{IN}	11,18 V	I_{IN}	2,43 A	P_0	27,17 W	η	84,1 %
		U_{NAB}	10,88 V	I_{NAB}	2,1 A	P_{NAB}	22,85 W		
	24 V	U_{IN}	21,8 V	I_{IN}	1,27 A	P_0	27,69 W	η	82,7 %
		U_{NAB}	10,9 V	I_{NAB}	2,1 A	P_{NAB}	22,89 W		
15 W	12 V	U_{IN}	11,39 V	I_{IN}	1,56 A	P_0	17,77 W	η	80,2 %
		U_{NAB}	6,79 V	I_{NAB}	2,1 A	P_{NAB}	14,26 W		
	24 V	U_{IN}	21,68 V	I_{IN}	0,83 A	P_0	17,99 W	η	79,4 %
		U_{NAB}	6,8 V	I_{NAB}	2,1 A	P_{NAB}	14,28 W		
30 W	12 V	U_{IN}	8,89 V	I_{IN}	3,75 A	P_0	33,34 W	η	83,1 %
		U_{NAB}	13,19 V	I_{NAB}	2,1 A	P_{NAB}	27,70 W		

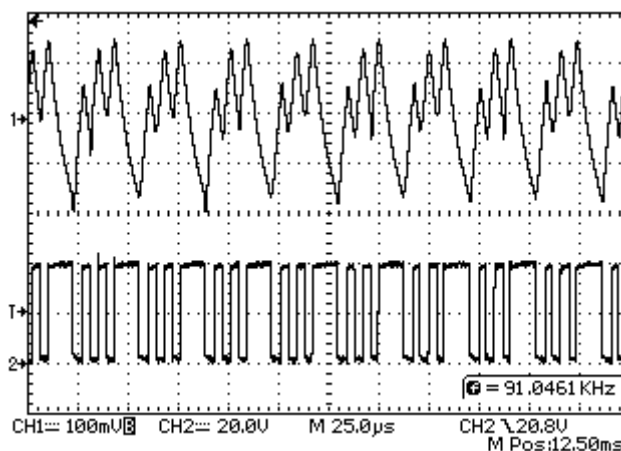
Z naměřených účinností pro různé výkony na obou napěťových hladinách (12 V a 24 V) vyplývá, že největší účinnost je při plném výkonu na 24 V síti, což souvisí také s velikostí výstupního napětí, které bylo téměř shodné se vstupním a obě tlumivky (společné jádro) byly shodně využívány. Pro nižší výkony bylo příznivější nižší napětí, jak vyplývá z tabulky 7.4.1.

Dynamické parametry řídicí a regulační části se i přes široký vstupní a výstupní napěťový rozsah podařilo zkorigovat. Nemalou zásluhu na stabilním chování má správný návrh DPS výkonové části, výstupní tlumič a primární proudový mód řídicího obvodu. Na obrázku 7.4.1 je ukázka signálu z proudového transformátoru (trojúhelník) společně s pravidelným spínáním tranzistoru (napětí Drain-Source) při plném výkonu na 12 V síti.

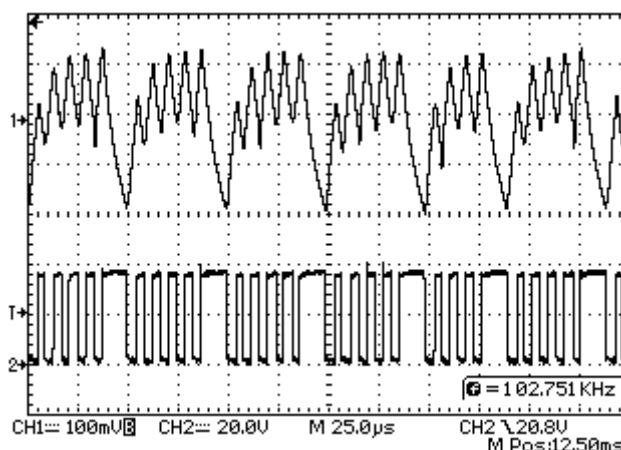
Na obrázcích 7.4.2 a 7.4.3 jsou zobrazeny částečně nestabilní regulace při malém výstupním výkonu a 24 V síti. Oba průběhy nemají vliv na výstupní regulovaný proud, neboť nestabilita je pouze v primární proudové smyčce. Nestabilita je způsobena zřejmě rušením řídicího obvodu velkými napěťovými změnami a malými změnami proudu. První případ oproti druhému nevytváří slabé akustické projevy ve slyšitelném rozsahu.



Obr. 7.4.1 Stabilní činnost měniče; 1 - proudový signál, 2 – napětí na tranzistoru



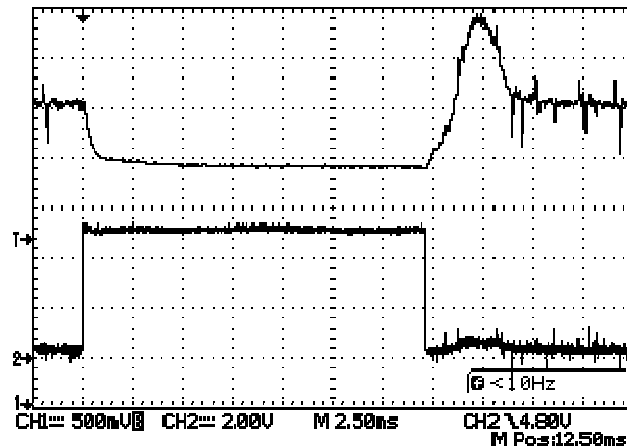
Obr. 7.4.2 Neperiodická činnost měniče; 1 - proudový signál, 2 – napětí na tranzistoru



Obr. 7.4.3 Neperiodická činnost měniče se slabým akustickým projevem; 1 - proudový signál, 2 – napětí na tranzistoru

Dynamiku sekundární proudové regulační smyčky můžeme sledovat na obr. 7.4.4. Jde o měřicí pauzu, kdy je měnič saturačním signálem (dole) vypnut. Po ustálení napětí baterie (nahore) jsou změřeny všechny analogové veličiny a následně je měnič opět spuštěn. Zatímco ukončení činnosti měniče je okamžité, opětovné spuštění je doprovázeno pomalým náběhem a

mírným překmitem, protože se zpětná vazba během měřicí pauzy rozpadla (přerušila) a muselo dojít k jejímu opětovnému sestavení a stabilizaci. Měřicí pauza trvá 17 ms, přičemž z grafu je patrné nízké rušení oproti části, kdy je měnič v provozu. Popis měření před a během pauzy je na obr. 6.2.1. Doba pro stabilizaci zpětné vazby je 5 ms.



Obr. 7.4.4 Měřicí pauza; 1 – výstupní napětí, 2 – saturační signál zastavující činnost měniče

Fotografie tohoto a dalších vyvinutých nabíjecích zařízení jsou součástí přílohy B.

8 Závěr

Práce prezentuje praktické výsledky související s vývojem, návrhem a výrobou elektronických zařízení a tvorbou jejich programového vybavení. Dle hlavního cíle se podařilo uceleně představit problematiku nabíjecí techniky a nabíjecích algoritmů se zaměřením na moderní konstrukce a způsoby nabíjení baterií pro přenosné ruční nářadí. Jsou zde popsány používané technologie článků, jejich vlastnosti, spojování a kompletování do sestav společně s vnitřním vybavením (elektronika a ochrana). Hlavní část práce je rozbor jednotlivých bloků nabíjecích zařízení s různými způsoby jejich provedení v porovnání s nejpříznivější vyvinutou variantou konstrukčního řešení. Následuje rozbor struktury programu nabíjecího zařízení a popis elementárních algoritmů využívající předchozí vyvinuté konstrukční řešení. Rovněž je předvedeno využití elementárních algoritmů pro účely sestavení nabíjecího procesu s více fázemi a stavy. Závěrečná část využívá popsané konstrukce a algoritmy k ukázkovému návrhu celého nabíjecího zařízení od zadání specifických požadavků na nový výrobek až po finální výrobu zahrnující prvotní testování.

Výroba nabíjecích zařízení se dlouhodobě zaměřovala na jednoúčelové systémy. Tento trend se v poslední době výrazně mění společně s rozšiřováním sortimentu bateriových sestav, jejich počtu a druhu článků. Nabíjecí zařízení musí nově podporovat velkou řadu různých sestav, což klade velké nároky na konstrukci a program. Na trhu se vyskytují stále bateriové sestavy, jež nejsou vybaveny informací o počtu článků, což přináší velké problémy při nestandardním zacházení a následném nabíjení s formováním a zjišťováním poškozené baterie. Výrazného zlepšení se začíná dosahovat implementací sériové paměti do baterie s informacemi o počtu a druhu článků, kapacitě a případně dalšími informacemi o životním cyklu baterie.

Představené řešení, jehož nalezení si práce kladla za cíl, splňuje požadavky na univerzální nabíjecí zařízení založené na principu proudového zdroje. K tomu účelu byla vyvinuta ověřená konstrukční zapojení primárních měničů pro různé druhy napájení a také různé varianty sekundárních uspořádání s proudovou regulací a analogovým řízením ovládaným procesorem, stejně jako způsoby zpětných vazeb. Uspořádání jsou nejjednodušším řešením, které má dostatečné parametry, přitom nízký počet součástí a s tím spojené nízké pořizovací (výrobní) náklady.

Velmi užitečným doplňkem, jenž podstatně zjednodušuje program, je popsaný lineární napěťový dělič, neboť algoritmus nabíjení, v případě jeho aplikace, je nezávislý na počtu

článků nabíjené sestavy. Napěťový dělič nejen usnadňuje tvoření algoritmů, ale zároveň zvyšuje přesnost analogově-digitálního převodníku vhodným převodem. Aplikace signálového procesoru uvedeným způsobem, využívající okolní části, byla rozšířena o možnost externí diagnostiky nabíjecího zařízení pro potřeby návrhu a vývoje, ale také testování.

Jelikož se práce věnuje úzké vazbě mezi konstrukcí a programem, je zde dle vytyčeného cíle uveden detailní popis činnosti a struktury nabíjecího procesu, jenž není jinde publikován. Zpravidla jsou uveřejňovány jen základní principy nebo obecné algoritmy ukončovací metody, což je jen jedna část celého programu. Proto se práce blíže zabývá periodickou činností programu, sledem operací při bezproudovém měření a kontrolou naměřených dat v základní kontrolní smyčce. Dále je popsáno stavové chování nabíjecího procesu, standardní stavy a fáze nabíjení. To vše bylo zohledněno pro vytváření programu univerzálního nabíjecího zařízení s podporou bateriových sestav s větším počtem a více druhy článků. Stejně tak uvedené algoritmy vycházejí z aktuálních požadavků na způsob a kvalitu nabíjení a bezpečné ukončení nabíjecího procesu.

Z praktických zkušeností vychází ukázkový postup při návrhu nového nabíjecího zařízení, který byl rovněž jedním z cílů práce. Důležitou částí návrhu je prvotní zvolení topologie primárního měniče, který splňuje požadované parametry uvedené v zadání doplněné o předběžné výpočty. Další postup je už jen aplikace popsaných obvodových částí a doplňků týkajících se konkrétních požadavků. Návrh programového vybavení je podstatně usnadněn, poněvadž není kromě periferních částí procesoru závislý na topologii ani výkonu nabíjecího zařízení. Nezávislost programu na konstrukčním provedení umožňuje snadnou přenositelnost na jiné aplikace jen s modifikací charakteristických konstant. Pro podporu návrhu a vývoje konstrukce i programové části byla rovněž popsána zařízení, jež nahrazují baterii svým chováním i při bezproudovém měřicím režimu nabíjecího zařízení nebo bezpečně a rychle vybíjí baterii pro její další použití.

Méně známé jsou problémy týkající se nabíjení, jež běžně uváděné algoritmy neobsahují, ovšem v praxi jsou zapotřebí. Závažné je především chování NiMH článků velkých kapacit, které po dlouhém skladování nemají rostoucí trend napětí, ovšem pomalý pokles, jenž může být nesprávně vyhodnocen metodou ukončení $-\Delta V$, a proto je uveden korekční algoritmus potlačující tento jev. Rovněž postupy při nabíjení baterie s nedostatečným chlazením nejsou příliš známé, přestože jsou u rychlého nabíjení běžné a zahrnují skokovou změnu (snížení) proudu, což ale opět vnáší problém do detekce $-\Delta V$. Poslední nezbytná součást nabíjecího procesu je detekce poškozené baterie, která je nejčastěji založená na měření vnitřního odporu.

S poškozením baterie souvisí také ochrana nabíjecího zařízení před přepólováním baterie, jež byla uvedena i s algoritmem ochrany a detekce vložení baterie.

Přestože technologie výroby elektronických zařízení s touto prací nesouvisí, musí se o budoucí výrobě při návrhu uvažovat. Využití samotného nabíjecího zařízení k externímu testování, které bylo v práci popsáno nad rámec vytyčených cílů, nevyžaduje při aplikaci doporučeného návrhu sekundární části žádné další konstrukční úpravy. Postačí jen přijímací a odesílací část v programu. Externím ovládním nabíjecího zařízení lze testovat všechny funkce s dostatečnou přesností lokalizace závady vzniklé při výrobě nebo zapříčiněné nějakou ze součástek. V praxi se tento způsob osvědčil odhalením všech závad, jednoduchostí testovacího přípravku a rychlostí testu v porovnání s klasickými kontaktními testery.

Kvalifikační práce tvoří ucelený přehled problematiky nabíjecích zařízení a jako taková může najít uplatnění příručky nebo návodu pro konstruktéra nebo programátora. Diskutované skutečnosti lze využít při inovaci nebo návrhu nového zařízení s různými řešeními využívajícími některé doporučené části nebo některé z dalších popsaných variant podle vlastní aplikace. Nespornými výhodami prezentovaného postupu při návrhu jsou modularita konstrukce usnadňující inovaci pouze některých bloků při řešení jiného zadání a jednotná struktura programové části, která rovněž vychází vstříc přenosu programu do jiných aplikací. Uvedená zapojení a algoritmy jsou ověřené v praxi a vychází z dlouholetých zkušeností s vývojem nabíjecí techniky, kdy výsledkem je několik vyráběných zařízení a jejich modifikací, uvedených v příloze B, pro různé bateriové sestavy.

Další činnost v oblasti nabíjecích zařízení vychází z trendů, které lze v současné době pozorovat, týkajících se rozšiřování informací o baterii, vyšších požadavků na výkon a účinnost primárního měniče, zmenšování rozměrů zařízení, aplikace nových článků na bázi Lithia, sjednocování nabíjecích zařízení a bateriových sestav. Jak moc jsou jednotlivé nové požadavky aktuální, ukáže čas. V nejbližší době je potřeba dále pokračovat na těchto úkolech:

- rozšířit skupinu ověřených primárních měničů o další výkonové úrovně (nad 200 W),
- zvyšovat účinnost měničů a snižovat vliv na rozvodnou síť,
- minimalizovat rozměry měničů,
- vytvořit programovou strukturu spolupráce s vnitřní elektronikou bateriových sestav,
- rozšířit program o samostatnou testovací proceduru,
- rozšířit oblast aplikace i mimo přenosné bateriové systémy.

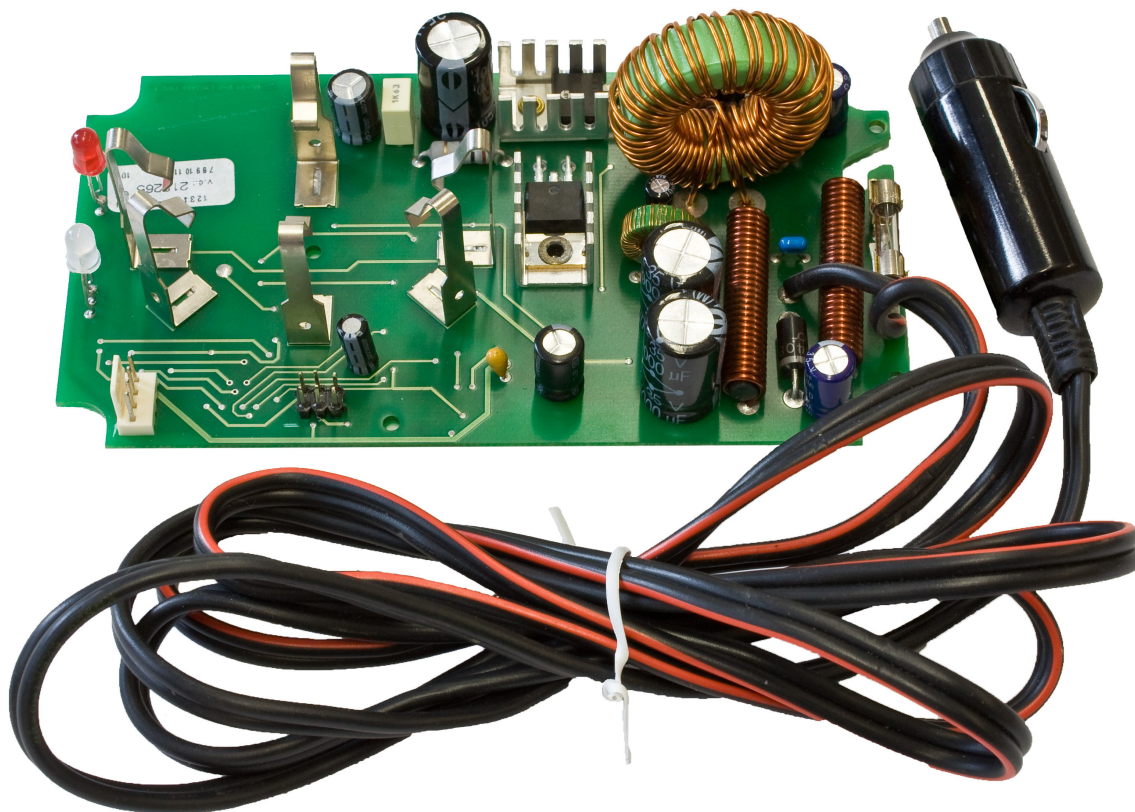
Použitá literatura

- [1] Foster, S. Calwell, Ch. Reeder, T. Neugebauer, R. Consulting, E. „Battery Chargers and Energy Efficiency“ [online], Natural Resources Defense Council, 2003, 13 s., URL: <efficientproducts.org/reports/bchargers/NRDC_Battery_Charger_Final.pdf>
- [2] Maxim, Application note, „How to Design Battery Charger Applications that Require External Microcontrollers and Related System-Level Issues“ [online], 2002, 13s., URL: <pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN680.pdf>
- [3] Operating Technical Electronics, Inc., Application note, „A GUIDE TO BATTERY CHARGING“ [online], 2002, 7s., URL: <www.operatingtech.com/lib/pdf/A%20Guide%20to%20battery%20Charging.pdf>
- [4] Microchip Technology, Inc., Application note, „New Components and Design methods Bring Intelligence to Battery Charger Applications“ [online], 2004, 20s., URL: <ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00960a.pdf>
- [5] Stehlík, L. Marek, J., „Hermetické akumulátory v praxi“ IN-EL, spol. s. r.o., 2004, 142s., ISBN 80-86230-34-4
- [6] Hammerbauer, J., „Elektronické napájecí zdroje a akumulátory“, Plzeň, ZČU, 1998, 181s., ISBN 80-7082-411-5
- [7] Freescale Semiconductor, Inc., Designer reference manual, „Li-ion Battery Charger“ [online], 2003, 36s., URL: <www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/ref_manual/DRM043.pdf>
- [8] Simpson, Ch., „BATTERY CHARGING“ [online], 2007, National Semiconductor, Inc., 17s., URL: <www.national.com/appinfo/power/files/f7.pdf>
- [9] Brázda, M., „Nabíječ NiCd a NiMH článků řízený mikroprocesorem“, diplomová práce, 2009 UTB, 31s.
- [10] Linear Technology Corporation, datasheet, „Standalone Linear NiMH/NiCd Fast Battery Charger“ [online], 2004, 20s., URL: <cds.linear.com/docs/Datasheet/4060f.pdf>
- [11] Maxim, Application note, „NiMH/NiCd switchmode battery charger has dV/dt charge termination“ [online], 2010, 3s., URL: <pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN4496.pdf>
- [12] Linear Technology Corporation, datasheet, „BATTERY CHARGER PRIMER“ [online], 1996, 12s., URL: <www.tayloredge.com/reference/Batteries/BatChargingPrimer.pdf>
- [13] Texas Instruments Incorporated, datasheet, „Programmable NiCd/NiMH Fast-Charge Management IC“ [online], 2010, 25s., URL: <focus.ti.com/lit/ds/symlink/bq24400.pdf>

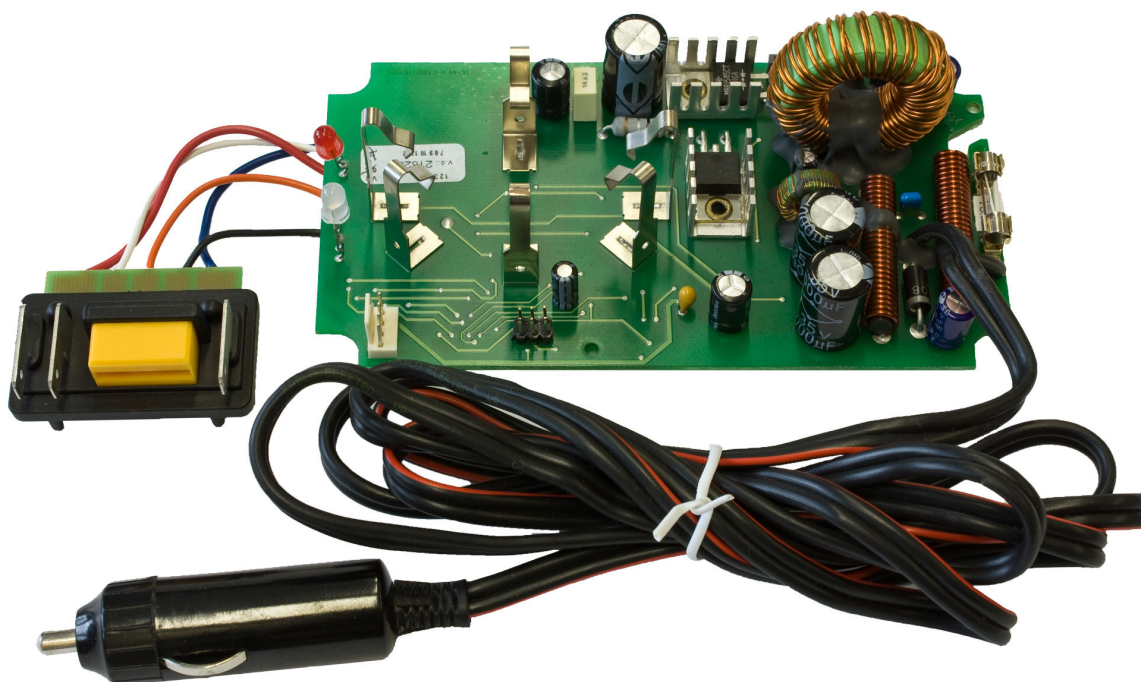
- [14] Wuidart, L. Ravon, J.M., Application note, “*A COST EFFECTIVE ULTRA FAST Ni-Cd BATTERY CHARGER*” [online], STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES, 1999, 6s., URL: <www.datasheetcatalog.org/datasheet/SGSThompsonMicroelectronics/mXyzxtz.pdf>
- [15] O’Connor, J. A., Application note, “*Simple Switchmode Lead-Acid Battery Charger*” [online], Texas Instruments Incorporated, 1999, 10s., URL: <focus.ti.com/lit/an/slua055/slua055.pdf>
- [16] Enertronix, uživatelský manuál, „*CORCEL O-04*“ [online], Asus group, 2009, 8s., URL: <www.scav.cz/obchod/e-shop/specifikace/nabijecky/Corcel_O-04.pdf>
- [17] Tyco Electronics Corporation, datasheet, “*PolySwitch LVR/LVRL Line Voltage Rated Devices*” [online], 2007, 4s., URL: <www.digikey.com/Web%20Export/Supplier%20Content/Tyco_8004/PDF/TycoRaychem_LVR.pdf>
- [18] Semiconductor Components Industries, datasheet, “*Lithium Battery Protection Circuit for One Cell Battery Packs*” [online], 2002, 13s., URL: <www.datasheetcatalog.org/datasheet/on_semiconductor/NCP800-D.PDF>
- [19] Barsukov, Y., „*Battery Cell Balancing: What to Balance and How*“ [online], 2005 Texas Instruments, 8s., URL: <<http://focus.ti.com/download/trng/docs/seminar/Topic%20-%20-%20Battery%20Cell%20Balancing%20-%20What%20to%20Balance%20and%20How.pdf>>
- [20] Hartman, M., “*Inside Current-Mode Control*” [online], 2005 National Semiconductor Corporation, 8s., URL: <www.national.com/vcm/national3/en_US/resources/power_designer/PowerDesigner_106.pdf>
- [21] Power Integrations, Inc., Application note, “*TOPSwitch®-FX Flyback Design Methodology*” [online], 2000, 16s., URL: <www.nalanda.nitc.ac.in/industry/appnotes/PowerInt/an25.pdf>
- [22] Philips Semiconductors, datasheet, “*Current-mode PWM controller*” [online], 1994, 8s., URL: <noel.feld.cvut.cz/hw/philips/acrobat/5060.pdf>
- [23] Fairchild Semiconductor, Application note, “*AC/DC Switch Mode Power Supply Design Guide*” [online], 2005, 36s., URL: <www.fairchildsemi.com/collateral/smpps_design_guide.pdf>
- [24] Erickson, R. W., “*DC-DC Power Converters*” [online], 2005 University of Colorado, 19s., URL: <www.eng.auburn.edu/~agrawvd/COURSE/READING/LOWP/Erikson_DC_2_DC.pdf>
- [25] National Semiconductor, Application note, “*Designing A SEPIC Converter*” [online], 2008, 8s., URL: <www.national.com/an/AN/AN-1484.pdf>
- [26] ON Semiconductor, datasheet, “*Battery Fast Charge Controllers*” [online], 2005, 16s., URL: <www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC33340-D.PDF>

- [27] Dallas Semiconductor, datasheet, “*Battery Identification Chip*” [online], 2005, 21s., URL: < www.datasheetcatalog.org/datasheets/1150/216088_DS.pdf>
- [28] Atmel Corporation, datasheet, “*Two-wire Serial EEPROM*” [online], 2007, 27s., URL: < www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc0180.pdf>
- [29] Štengl, A., “Simulátor baterie”, bakalářská práce, 2009 ZČU, 53s.
- [30] Intersil Americas Inc., datasheet, “*Li-ion/Li-Polymer Battery Charger Accepting Two Power Sources*” [online], 2008, 11s., URL: < www.intersil.com/data/fn/fn6698.pdf>
- [31] Microchip Technology Inc., Application note, “*Intelligent Battery Charger Reference Design*” [online], 2003, 65s., URL: < ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/30451c.pdf>
- [32] Hrubec, M., “*Nabíjecí technika a nabíjecí algoritmy*”, rigorózní práce, 2009, Plzeň ZČU, 34s.

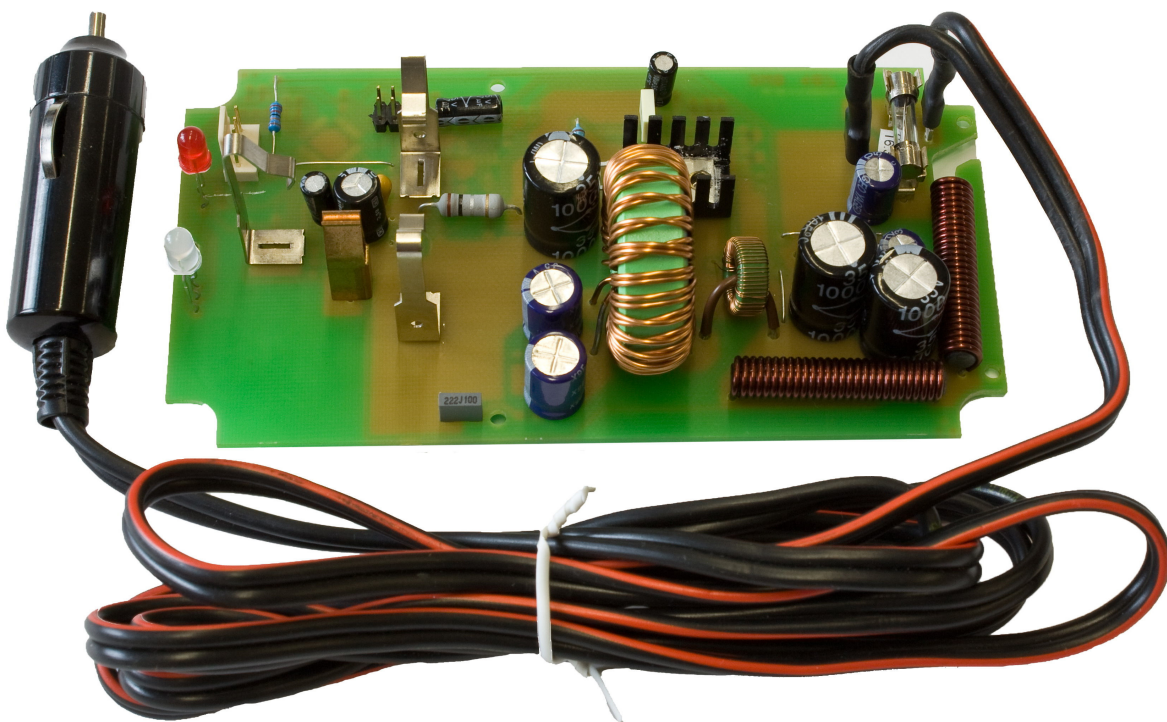
Příloha B: Fotografie nabíjecích zařízení



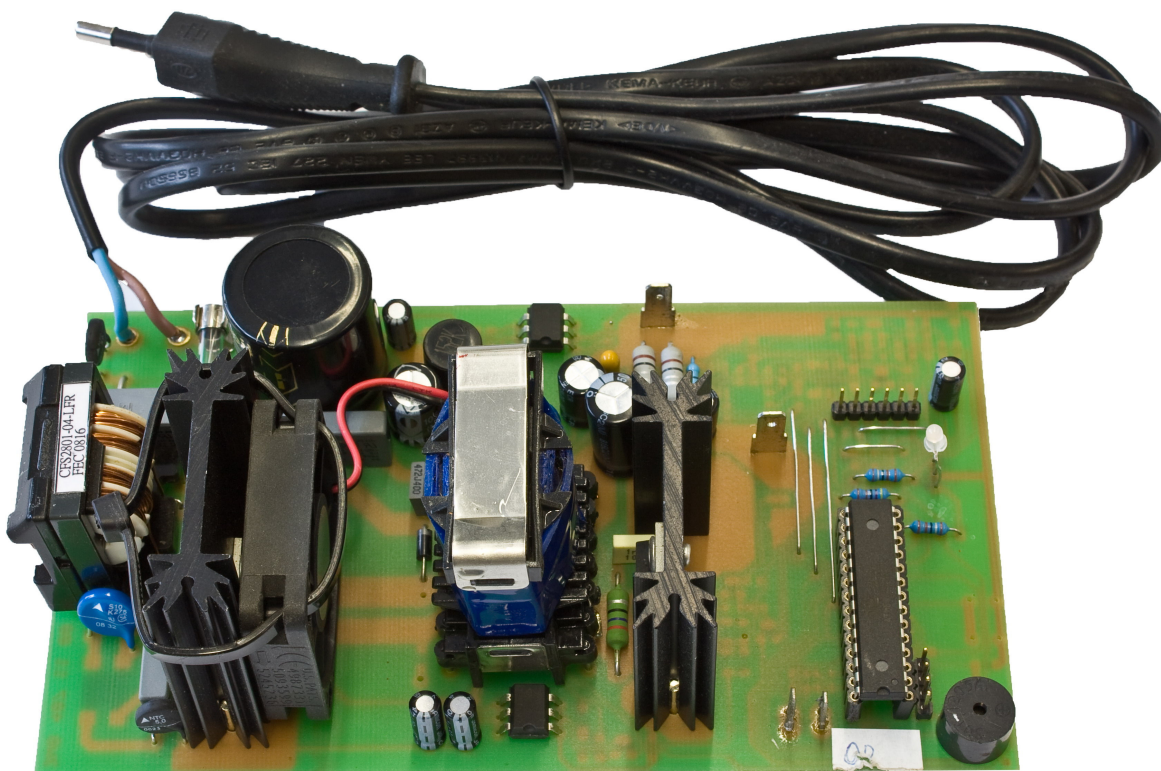
Obr. 1 Autonabíječka s šachtou. Vstup: 10 - 24 V. Výstup 0 - 30 V / 2,1 A / 60 W, r. 2009.



Obr. 2 Autonabíječka s konektorem. Komunikace s vnitřní elektronikou sériovým rozhraním 1 Wire. Vstup: 10 - 24 V. Výstup 0 - 30 V / 2,1 A / 60 W, r. 2009.

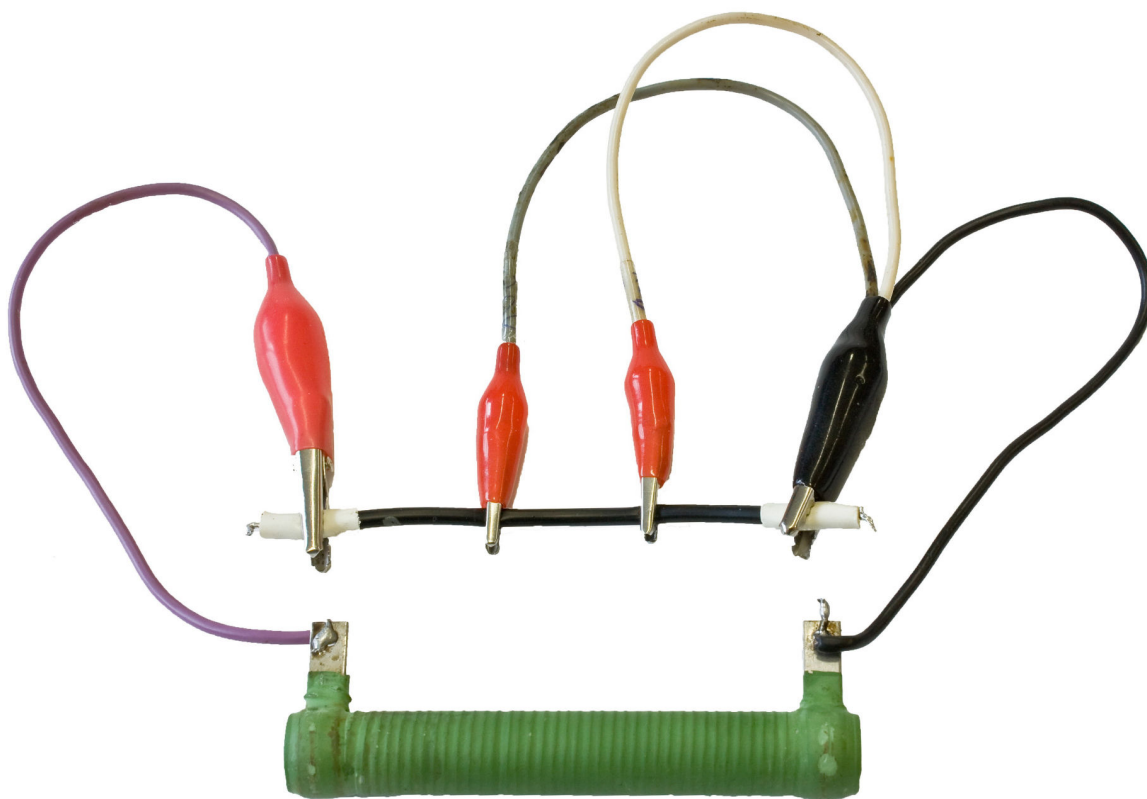


Obr. 3 Autonabíječka s šachtou (LUKAS). Jednostranný plošný spoj. Vstup: 10 - 24 V.
Výstup 0 - 30 V/ 2,1 A/ 60 W, r. 2010.

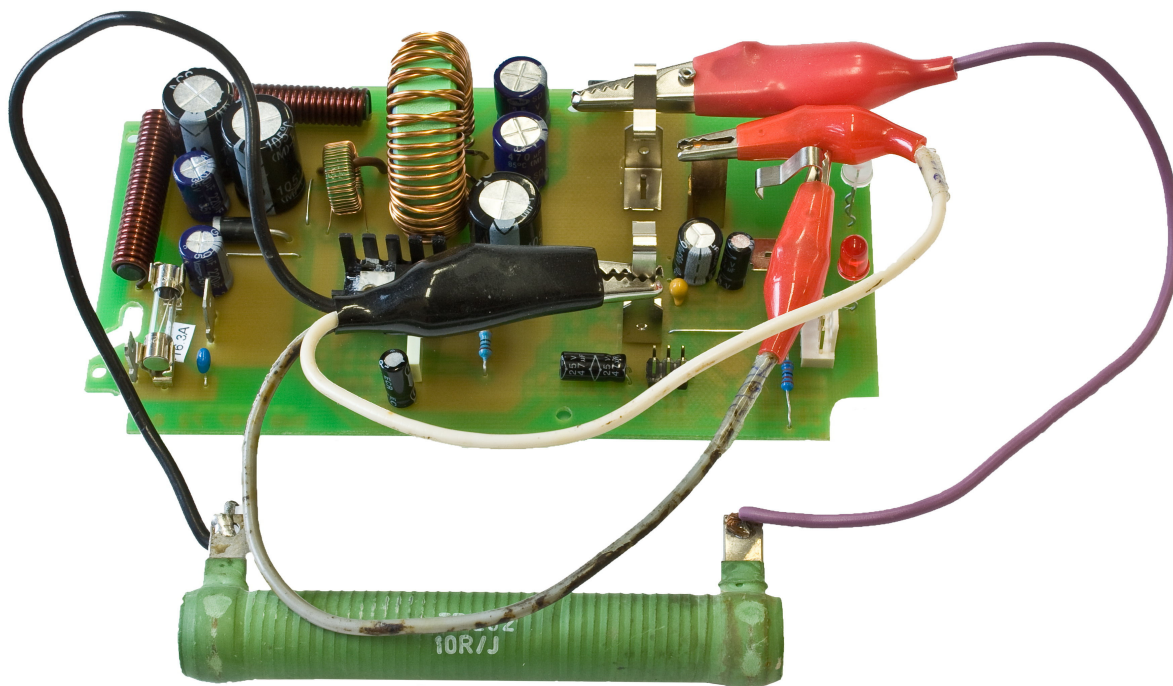


Obr. 4 Síťové nabíjecí zařízení. Jednostranný plošný spoj. Vstup: 230 V AC. Výstup 0 -
35 V/ 5 A/ 150 W, r. 2010.

Příloha C: Diagnostické zařízení



Obr. 1 Diagnostický přípravek k bezkontaktnímu testování funkcí nabíjecího zařízení.



Obr. 2 Aplikace diagnostického přípravku. Testování při výrobě využívá speciální konektor s podobným tvarem, jaký má bateriová sestava, což umožňuje rychlé připojení všech kontaktů.

Seznam autorských publikací

- [1] Hrubec, M., “*Sinusový měnič s výstupním napětím 230V/50Hz*”, Plzeň 2007, 53s., Diplomová práce, ZCU FEL Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací.
- [2] Hrubec, M., “*Sinusový měnič s nízkofrekvenčním transformátorem*”, Přehlídka studentských odborných prací na FEL. Část 2., Elektronika. V Plzni: Západočeská univerzita, 2007. s. 21., ISBN 978-80-7043-571-7
- [3] Hrubec, M., “*Použití toroidního transformátoru v DC-AC měničích*”, Přehlídka studentských odborných prací na FEL. Část 2., Elektronika. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008. s. 39., ISBN 978-80-7043-701-8
- [4] Hrubec, M., “*Napájecí zdroj s obvodem SG3524 (24V/5A)*”, červenec 2009, 17s., A Radio – praktická elektronika.
- [5] Hrubec, M., “*Napájecí a záložní systém satelitu s přímým řízením*”, Přehlídka studentských odborných prací na FEL. Část 2., Elektronika. V Plzni: Západočeská univerzita, 2009. s. 49., ISBN 978-80-7043-809-1
- [6] Hrubec, M., “*The power supply and energy storage system of small satellite*”, 2010 Poznan University of Technology, XV conference ZKwE'10, 87s., ISBN 978-83-89333-34-6
- [7] Hrubec, M., “*Napájecí a záložní systém satelitu*”, Přehlídka studentských odborných prací na FEL. Část 2., Elektronika. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010. s. 47., ISBN 978-80-7043-914-2
- [8] Hrubec, M., “*Nabíječka olověných baterií s kompenzací úbytku napětí na vodičích (12V/6A)*”, únor 2011, 20s., A Radio – praktická elektronika.