Středoškolská odborná činnost 2007/2008

Obor 10 – elektrotechnika, elektronika a telekomunikace

Nabíječ akumulátorů

3. verze

Autor:
Vlastimil Šetka, 4. ročník
VOŠ a SPŠE Plzeň
Koterovská 85
326 00 Plzeň

Konzultant:
Ing. Stanislav Kolena
VOŠ a SPŠE Plzeň

Plzeň, 2008

Prohlašuji tímto, že jsem soutěžní práci vypracoval samostatně a uvedl v seznamu literatury veškerou použitou literaturu a další informační zdroje včetně internetu.

V Plzni dne 28. dubna 2008

vlastnoruční podpis autora

Nabíječ akumulátorů

- mikroprocesorové řízení – nabíjení všech typů akumulátorů (omezeno proudem 2 A a napětím 20 V)
- možnost vybíjení akumulátoru nastavitelným konstantním proudem
- přesné měření dodané / odčerpané kapacity
- měření nabíjecích a vybíjecích charakteristik

(fotografie hotového přístroje)

Obsah

1. Úvod ... 5
2. Řešení elektronické části ... 6
   2.1. Shrnutí navrženého řešení ... 6
   2.2. Napájení, zdroje ... 7
   2.3. Řízení a ovládání ... 7
      2.3.1. Řízení výkonové části ... 7
      2.3.2. Datová komunikace ... 8
      2.3.3. Uživatelské rozhraní ... 8
      2.3.4. Řízení chlazení ... 8
   2.4. Výkonová část ... 8
      2.4.1. Zdroj ... 8
      2.4.2. Zátěž ... 9
   2.4. Měření ... 10
      2.4.1. Návrh ... 10
      2.4.2. Realizace ... 11
   2.5. Konstrukční poznámky k plošným spojům ... 12
3. Software pro mikropočítač ... 13
   3.1. Architektura systému ... 13
      3.1.1. Plánovací časovač ... 14
      3.1.2. Generování PWM ... 14
      3.1.3. Sériový terminál ... 15
      3.1.4. Ukládání charakteristik do EEPROM ... 15
      3.1.5. Měření teploty chladiče a spínaní nuceného chlazení ... 16
      3.1.6. Zpracování vstupu z tlačítek ... 17
   3.2. Komunikační protokol ... 17
      3.2.1. Operace s úložištěm charakteristik ... 18
      3.2.2. Nastavení kalibračních konstant ... 19
      3.2.3. Přímý přístup do EEPROM ... 19
      3.2.4. Výpis provozních dat ... 20
      3.2.5. Ruční nastavení regulátoru ... 20
4. Typy akumulátorů a metody nabíjení ... 21
   4.1. Akumulátory NiCd a NiMH ... 21
   4.2. Akumulátory SLA ... 22
   4.3. Li-ion akumulátory ... 23
5. Mechanická konstrukce ... 24
   5.1. Návrh a realizace ... 24
   5.2. Technologický postup ... 24
6. Závěr ... 25
   6.1. Ověření funkce a měření ... 25
      6.1.1. Přesnost měření napětí a proudu ... 25
      6.1.2. Ověření funkce ... 25
      6.1.3. Zhodnocení funkce nabíječe ... 28
   6.2. Technické parametry ... 29
   6.3. Zhodnocení ... 29
7. Seznam použitých zkratek ... 30
8. Literatura ... 31
9. Seznam příloh ... 32

1. Úvod

Cílem práce bylo vytvořit kompletní návrh elektronického zařízení – inteligentního nabíječe akumulátorů – a realizace jeho výroby.

Akumulátory jako zdroje energie se v současnosti používají v širokém spektru komerční elektroniky. Často se vyskytují požadavky na zjištění stavu různých typů akumulátorů. Některé nabíječe nedodržují doporučené parametry nabíjení (viz kapitola 4), čímž je životnost akumulátorů zbytečně snižována. To mě, kromě dalších důvodů, vedlo ke konstrukci dále popsaného zařízení.

Požadavky:

- nabíjení běžně používaných typů akumulátorů (NiCd, NiMH, Li-ion a menší olověné)
- zajištění optimálních nabíjecích algoritmů pro různé typy akumulátorů, možnost jejich změny a doplnění dalších
- možnost vybíjení akumulátoru nastavitelným proudem za účelem zjištění jeho stavu
- měření dodané / odčerpané kapacity (v mAh) při nabíjení / vybíjení
- měření nabíjecích a vybíjecích charakteristik, tj. periodický záznam okamžitých hodnot napětí a proudu do paměti přístroje a jejich následné zpracování v PC
- jednoduché ovládání umožňující nastavení veškerých parametrů

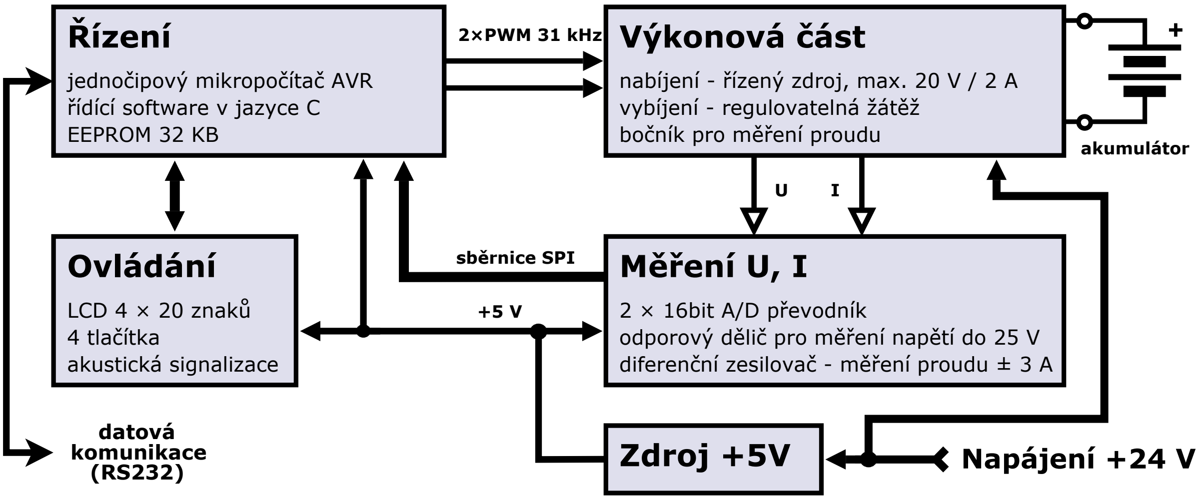
Všechny základní funkce včetně ukládání charakteristik v průběhu měření musí být přístroj schopen realizovat samostatně. Vyčtení naměřených charakteristik do PC může být provedeno po jejich naměření.

Součástí práce je:

- návrh elektronické části zařízení a plošných spojů,
- tvorba řídícího software pro mikropočítač, jehož použití se ukázalo jako nezbytné pro splnění většiny požadavků,
- návrh mechanického provedení a designu,
- realizace výroby zařízení dle vytvořeného návrhu.

2. Řešení elektronické části

2.1. Shrnutí navrženého řešení



Obr. 1: Blokové schéma elektronické části

Výše uvedené požadavky by prakticky nebylo možné realizovat konvenční elektronikou bez podpory softwarového řízení. Mnoho výrobců dodává také speciální integrované obvody pro nabíjení akumulátorů, jejich funkce bývá vždy nějakým způsobem omezena např. jen na některé typy akumulátorů.

Dále popsané řešení umožňuje realizovat téměř libovolný nabíjecí algoritmus se závislostí na čase, napětí a proudu na připojeném akumulátoru. Uživatel může všechny potřebné parametry, jako je typ, počet článků a kapacita akumulátoru, pohodlně nastavit pomocí tlačítek a displeje se systémem menu.

Blokové schéma (obr. 1) naznačuje vzájemné propojení a souvislosti jednotlivých funkčních bloků elektronické části zařízení. Každý z nich je podrobně popsán dále.

Mikropočítačové řízení umožnilo navrhnout relativně jednoduchou elektronickou část. Rozhodující část funkčnosti je realizována řídícím software v paměti mikropočítače.

2.2. Napájení, zdroje

Zařízení je napájeno jediným napětím 24 V z externího zdroje. Tímto napětím je přímo napájena výkonová část, nemusí být stabilizované. Pro napájení celého zařízení jsem použil spínaný síťový zdroj, který má nízkou hmotnost a malé rozměry. Tyto zdroje se běžně vyrábí pro napětí 24 V a různé proudové zatížení.

Pro napájení řídící části (procesor, AD převodník, LCD) je potřeba stabilizované napětí 5 V. To je možné vytvořit lineárním nebo spínaným napěťovým stabilizátorem.

Při odebíraném proudu 100 mA z 5 V větve a napájecím napětí 24 V by byla výkonová ztráta na lineálním stabilizátoru cca 2 W, účinnost pouze 21 %.

$$P_Z = \Delta U \cdot I = (24 - 5) \cdot 0{,}1 = 1{,}9 \text{ W} \qquad \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I}{U_1 I} = \frac{5}{24} = 21\,\%$$

Účinnost spínaných stabilizátorů se pohybuje nad 60 %, výkonová ztráta je pak zanedbatelná.

Použil jsem spínaný stabilizátor LT1176-5 od *Linear Technology*. Základní vlastnosti [2]:

- pouzdro DIP8, výkonový spínač na čipu, minimum externích součástek
- výstupní napětí 5 V, vstupní napětí až 35 V
- účinnost při zátěži 100 mA cca 65 %

Tento obvod vyžaduje pro svou funkci pouze několik externích součástek (viz schéma zapojení – příloha A) a oproti použití lineárního stabilizátoru je výhodou mnohem lepší energetická účinnost. Díky malému ztrátovému výkonu není nutné použít přídavný chladič.

2.3. Řízení a ovládání

Srdcem celého zařízení je jednočipový osmibitový mikropočítač ATmega16 z řady AVR firmy *Atmel* [4]. Zvolil jsem jej zejména z těchto důvodů:

- vysoký výpočetní výkon, optimalizace pro vyšší programovací jazyky
- hardwarové generátory PWM s vysokým kmitočtem, časovače
- svobodný kompilátor jazyka C – GCC [10]
- programování přímo v aplikaci přes SPI rozhraní
- dostatečná kapacita programové paměti – 16 KB

Mikropočítač (IC4) je použit v SMD pouzdru TQFP44. Rozhraní SPI pro programování je vyvedeno na konektor JISP (přístupný po odstranění jednoho z bočních krytů).

Z důvodu relativně velké výpočetní náročnosti některých operací je použitý maximální možný pracovní kmitočet, tj. 16 MHz. Oscilátor s krystalem X1 je dostatečně přesný a stabilní i pro měření času v řádech desítek hodin, což je nutné pro měření kapacity.

Přes I^2C sběrnici připojena externí EEPROM paměť 24LC256 (IC5) s kapacitou 32 KB. Slouží k ukládání naměřených charakteristik.

Akustickou signalizaci provozních stavů zajišťuje piezoměnič (SP).

2.3.1. Řízení výkonové části

Spínaný zdroj ve výkonové části je přímo řízen obdélníkovým signálem s PWM modulací generovaným v mikropočítači. Podrobněji je tento princip rozebrán v kapitole 2.4.1.

2.3.2. Datová komunikace

Protože zařízení umožňuje i ukládání charakteristik, je vybaveno datovým rozhraním RS232 pro komunikaci s osobním počítačem. Propojení je možné realizovat i přes modernější rozhraní USB pomocí běžně dostupných převodníků USB ↔ RS232.

Mikropočítač obsahuje rozhraní UART s úrovněmi CMOS. Přizpůsobení napěťových úrovní normě RS232 zajišťuje integrovaný obvod MAX232 (IC6). Rozhraní je vyvedeno na konektor CANNON9F přístupný z venku na boku krabičky.

2.3.3. Uživatelské rozhraní

Ke komunikaci s uživatelem – nastavovaní parametrů a zjišťování provozních stavů – slouží displej a čtveřice tlačítek.

Displej je použit typu LCD s 4 řádky po 20 znacích, každý znak je tvořen maticí 5 × 8 bodů. Pro lepší čitelnost má LCD modré podsvícení, jehož napájení je spínáno mikropočítačem, takže nemusí svítit po celou dobu provozu.

Tlačítka jsou připojena přímo na vstupy mikropočítače v režimu pull-up. Funkce každého tlačítka se mění na základě kontextu uživatelského rozhraní a je vždy naznačena symbolem na posledním řádku displeje.

2.3.4. Řízení chlazení

Aby ventilátor realizující nucený oběh vzduchu pro chlazení zbytečně nerušil hlukem, je realizováno jeho automatické spínání podle teploty chladiče.

Teplotu není třeba měřit přesně, stačí relativní srovnání s nastavenými mezemi, proto jsem použil odporové polovodičové čidlo KTY81-220. Jeho základní odpor při 25°C je 2000 Ω. S vyšší teplotou odpor roste asi o 1 % na 10 °C. Pomocí jednoduchého odporového děliče (čidlo, R24) je tato teplota převedena na napětí, které je měřeno interním A/D převodníkem v ATmega16.

Při překročení stanovené teploty (kolem 55°C) je softwarově sepnut ventilátor. Jako výkonový spínač slouží tranzistor Q7. Rezistor R22 slouží ke snížení napětí z 24 V na cca 8 V pro napájení ventilátoru (má jmenovité napětí 12 V, nižší otáčky stačí a omezí se tím nežádoucí hlučnost).

2.4. Výkonová část

Výkonová část zajišťuje vlastní nabíjení či vybíjení připojeného akumulátoru. Část zajišťující nabíjení je vlastně řízený zdroj elektrické energie – dodává energii do akumulátoru. Část zajišťující vybíjení je řízenou zátěží – odčerpává energii z akumulátoru.

2.4.1. Zdroj

Zdroj pro nabíjení je realizován na spínaném principu – jako snižující měnič napětí (buck converter). To umožňuje dosažení dobré účinnosti (v daném zapojení asi 65%) a také relativně jednoduché digitální řízení. Zdroj musí být schopen kompenzovat změny v zátěži výstupu a přesně udržovat požadované napětí nebo proud. Toho je dosaženo dále popsaným principem řízení.

Popis zapojení

Tranzistor Q1 je spínán napětím s obdélníkovým průběhem. Signál téhož průběhu za tranzistorem (napájený přímo ze ss. zdroje 24 V) prochází dolnopropustním LC filtrem (LSW a C4), za kterým by již měl být ideálně stejnosměrný signál s napětím úměrným střídě obdélníkového signálu. Přes diodu D3 teče proud dodávaný cívkou v době, kdy je Q1 uzavřen. Dioda D4 zamezí zkratování přepólovaného akumulátoru.

Tranzistory Q3, Q4 a Q5 tvoří budič výkonového MOSFET Q1. Budič zajišťuje úpravu signálu o napěťových úrovních CMOS 0 / 5 V na napěťové úrovně a proudové zatížení potřebné pro spínaní Q1. Při použitém kmitočtu spínání 31,25 kHz se již velmi nepříznivě projevuje kapacita hradla tranzistoru Q1, která způsobuje velké proudové zatížení budiče v okamžiku sepnutí a rozepnutí. Proto jsem použil tzv. push-pull zapojení tranzistorů Q4 a Q5, jehož výstup (tj. spojené emitory obou tranzistorů) je připojen na potenciál země nebo plného napájecího napětí, přičemž v obou stavech je možné odebírat vysoký proud.

Původně jsem testoval zapojení budiče Q1 jen s jedním tranzistorem a pull-up rezistorem. Tento budič ale neposkytoval dostatečný proud a docházelo ke zhoršení strmosti hran, snížení účinnosti a výraznému ohřevu tranzistoru Q1.

Princip funkce a řízení

Budící obdélníkový signál je generován mikropočítačem na základě hodnot napětí a proudu měřených A/D převodníkem (viz část 2.4. – Měření). Signál má konstantní kmitočet 31,25 kHz s proměnlivou střídou – jde tedy o pulzně-šířkovou modulaci (PWM). Čím vyšší je střída budícího signálu, tím delší část periody je tranzistor Q1 otevřen a tím větší napětí je na výstupu. Z hlediska účinnosti měniče a rozměrů součástek filtru je nejlepší co nejvyšší kmitočet. PWM generátor v použitém mikropočítači umožňuje použít i vyšší kmitočty avšak na úkor menšího počtu možných stavů střídy signálu. Při použitém kmitočtu umožňuje rozlišit 512 stavů střídy, což se ukázalo jako nejmenší použitelná hodnota pro zajištění plynulé regulace.

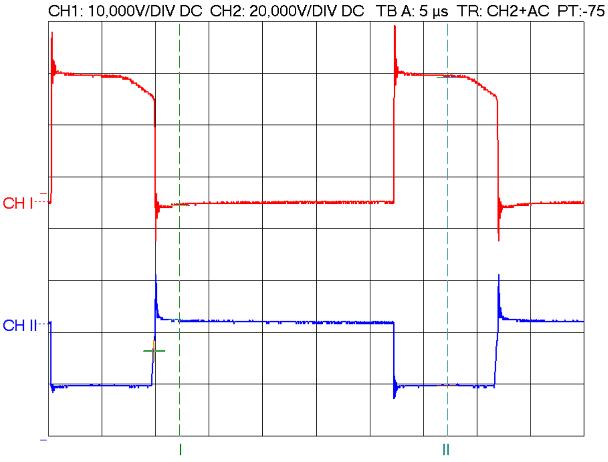
Měření hodnot výstupních veličin probíhá velmi rychle (několikrát za sekundu) a střída budícího signálu je neustále upravována tak, aby na připojené zátěži bylo požadované napětí nebo aby zátěží protékal požadovaný proud.

Díky přímému digitálnímu řízení může zdroj pracovat v režimu konstantního napětí nebo konstantního proudu.

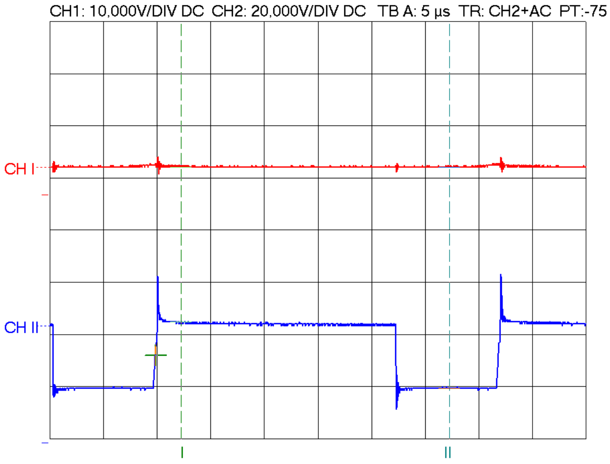
2.4.2. Zátěž

Aby bylo možné měřit vybíjecí charakteristiky, obsahuje výkonová část i řízenou zátěž, na které se energie odčerpávaná z akumulátoru mění v teplo. Tato část je tvořena darlingtonovým tranzistorem Q2 a výkonovým rezistorem RDIS. Regulace proudu odebíraného z akumulátoru je zajištěna, podobně jako u zdrojové části, pulzně-šířkovou modulací signálu spínajícího tranzistor. Drobnou nevýhodou je impulsní charakter zatěžovacího proudu, což je vyváženo relativně vysokým kmitočtem spínání – 31,25 kHz. Pokud by bylo potřeba zajistit zátěž čistě konstantním proudem, zapojení by se dosti zkomplikovalo – bylo by potřeba použít D/A převodník jako zdroj proudu pro tranzistor Q2.

Obr. 2: Příklad naměřených průběhů ve výkonové části
střída = 0,3; I_Z = 0,68 A; CH2: Průběh napětí na GATE Q1



CH1: Průběh napětí na DRAIN Q1



CH1: Průběh napětí na výstupu (U = 6,3 V)

2.4. Měření

Měření výstupního napětí a proudu je realizováno A/D převodníkem, který analogové veličiny převádí do číslicové formy pro zpracování mikropočítačem.

Potřebný rozsah měření napětí je do cca 25 V; proudu do 2,5 až 3 A (je nutná rezerva pro detekci přetížení). Měření proudu musí být možné v obou polaritách, protože při nabíjení teče proud do zátěže (akumulátoru), ale při vybíjení je energie odčerpávána a proud tedy teče opačným směrem.

2.4.1. Návrh

Měření velikosti výstupního napětí a proudu slouží k těmto účelům:

- regulace požadovaného výstupního napětí či proudu PWM modulací výkonové části
- řízení nabíjecích procesů pro různé typy akumulátorů
- ukládání nabíjecích a vybíjecích charakteristik

Z toho vyplývají požadavky na přesnost a rychlost měření. Z dále uvedených výpočtů vyplynulo, že bude nutné použít A/D převodník s rozlišením 16 bitů. Běžnější 12 bitové převodníky by neposkytovaly dostatečné rozlišení pro regulaci napětí a proudu. Např. při nabíjení NiCd nebo NiMH akumulátorů je nutné detekovat pokles napětí v jednotkách mV.

Rychlost měření by měla být alespoň jednotky až desítky hodnot za sekundu, více je samozřejmě lépe. Zde jsem narazil na negativní vlastnosti A/D převodníků na principu SAR (převodník s postupnou aproximací). Testoval jsem typ TLC4541 od *Texas Instruments*. Umožňuje měření až 200 000 vzorků za sekundu s rozlišením 16 bitů, ale hodnota mezi měřeními kolísala o desítky jednotek, nepomohlo ani průměrování většího množství hodnot.

Nakonec jsem zvolil 16 bitový dvoukanálový A/D převodník MX7705 [5] od *MAXIM Integrated Products*. Základní vlastnosti:

- rozlišení 16 bitů, princip Sigma - Delta
- 2 plně diferenční vstupní kanály
- nelinearita 0,003 %
- programovatelné zesílení 1 až 128

Sigma - Delta převodníky mají mnohem lepší vlastnosti než ostatní běžné typy. S použitými součástkami při stabilním vstupní napětí kolísá binární hodnota z převodníku max. o ±1. Nevýhodou je nízká rychlost měření. V použité konfiguraci převodník měří 100 vzorků/s. Bohužel přepínání vstupních kanálů trvá relativně dlouhou dobu, takže při využití obou kanálů a jejich přepínání po každém měření klesne rychlost na cca 2×15 vzorků/s. Pokud by se to ukázalo jako nedostatečné, bylo by nutné použít dva samostatné převodníky, kdy by byla rychlost již dostatečná. Převodník lze nastavit i pro rychlejší měření, pak ovšem výrazně klesá rozlišení (výstupní hodnota je nestabilní).

2.4.2. Realizace

Použitý A/D převodník má 2 přepínatelné vstupní kanály, které mohou měřit napětí v unipolárním nebo bipolárním režimu. Referenční napětí pro převodník dodává přesný zdroj IC2 typu REF3325 [7] od *Texas Instruments*. Na plošném spoji je oddělena analogová zem pro převodník od země pro ostatní obvody. Napájecí napětí pro tuto část je filtrováno L2, C10 až C14.

Velikost referenčního napětí U_{REF} = 2,5 V je zvolena tak, aby bylo možné využít plného rozsahu u bipolárních vstupů, kde plný rozsah odpovídá hodnotám $\pm U_{REF}$. Absolutní velikost napětí na vstupech je omezena napájecím napětím, $\pm U_{REF}$ právě odpovídá 5 V.

Měření napětí

Vstup A/D převodníku pro měření napětí je nastaven do unipolárního režimu – měření v jedné polaritě. Díky plně diferenčním vstupům převodníku stačí pro přizpůsobení rozsahu prostý odporový dělič z rezistorů R10, R11 a R12.

Převodní poměr děliče:

$$p = \frac{\mathrm{R10}}{\mathrm{R10} + \mathrm{R11} + \mathrm{R12}} = \frac{\mathrm{5k1}}{\mathrm{5k1} + \mathrm{43k} + \mathrm{3k9}} = 0{,}09808$$

Maximální měřitelná hodnota na vstupu (odpovídá referenčnímu napětí 2,5 V):

$$U_{INMAX} = \frac{U_{REF}}{p} = 25{,}49\ \mathrm{V}$$

Rozlišení základního rozsahu (1 LSB):

$$U_{LSB} = \frac{U_{INMAX}}{2^{16}} = 0{,}39\ \mathrm{mV}$$

Měření proudu

Měření proudu je komplikováno potřebou zpracování obou polarit. Snažil jsem se o co nejjednodušší a nejelegantnější řešení. Při návrhu jsem vycházel ze zapojení uvedených v [1]. Výsledkem je zapojení s jedním bočníkem a diferenčním zesilovačem.

Napětí na bočníku (tvořen paralelní kombinací R1 a R2) může být podle směru proudu kladné nebo záporné (proti zemi GND). Toto napětí je snímáno a zesilováno diferenčním zesilovačem s OZ IC7. Abych se vyhnul symetrickému napájení operačního zesilovače, použil jsem zapojení s posunutou výstupní nulou. Při nulovém měřeném proudu je na výstupu OZ napětí 2,5 V (U_{REF}); pro maximální kladný resp. záporný proud se pohybuje v rozsahu 5 V / 0 V. Tyto hodnoty napětí jsou už přímo zpracovatelné vstupem A/D převodníku

v bipolárním režimu. Vstup pracuje jako diferenční se záporným pólem připojeným na U_{REF} a kladným pólem na výstup OZ.

Na relativně malému odporu bočníku je napětí pouze 75 mV na 1 A. Jeho odpor není možné příliš zvyšovat, protože vyšší výkonová ztráta by způsobila zvýšení teploty, změnu jeho odporu a tím chybu měření. Zde jsou kritické parametry operačního zesilovače. Např. offset (vstupní napěťová nesymetrie) se u běžných typů OZ pohybuje v jednotkách mV, to by způsobilo chybu měření proudu v desítkách až stovkách mA.

Použil jsem precizní OZ OPA335 [6] od *Texas Instruments*. Základní parametry:

- vstupní offset < 5 μV
- teplotní drift < 0,05 μV/°C
- jediný napájecí zdroj, rail-to-rail výstup

Zisk diferenčního zesilovače:

$$p = \frac{\mathrm{R14}}{\mathrm{R15}} = \frac{43}{3{,}9} = 11{,}03$$

Maximální měřitelná hodnota na vstupu (odpovídá referenčnímu napětí 2,5 V):

$$I_{INMAX} = \frac{U_{REF}}{p} \cdot \frac{1}{\mathrm{R}_{\mathrm{SENSE}}} = 3{,}023\ \mathrm{A}$$

Rozlišení základního rozsahu (1 LSB):

$$U_{LSB} = \frac{I_{INMAX}}{2^{16}} = 0{,}046\ \mathrm{mA}$$

Vypočítané hodnoty rozlišení nelze považovat za užitečné výsledné rozlišení. Vlivem konečného počtu poloh PWM modulace pro výkonovou část budou měřené veličiny při regulaci kolísat. Pro potřeby řízení nabíjecího procesu a ukládání charakteristik bude nutné provádět průměrování a zaokrouhlování, které použitelné rozlišení mírně sníží.

2.5. Konstrukční poznámky k plošným spojům

Deska hlavního plošného spoje je jednostranná, přesné rozměry jsou 100 × 160 mm. Aby bylo zajištěno slícování rozměrů s drážkami v krabičce, ve kterých deska drží, je její tvar upraven frézováním. Stejným způsobem je vytvořen i výřez pro ventilátor v jedné z kratších hran.

Z rozměrových důvodů je část součástek v provedení pro plošnou montáž – SMD. Zejména kvůli snadnému pájení pouzdra TQFP44 je plošný spoj pocínován. Některé spoje bylo nutné realizovat drátovými propojkami na horní straně DPS.

Druhý plošný spoj (označen `Nabijec/BT`), slouží pouze k mechanickému upevnění tlačítek. Je pomocí pěti krátkých vodičů připojen na konektor JB hlavní desky.

Plošné spoje jsem nechal vyrobit ve firmě Pragoboard s.r.o. V rámci výroby byly provedeny všechny uvedené technologické operace včetně frézování obrysu a vrtání otvorů různých průměrů.

Výkresy obou plošných spojů a osazení součástek jsou v příloze B.

3. Software pro mikropočítač

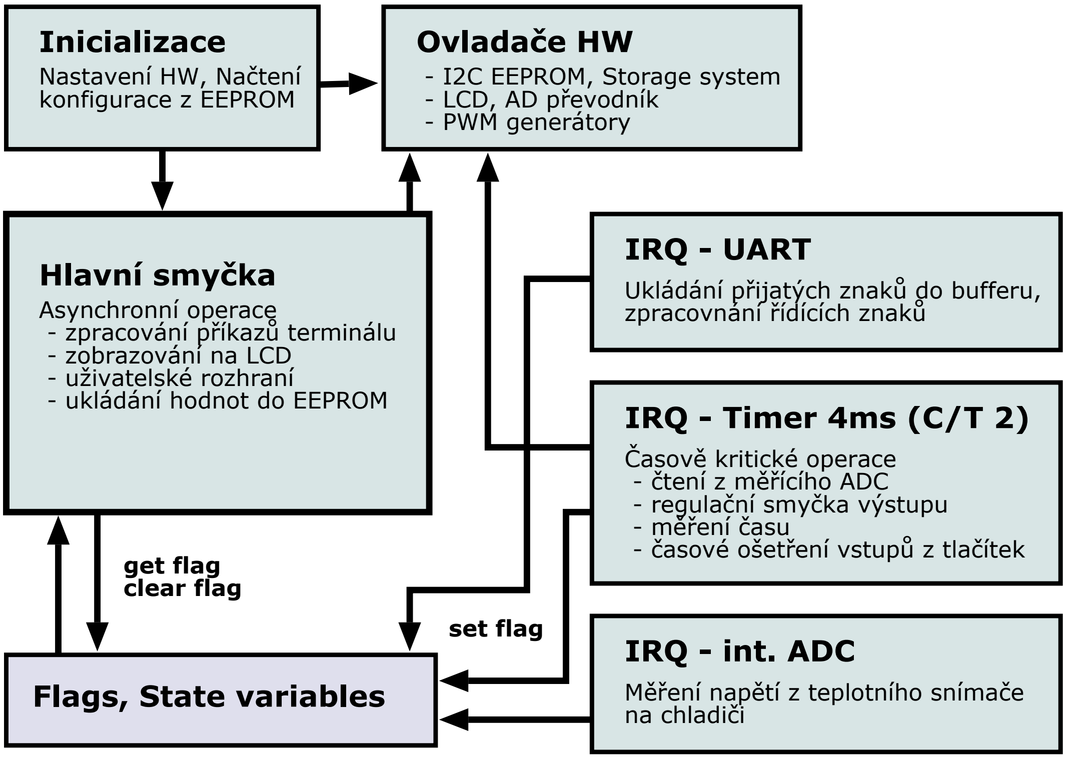
Řídící software pro jednočipový mikropočítač AVR jsem se rozhodl vyvíjet v jazyce C.

Jazyk C jsem zvolil hlavně z důvodu existence kvalitního svobodného kompilátoru GCC (GNU Compiler Collection) [10] a vývojového prostření WinAVR [9].

Vývoj softwaru ještě není úplně dokončen, ale všechny části jsou ve funkčním a použitelném stavu. Dokumentace ke zdrojovým kódům je zatím z větší části pouze v komentářích a v hlavičkových souborech. U rozpracovaných částí by bylo obtížné programátorskou dokumentaci průběžně aktualizovat a udržovat. Základní části softwaru, systémová architektura a některá zajímavá dokončená řešení jsou popsána v dalších kapitolách.

Aktuální verze zdrojových kódů je na přiloženém CD – příloha E.

3.1. Architektura systému



Obr. 3: Architektura softwaru pro mikropočítač Atmel AVR

Po resetu program začíná inicializací veškerého hardwaru (časovače, PWM, I2C sběrnice, LCD, A/D převodník) a je načtena konfigurace z EEPROM. Součástí konfigurace jsou:

- kalibrační konstanty pro přepočet načtených hodnot z A/D převodníku na skutečné hodnoty napětí a proudu.
- poslední uživatelem nastavené hodnoty pro algoritmy vybíjení a nabíjení (proud, kapacita, počet článků, …).

Poté jsou povolena přerušení a běží hlavní smyčka.

V hlavní smyčce programu jsou vykonávány dlouho trvající nebo časově nekritické operace, tj. zpracování příkazů přijatých sériovým terminálem, aktualizace údajů na LCD, ukládání hodnot do EEPROM a další.

Synchronizace operací v hlavní smyčce je zajištěna pomocí bitových proměnných (*Flags*) a stavových proměnných (*State variables*), které jsou nastavovány v obsluze přerušení.

3.1.1. Plánovací časovač

Časovač, který je součástí mikropočítače a běží nezávisle na spuštěném kódu zajišťuje skrze přerušení obsluhu časově kritických operací. Je nastaven tak, že přerušení je vyvoláno každé 4 ms. Pomocí několika proměnných je tato perioda dále dělena pro dosažení potřebných časů.

V obsluze přerušení je prováděno s periodou:

- 4 ms – čtení stavu tlačítek
- 32 ms – čtení hodnoty z A/D převodníku; po 64 ms je k dispozici jeden pár hodnot napětí a proudu a je volána regulační smyčka, která upraví hodnoty PWM
- 1 s – počítaní času nabíjení
- 0,96 s – průměrování 15 párů hodnot × 64 ms – průběžné měření kapacity, zobrazování hodnot, v násobcích 0,96 s ukládání charakteristik

Konfigurace časovače

Pro plánovací časovač (`scheduler`) je využit 8 bitový časovač/čítač 2 (Timer/Counter 2).

- Mode: Clear Timer on Compare Match (CTC) [`WGM21:WGM20 = 10`]
- `OCR0` = 249
- Prescaler (dělička) = 256 [`CS22:CS20 = 110`]
- Output Compare Match Interrupt Enabled

Perioda přerušení bude:

$$f_{OC} = \frac{f_{CLK}}{prescaler \cdot (1 + \mathrm{OCR2})} = \frac{16 \cdot 10^6}{256 \cdot 250} = 250\ \mathrm{Hz} \Rightarrow T = \frac{1}{f} = 4\ \mathrm{ms}$$

Konfigurační registr časovače – **`TCCR2`**:

FOC2	WGM20	COM21	COM20	WGM21	CS22	CS21	CS20
0	0	0	0	1	1	1	0
0b00001110							

3.1.2. Generování PWM

Generování PWM signálu pro výkonovou část zajišťuje 16 bitový časovač/čítač 1, který disponuje dvěma výstupy s možností generování PWM.

Konfigurace časovače

- Mode: Fast-PWM (pro dosažení nejvyššího možného kmitočtu)
- `WGM13:WGM10` = 0110 (Fast-PWM, rozlišení 9bit)
- Prescaler (dělička) = 1 [`CS12:CS10 = 001`]
- `COM1A1/COM1B1` = 1; `COM1A0/COM1B0` = 0 (pozitivní PWM)

Kmitočet generovaného signálu bude:

$$f_{OC} = \frac{f_{CLK}}{prescaler \cdot 512} = \frac{16 \cdot 10^6}{1 \cdot 512} = 31{,}250\ \mathrm{kHz}$$

Konfigurační registr časovače – **TCCR1A**:

COM1A1	COM1A0	COM1B1	COM1B0	FOC1A	FOC1B	WGM11	WGM10
1	0	1	0	0	0	1	0
0b10100010							

Konfigurační registr časovače – **TCCR1B**:

ICNC1	ICES1	-	WGM13	WGM12	CS12	CS11	CS10
0	0	-	0	1	0	0	1
0b00-01001							

Hodnoty PWM modulace v rozsahu 0 až 511 (tj. 9 bitů) se zapisují do 16 bitových registrů `OCR1AH:OCR1AL` a `OCR1BH:OCR1BL`.

3.1.3. Sériový terminál

Komunikace přístroje přes rozhraní RS232 je řešena formou terminálu. Přijímané znaky jsou průběžně ukládány do vyrovnávací paměti (buffer), po příjmu řídícího znaku CR je nastavena stavová proměnná terminálu. Přijatý řetězec je následně v hlavní smyčce porovnán s tabulkou příkazů. V případě nalezení příkazu je zavolána jemu odpovídající funkce, která může zpracovat také parametry oddělené od názvu příkazu mezerou. Funkce odpovídající příkazu běží v kontextu hlavní smyčky, může tedy provádět i časově náročné operace (zejména zápis do EEPROM).

Příkaz může mít i charakter trvalého běhu (např. kontinuální výpis hodnot), který je přerušen příjmem libovolného znaku. Pokud obslužná funkce před návratem patřičně upraví stavovou proměnnou terminálu, je tato funkce při dalším průchodu hlavní smyčkou volána znovu.

Po dokončení příkazu nebo přerušení běhu kontinuálního příkazu je terminál připraven zpracovat další příkaz.

3.1.4. Ukládání charakteristik do EEPROM

Struktura dat v paměti by měla zajišťovat:

- možnost uložit několik „souborů“ s charakteristikou dokud je volné místo v paměti
- při výpadku napájení a tedy nedokončeném zápisu nesmí být porušena datová struktura – musí být zajištěno korektní přečtení všech záznamů kromě posledního
- spolehlivé čtení souborů, do kterých se právě zapisuje (korektní přenos charakteristik do PC i v době zápisu)
- jednoduchost implementace v C
- minimalizace počtu zápisů z důvodu životnosti paměti a relativně dlouhé doby zápisu

Použitá EEPROM typu 24LC256 velikosti 32 KiB je hardwarově členěna na 512 stránek o velikosti 64 B. První 4 stránky (256 B) v paměti jsou vyhrazeny pro konfigurační data, zbylá kapacita může být využita pro uložení měřených charakteristik.

Čtení je možné sekvenčně bez ohledu na stránky. Zápis je omezen vždy na jednu fyzickou stránku a trvá 5 ms bez ohledu na počet zapsaných bytů.

Z důvodu omezení na zápis v rámci jedné stránky a požadavku na minimální množství dlouhých zápisových operací je nejvhodnější ukládaná data organizovat po 64 B stránkách.

Data jsou ukládána ve formě záznamů dlouhých 4 B, první 2 B nesou velikost napětí, další 2 B velikost proudu. První 2 záznamy (8 B) první stránky souboru nejsou využity pro hodnoty, ale pro informace o souboru (např. perioda zápisu).

Aby bylo možné rozlišit počátek a konec souboru, nese první byte informaci o stavu stránky (viz tabulka) – 60 B je využito pro 15 záznamů po 4 B, zbylé 3 B pro budoucí využití.

kód (první byte)	první stránka souboru	soubor pokračuje na další stránce	počet záznamů na stránce
0xE0	ano	ne	0 (prázdný soubor)
0xE1 ÷ 0xEF	ano	ne	kód & 0x0F (1 až 15)
0xF0	ano	ano	15
0x01 ÷ 0x0F	ne	ne	kód & 0x0F (1 až 15)
0x10	ne	ano	15

Operace vložení záznamu je vždy realizována dvěma zápisy – nejdříve jsou zapsány 4 B dat, až pak je aktualizován údaj v hlavičce stránky. Tak se zajistí korektní struktura dat i v případě výpadku napájení – pokud není dokončena aktualizace hlavičky stránky, je předchozí záznam považován za konec souboru. Při zápisu na novou stránku se zapíše na její začátek 5 B – hlavička 0x01 a 4 B dat, druhý zápis aktualizuje hlavičku předchozí stránky. Druhý záznam na nové stránce se již zapíše normálně.

Čtení souborů je realizováno sekvenčně po bytech s orientací podle hlavičky každé stránky.

Při založení nového souboru je potřeba najít začátek volného místa v paměti. K nalezení konce posledního souboru stačí sekvenčně projít jen hlavičky stránek. Stejný algoritmus je aplikován při výpisu seznamu všech souborů.

Zatím není dořešena podpora fragmentace souborů (soubor tedy musí být tvořen souvislou řadou stránek). V případě, že je v paměti uloženo více souborů, je tedy možné mazat jen poslední z nich. Pro doplnění podpory fragmentace budou pravděpodobně využity zbylé 3 B na konci každé stránky.

3.1.5. Měření teploty chladiče a spínaní nuceného chlazení

Pomocí jednoduchého odporového děliče je teplota měřená odporovým čidlem s pozitivní teplotní závislostí převedena na napětí. To je měřeno interním A/D převodníkem v ATmega16 s rozlišením 10 bitů, je využit interní zdroj referenčního napětí 2,56 V.

Každou sekundu je v přerušení časovače spuštěn převod. Dokončení převodu vyvolá vlastní přerušení, kde je zjištěná hodnota porovnána s definovanými mezemi a při jejich překročení je zapnuto nebo vypnuto napájení ventilátoru. Naměřenou hodnotu není třeba převádět na skutečnou teplotu ve stupních celsia, stačí pouze relativní srovnání.

Hodnoty přečtené převodníkem pro konkrétní teploty lze vypočítat s využitím tabulky závislosti odporu na teplotě uvedené v katalogovém listu čidla [15]:

$$ADC = 1023 \cdot \left(\frac{R_T}{R_T + R_S} \right)$$

kde: R_T odpor čidla dle katalogového listu
R_S odpor sériového rezistoru = 3300 Ω

3.1.6. Zpracování vstupu z tlačítek

Programový kód pro obsluhu uživatelského vstupu z tlačítek řeší:

- Ošetření zákmitů, které vznikají na mechanických spínačích – bez toho by docházelo k několikanásobné detekci jednoho stisknutí.
- Periodické generování události při trvale stisknutém tlačítku – při nastavování číselných hodnot v menu je pak hodnota zvyšována nebo snižována s větším krokem než při jednotlivém stisknutí.
- Předání zprávy o stisku tlačítka aktuálně zobrazenému bloku uživatelského rozhraní.

Čtení stavu portu `PORTB`, ke kterému jsou připojena tlačítka, probíhá v obsluze přerušení plánovacího časovače. Časování všech funkcí je odvozeno jako násobky periody přerušení.

Při první detekci stisknutého tlačítka je generována událost nastavením bitu `event_flag` v proměnné `bt.state`.

Návrat do výchozího stavu se provede, když je 15× po sobě (tj. 60 ms) stav tlačítka přečten jako rozepnutý. Tím se odstraní projevy zákmitů.

Je-li tlačítko stisknuto déle než 400 ms, je potom každých 200 ms generována událost stejně jako na počátku stisknutí. Podle proměnné `bt.state` je možné rozlišit, že jde o trvalý stisk.

Pokud je nastaven `event_flag`, tj. je vygenerována událost, je při nejbližším průchodu hlavní smyčkou (viz obr. 3) proveden kód:

```
ui_handler(bt.id);
```

kde `ui_handler` je pointer odkazující na funkci, která zpracovává události pro aktuálně zobrazený blok uživatelského rozhraní a `bt.id` identifikuje, které tlačítko bylo stisknuto. Zároveň je bit `event_flag` nastaven na 0, takže pro každou událost proběhne obsluha v hlavní smyčce právě jednou.

Výsledný kód efektivně řeší uvedené úkoly, jeho drobné omezení spočívá v tom, že není možné zpracovávat stisk více tlačítek najednou.

3.2. Komunikační protokol

Komunikace přes rozhraní RS232 je založena na principu příkaz – odpověď. Celá komunikace včetně přenosu uložených charakteristik probíhá jako ASCII text.

- Příkaz je vždy vyslán nadřízeným systémem. Příchozí znaky jsou ukládány do bufferu, znak CR značí konec příkazu a vyvolá jeho zpracování.
- Jako reakci na příkaz vyšle přístroj odpověď, která může být tvořena i několika řádky a je zakončena novým řádkem a znakem ‘`:`’. V případě přijetí neexistujícího příkazu je jako odpověď vyslán znak ‘`*`’.

Formát přenosu čísel v hexadecimálním tvaru

Hodnoty v parametrech příkazů a ve výstupech příkazů jsou přenášeny ve formě hexadecimálního vyjádření ASCII znaky. Byte (8 bitů) je tvořen dvojicí znaků `1-9` a `a-f`. Hodnoty o rozsahu 16 bitů jsou tvořeny 4 znaky, vyšší byte se přenáší první.

3.2.1. Operace s úložištěm charakteristik

Úložiště charakteristik může obsahovat více souborů, které jsou identifikovány sériovým číslem, které je potřeba znát při čtení obsahu souboru.

Při volbě ukládání charakteristiky v menu přístroje se zobrazí číslo právě vytvořeného souboru, podle kterého se lze při přenosu dat z přístroje orientovat.

Sériové číslo souboru je shodné s vyšším bytem adresy začátku souboru v EEPROM. Soubor vždy začíná na adrese s nulovým nižším bytem, takže jeho číslo je unikátní.

Použité symboly:

- aa sériové číslo souboru; 1 B hexa
- vv přečtená hodnota z paměti; 1 B hexa

Výpis uložených souborů

```
command: fs l
reply:   aa1 aa2 aa3 … aan
         aaf
```

1. řádek – seznam sériových čísel souborů oddělených mezerami
2. řádek – sériové číslo nového souboru – adresa začátku volného prostoru na konci paměti

Přečtení dat ze souboru

```
command: fs daa
reply:   vv1vv2vv3 … vv64
         vv65vv66vv67 … vv128
         vv129vv130 … vvn
```

Data ze souboru jsou vypisována po bytech v pořadí, jak jsou uloženy v paměti. Každých 64 byte (1 stránka) je odděleno znakem nového řádku.

Smazání souboru

```
command: fs xaa
reply:   <
```

Protože zápis nového souboru je vždy započat za posledním uloženým souborem, má smysl mazat pouze poslední uložený soubor.

3.2.2. Nastavení kalibračních konstant

Kalibrační konstanty se používají při převodu hodnot z A/D převodníku na skutečné hodnoty napětí a proudu.

Použité symboly:

- vvvv hodnota kalibrační konstanty; 2 B hexa

Kalibrace měření napětí - přečtení aktuální hodnoty

```
command: calu
reply:   vvvv
```

Kalibrace měření napětí - zápis nové hodnoty

```
command: calu vvvv
reply:   vvvv
```

Kalibrace měření proudu - přečtení aktuální hodnoty

```
command: cali
reply:   vvvv
```

Kalibrace měření proudu - zápis nové hodnoty

```
command: cali vvvv
reply:   vvvv
```

Uložení konfigurace

```
command: cfg s
reply:   <
```

Nastavené hodnoty jsou uloženy pouze do RAM. Pro jejich zachování i po vypnutí napájení jsou tímto příkazem uloženy do EEPROM odkud jsou během inicializace načteny.

3.2.3. Přímý přístup do EEPROM

Použité symboly:

- aaaa adresa pro čtení / zápis; 2 B hexa
- vv hodnota k zápisu / přečtená hodnota; 1 B hexa

Čtení 1 byte

```
command: eepr aaaa
reply:   vv
```

Zápis 1 byte

```
command: eepw aaaavv
reply:   <
```

3.2.4. Výpis provozních dat

Pro účely ladění a kontroly činnosti umožňuje tento příkaz kontinuální výpis dále popsaných údajů. Výpis je ukončen po příjmu libovolného znaku. Údaje jsou pro snadnou čitelnost vypisovány v desítkovém formátu.

```
command: d
reply:   -04729 03292 128 i05000  00473 00329
         …
```

Výstup příkazu je nejlépe ilustrován příkladem reálných hodnot, vysvětlení:

- aktuální hodnota proudu a napětí z AD převodníku bez průměrování
  `-472,9 mA` (záporná hodnota při vybíjení); `3,292 V`
- střída PWM signálu pro výkonový stupeň (rozsah 0 až 512)
  `128` = střída 0,25
- režim regulátoru a požadovaná hodnota
  `i` – konst. proud; `u` – konst. napětí; `500 mA`
- průměrované a zaokrouhlené hodnoty napětí a proudu (průměr 15 hodnot, tj. 960 ms)
  `473 mA`; `3,29 V`

3.2.5. Ruční nastavení regulátoru

Při testování a ladění nabíjecích algoritmů je možné tímto příkazem nastavit regulátor výstupních veličin do jednoho z režimů:

Nabíjení konstantním napětím

```
command: reg uuuuu
reply:   uuuu
```

Nabíjení konstantním proudem

```
command: reg iiiii
reply:   iiii
```

Vybíjení konstantním proudem

```
command: reg diiii
reply:   iiii
```

Použité symboly:

- `uuuu` napětí v jednotkách mV; 2 B hexa
- `iiii` proud v desetinách mA; 2 B hexa

4. Typy akumulátorů a metody nabíjení

Princip nabíjení se u akumulátorů s různým chemickým složením značně liší. Nedodržení dále uvedených zásad obvykle vede ke znatelnému snížení životnosti akumulátorů. Hlavně v tomto ohledu by se měl navrhovaný nabíječ lišit od běžných komerčních výrobků.

Nejběžnější používané typy akumulátorů a vysvětlení zkratek:

- NiCd – Nickel Cadmium
- NiMH – Nickel Metal Hydridde
- SLA – Sealed Lead Acid – zapouzdřené olověné akumulátory
- Li-ion – Lithium-ion

Při získávání informací o metodách nabíjení různých typů akumulátorů jsem čerpal převážně z webu batteryuniversity.com [14], kde je kromě těchto informací mnoho dalších článků, které se zabývají vlastnostmi a praktickým použitím akumulátorů pro různé aplikace.

Pozn.: Velikost nabíjecího proudu závisí zejména na jmenovité kapacitě akumulátoru. Pro přehlednost je zavedena jednotka *C*. Pro akumulátor s jmenovitou kapacitou 1000 mAh odpovídá 1 *C* proudu 1 A.

4.1. Akumulátory NiCd a NiMH

NiCd – vhodné úplné vybití jednou za měsíc, nevadí úplné vybíjení

NiMH – vhodné úplné vybití jednou za tři měsíce, není vhodné pomalé nabíjení, pro delší životnost je vhodné vybíjení pouze z 80 %

Za úplné vybití se považuje dosažení napětí 1 V na článek. Při používání rychlého nabíjení se *nedoporučuje* baterii pokaždé úplně vybíjet.

Během nabíjení by se baterie měla co nejméně zahřívat, protože vysoké teploty výrazně snižují její životnost. Určitému nárůstu teploty během nabíjení, zejména na jeho konci, se nelze vyhnout, ale tato doba by měla být minimalizována. Zejména při rychlém nabíjení je nutné přesné ukončení nabíjení vysokým proudem a přechod do udržovacího režimu. V udržovacím režimu (nabíjení malým proudem, viz dále) by měla teplota klesnout na úroveň okolí, jinak je nabíjení prováděno špatně. Toto platí zejména pro NiHH akumulátory, kterým přebíjení velmi škodí.

Nové NiCd nebo NiMH baterie by měly být před prvním použitím nabity malým proudem po dobu 24 hodin, aby se vyrovnalo napětí na jednotlivých článcích. Plné kapacity akumulátoru bývá dosaženo až po tzv. zformování, což představuje 5 až 7 nabíjecích cyklů.

Používají se tři základní způsoby nabíjení:

1) Pomalé nabíjení

Po celou dobu nabíjení konstantní proud 0,1 C, trvá 14 až 16 hodin, účinnost je jen 70 %.

Při takto malém nabíjecím proudu nelze plné nabití rozlišit poklesem napětí na článcích, ale jen dosažením stanoveného času. U NiMH hrozí přebití.

2) zrychlené nabíjení

Trvá zhruba 3 až 5 hodin, tomu odpovídá nabíjecí proud cca 0,3 až 0,5 C. Kompromis mezi pomalým a rychlým nabíjením.

3) rychlé nabíjení

Tento způsob je nejvýhodnější, protože eliminuje tzv. paměťový efekt akumulátoru. Úplné nabití trvá pouze kolem jedné hodiny. Nabíjecí proud 1 C, účinnost kolem 90 %. Extrémně důležitá je správná detekce plného dobití.

Do cca 70 % nabití se akumulátor téměř nezahřívá a všechna dodaná energie je efektivně využita, v této fázi může být nabíjecí proud i větší než 1 C. Po dosažení 70 % úrovně nabití velmi klesá schopnost akumulátoru absorbovat další energii, dochází k výraznému zvýšení teploty. Články s velmi vysokou kapacitou mají tendenci se ohřívat výrazně více než běžné typy. Tomu by měl být přizpůsoben průběh nabíjecího proudu – ze začátku je možné použít až několikanásobně vyšší proud, v závěrečné fázi je snížen pod 1 C.

Úplné nabití se detekuje poklesem napětí o 20 mV (8 až 16 mV u NiMH) na článek za 1 minutu (záporná hodnota derivace napětí dV/dt). Tato metoda je velmi přesná, ale pokud pokles napětí nenastane v průběhu maximálního času (90 minut pro proud 1 C), musí být nabíjení též ukončeno.

Pak následuje fáze tzv. udržovacího nabíjení. Pro NiCd může být proud v tomto režimu až 0,1 C; pro NiMH menší než 0,05 C.

Maximální napětí, kterého může být dosaženo je 1,5 V na článek.

4.2. Akumulátory SLA

Následující informace platí převážně pro uzavřené olověné akumulátory, někdy též označované jako gelové. Fungují na stejném principu jako klasické olověné akumulátory, ale elektrolyt je napuštěn ve speciálním materiálu, který nedovolí jeho přelévání. Tyto akumulátory se běžně používají v kapacitách do cca 30 Ah např. v záložních zdrojích pro výpočetní techniku.

Rychlé nabíjení není u olověných akumulátorů možné. Nabíjení trvá 12 až 16 hodin, u baterií velkých kapacit je možné nabíjení prodloužit na 36 hodin. Při vyšším nabíjecím proudu a přesném řízení cyklu lze dosáhnou plného nabití za 10 hodin.

Ideální nabíjení olověného akumulátoru probíhá ve třech fázích:

1) Konstantní proud při rostoucím napětí. Ukončeno při dosažení určitého napětí na 1 článek akumulátoru (viz dále). Trvá cca 5 hodin, nabití na 70 %.

2) Konstantní napětí, proud klesá. Tato fáze je důležitá pro udržení akumulátoru v dobrém stavu, zejména s ohledem na schopnost opětovného plného nabití. Ukončení je detekováno poklesem proudu na 3 %. Trvá dalších 5 hodin.

3) Udržovací nabíjení napětím 2,25 V na článek (13,5 V). Napětí použité ve 2. cyklu nesnese akumulátor déle než 48 hodin.

Nabíjecí proud může být v rozsahu 0,1 C až 0,3 C. Cílové napětí na 1 článek je od 2,3 V (13,8 V) do 2,45 V (14,7 V).

Při volbě nižšího napětí se dosáhne vyšší životnosti, ale nabíjení trvá déle a není dosaženo plné kapacity. Vyšší napětí umožňuje rychlejší nabití na plnou kapacitu, ale dochází k zahřívání akumulátoru a hrozí přebití.

Olověné akumulátory musí být stále udržované v nabitém stavu. Při poklesu napětí pod 2,1 V na článek dochází k tzv. hlubokému vybití. Je velmi obtížné takový akumulátor regenerovat.

4.3. Li-ion akumulátory

Akumulátory na bázi lithia mají z hlediska nabíjení velmi příznivé vlastnosti. I při nižším nabíjecí proudu je možná spolehlivá detekce plného nabití. Paměťový efekt známý u akumulátorů NiCd a částečně NiMH se vůbec neprojevuje. Li-ion akumulátor je tedy možné nabít na plnou kapacitu v libovolném stupni vybití.

Pozn.: Dále uvedená napětí jsou vždy vztažena na jeden článek.

Jediná metoda nabíjení těchto akumulátorů:

1) Nabíjení konstantním proudem 0,5 C až 1 C. Tato fáze je dokončena dosažením napětí 4,2 ± 0,05 V. Trvá cca 1 hodinu, dosaženo nabití na 70 %.

2) Nabíjení konstantním napětím. Plného nabití je dosaženo při poklesu proudu na 3 % úvodního nabíjecího proudu. Tato fáze trvá cca 2 hodiny.

Trvalé udržovací nabíjení se nepoužívá, vedlo by k poškození článků. Při poklesu napětí pod 4,05 V, což nastává vlivem samovybíjení asi po 20 dnech, je znovu aktivován nabíjecí cyklus.

Zvyšování proudu v první fázi nad 1 C nemá smysl, cílového napětí se dosáhne dříve, ale následující fáze trvá déle. Snížením cílového napětí z 4,2 V na 4,1 V klesne kapacita o 10 %, ale prodlouží se životnost. U větších akumulátorů s kapacitou nad 1000 mAh by měl být nabíjecí proud v první fázi pod 0,8 C.

Celková doba nabíjení je kolem 3 hodin. Nabíječe, které zvládají nabití za 1 až 2 hodiny ve skutečnosti zkracují nebo vynechávají druhou fázi nabíjení s konstantním napětí a akumulátor je nabit pouze na cca 70 %.

U lithiových akumulátorů vede vybití na příliš malé napětí (pod 2,5 V) až k nevratnému zničení.

5. Mechanická konstrukce

5.1. Návrh a realizace

Při návrhu mechanického uspořádání jsem byl veden snahou o funkční a čistý design.

Jako kryt přístroje jsem použil krabičku z eloxovaného hliníku typu `AKG 105 46 160 ME` z nabídky firmy Fischer elektronik [13]. Tuto možnost jsem zvolil z důvodu vhodných rozměrů, materiálu a vzhledu. Značnou výhodou jsou také připravené drážky pro upevnění plošného spoje o rozměrech 160 × 100 mm.

Příloha C obsahuje detailní výkresy všech upravovaných součástí.

Krabička se skládá ze 2 shodných profilů tvaru U a ze dvou čelních krytů s připravenými otvory pro zápustné šrouby M3. Čelní kryty jsou přišroubovány do připravených závitů v rozích horního a spodního profilu.

V levém čele krabičky je otvor pro konektor rozhraní RS232 a drážky pro nasávání vzduchu. V pravém čele jsou otvory pro napájecí a výstupní konektor a velký kulatý otvor pro ventilátor 40 × 40 mm. Otvory v horním krytu zpřístupňují displej a 4 ovládací tlačítka.

Deska plošného spoje s elektronikou je zasunuta v drážkách spodního profilu, v případě potřeby ji lze jednoduše vyjmout. Přímo na desce jsou zapájeny všechny konektory. Jejich pozice přesně odpovídají otvorům v čelních krytech krabičky.

K hlavní desce je přišroubován hliníkový chladící profil (typ `SK 48 37,5 SA` z katalogu Fischer Elektronik), který zajišťuje rozptyl tepla z výkonových tranzistorů a zatěžovacího rezistoru. Poloha chladiče je zvolena tak, by byl co nejlépe ochlazován prouděním vzduchu.

Modul displeje je čtyřmi šrouby M2,5×30 připevněn k hlavnímu plošnému spoji. Obdélníkový výřez v horním krytu krabičky po uzavření lícuje s rámečkem displeje.

Mechanické upevnění tlačítek je řešeno pomocnou deskou s plošnými spoji (viz příloha B.4), která je dvěma šrouby M2,5×30 připevněna k hlavnímu plošnému spoji tak, že tlačítka přesně procházejí skrz otvory v horním krytu krabičky s přesahem cca 1 mm.

Zvolené konstrukční uspořádání je náročné na přesnost rozměrů a pozic dodatečně vytvářených otvorů v krabičce, ale umožnilo vytvoření čistého designu bez viditelných šroubů pro připevnění konektorů, displeje a tlačítek. Omezení drátových spojů ke konektorům také přispívá ke zvýšení spolehlivosti.

5.2. Technologický postup

Pro zajištění dostatečné přesnosti výroby otvorů v jednotlivých dílech krabičky jsem zvolil obrábění na CNC frézce.

Příloha D obsahuje výpisy programů pro řídící systém Heidenhain. Použitý nástroj pro všechny operace je drážkovací fréza ∅ 2 mm. Samostatně jsou uvedeny programy pro obrábění jednotlivých dílů, tj. levé čelo, pravé čelo a horní víko. Vztažný bod (souřadnice X = 0; Y = 0) je vždy v levém dolním rohu dílu. Pracovní souřadnice v ose Z = –10.

6. Závěr

6.1. Ověření funkce a měření

6.1.1. Přesnost měření napětí a proudu

Ověření přesnosti měření napětí a proudu A/D převodníkem v sestaveném přístroji jsem ověřoval pomocí přesného laboratorního multimetru Metra M1T 380 s udávanou základní přesností 0,01 %. Před měřením jsem nastavil kalibračních konstanty napětí a proudu v nabíječi podle referenčního měřidla na hodnotách 20 V a 1 A.

První měření jsem provedl pomocí regulovatelného stejnosměrného zdroje, kdy jsem určil relativní chybu pro 10 hodnot napětí a proudu rovnoměrně rozložených v rámci rozsahů. V tomto případě byla relativní chyba v celém rozsahu *< 0,05 % u napětí* a *< 0,1 % u proudu*.

Při skutečné činnosti nabíječe je proud dodáván interním spínaným zdrojem. Časový průběh napětí a proudu pak není čistě stejnosměrný, ale obsahuje zákmity pronikající filtrem zdroje, které ovlivňují přesnost měření.

Druhé měření probíhalo s aktivním zdrojem v nabíječi, jehož výstup byl zatížen rezistorem. Z výše uvedených důvodů byla v tomto případě relativní chyba vyšší. Pro několik různých zatěžovacích odporů jsem provedl vždy 10 měření napětí a proudu. Po mírné úpravě kalibračních konstant jsem ve všech případech při srovnání hodnot měřených nabíječem a referenčním přístrojem dosáhl rel. chyby měření *< 0,5 % u napětí* a *< 1,5 % u proudu*.

Dosažené hodnoty považuji za dostatečné pro danou aplikaci. Výsledek druhého měření je ovlivněn také nepřesností referenčního přístroje, který pro toto měření nebyl nejvhodnější.

6.1.2. Ověření funkce

Pro otestování funkce přístroje jsem použil tyto akumulátory:

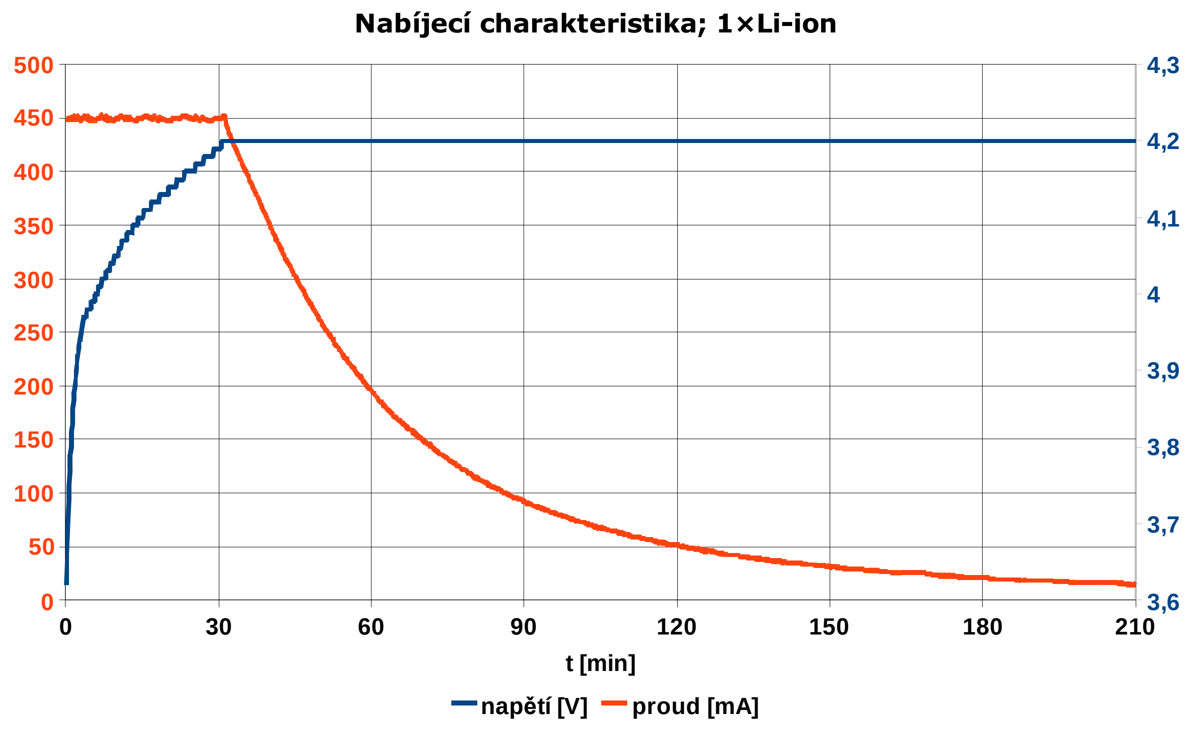
- 1 článek typu Li-ion; nominální napětí 3,6 V; výrobcem udávaná kapacita 700 mAh
- 4 články NiMH; nominální napětí 4,8 V; výrobcem udávaná kapacita 650 mA

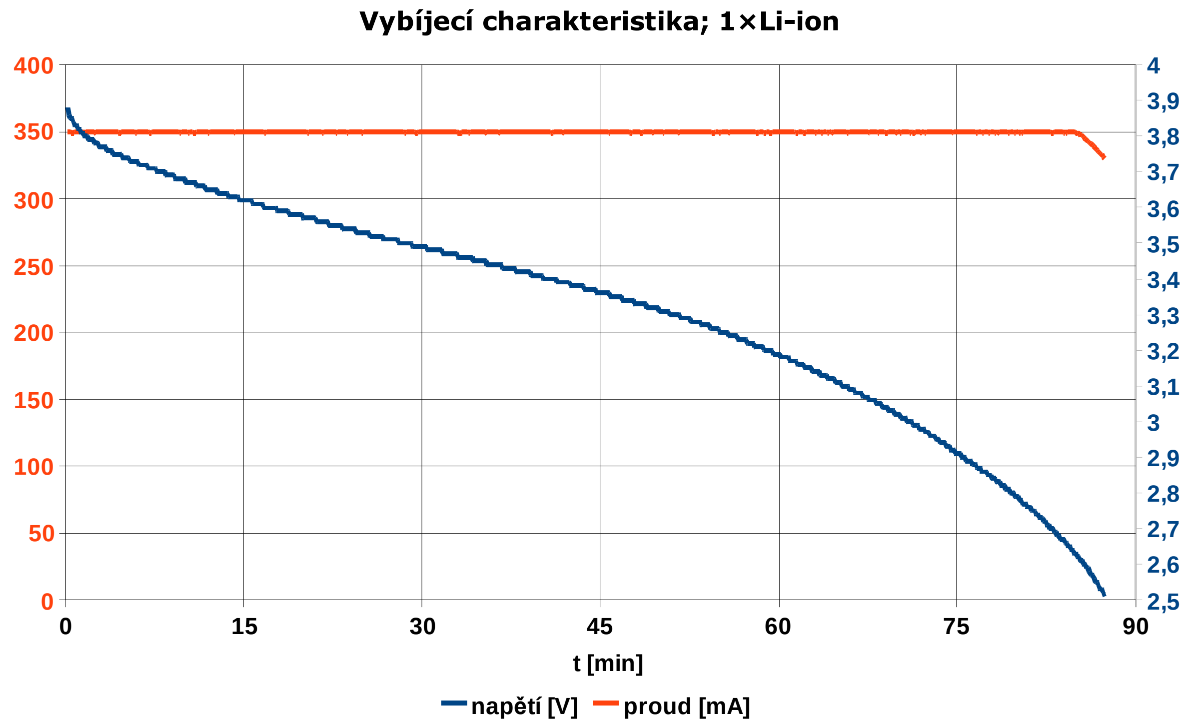
Každý akumulátor jsem nejprve vybil na minimální napětí – výchozí stav. V druhém kroku jsem provedl jeho nabití se záznamem charakteristiky. Plně nabitý akumulátor jsem nakonec opět vybil, čímž jsem změřil jeho využitelnou kapacitu a vybíjecí charakteristiku.

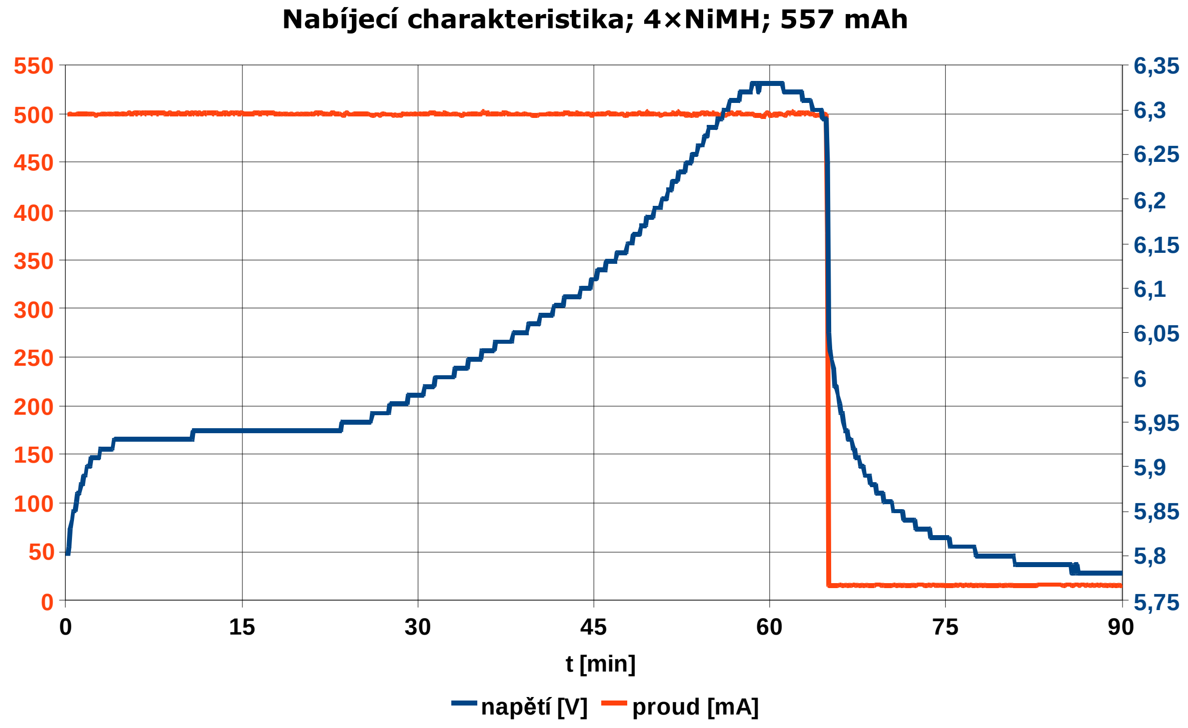
akumulátor	**kapacita dodaná** (nabíjení)	**kapacita odčerpaná** (vybíjení)
1×Li-ion	527 mAh	510 mAh; I = 350 mA
4×NiMH	557 mAh	467 mAh; I = 350 mA 437 mAh; I = 550 mA

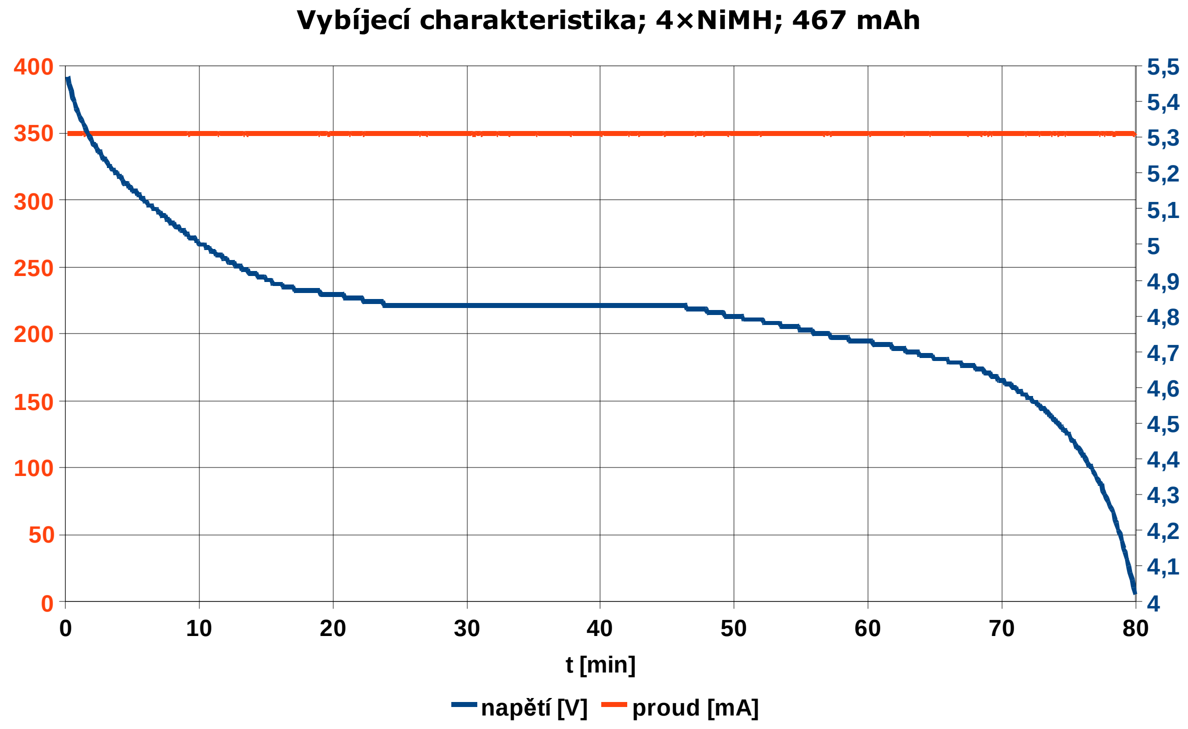
	skutečná kapacita	**účinnost nabíjení**
Li-ion	$p = \frac{510}{700} \cdot 100 = 73\ \%$	$\eta = \frac{510}{527} \cdot 100 = 96{,}8\ \%$
NiMH (350 mA)	$p = \frac{467}{650} \cdot 100 = 72\ \%$	$\eta = \frac{467}{557} \cdot 100 = 84\ \%$
NiMH (550 mA)	$p = \frac{437}{650} \cdot 100 = 67\ \%$	$\eta = \frac{437}{557} \cdot 100 = 78\ \%$

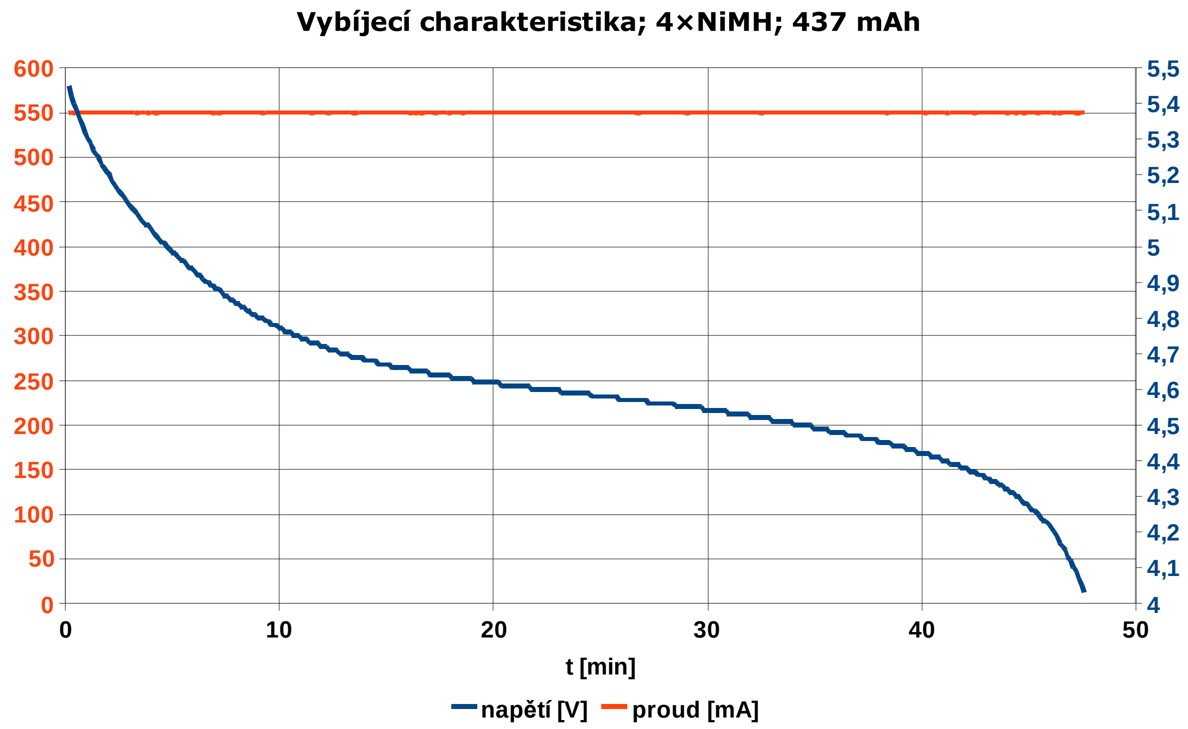
Naměřené charakteristiky:






Nabíjecí charakteristika; 4×NiMH; 557 mAh
550
500
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
6,35
6,3
6,25
6,2
6,15
6,1
6,05
6
5,95
5,9
5,85
5,8
5,75
0
15
30
45
60
75
90
t [min]
napětí [V]
proud [mA]


Vybíjecí charakteristika; 4×NiMH; 467 mAh
400
350
300
250
200
150
100
50
0
5,5
5,4
5,3
5,2
5,1
5
4,9
4,8
4,7
4,6
4,5
4,4
4,3
4,2
4,1
4
0
10
20
30
40
50
60
70
80
t [min]
napětí [V]
proud [mA]



6.1.3. Zhodnocení funkce nabíječe

Z uvedených charakteristik je patrné, že nabíječ pracoval téměř bezchybně.

Zdánlivá „schodovitost" průběhů napětí je způsobena jen rozlišením ukládané charakteristiky, které pro napětí činí 10 mV.

Při vybíjení byl udržován konstantní proud a ukončení činnosti nastalo při dosažení napětí 2,5 V nebo 4 V podle typu akumulátoru. Drobný pokles proudu ke konci vybíjecí charakteristiky u typu Li-ion je způsoben tím, že nabíječ při tak malém napětí již není schopen nastavit dostatečně malý zatěžovací odpor. Na přesnost měření kapacity to však nemá vliv, protože ta se počítá průběžně z aktuální hodnoty proudu.

Kolísání nastaveného proudu u nabíjecích charakteristik o cca ± 3 mA je způsobeno malým dynamickým odporem akumulátoru, který regulační metodě s konečným počtem stavů regulace neumožňuje zcela přesné udržení požadované hodnoty. Chyba je však jen 0,6 %.

Nabíjecí charakteristika Li-ion odpovídá zamýšlenému průběhu. Proces byl ukončen při poklesu proudu pod 3 % počáteční hodnoty.

Na průběhu nabíjecí charakteristiky akumulátorů typu NiMH je patrný správný okamžik přechodu do režimu udržovacího nabíjení, tj. při poklesu napětí o 40 mV (10 mV na článek).

6.2. Technické parametry

- Napájení

  z externího zdroje 24 V ss, 2A (potřebný proud z napájecího zdroje závisí na požadovaném nabíjecím výkonu)

- Výstup

  max. nabíjecí proud 2 A, napětí 20 V; max. vybíjecí proud 2 A
  dosažitelná velikost vybíjecího proudu závisí na napětí, min. odpor je cca 6 Ω

- Relativní chyba měření napětí

  < 0,5 % v celém rozsahu

- Relativní chyba měření proudu

  < 1,5 % v celém rozsahu

- Kapacita vnitřní paměti pro ukládání charakteristik

  cca 7500 párů hodnot napětí/proud; možnost uložení více charakteristik
  perioda záznamu je volitelná v krocích:

  - 7,68 s – 16 hodin záznamu
  - 15,36 s – 32 hodin (1 den a 8 hodin) záznamu
  - 30,72 s – 64 hodin (2 dny a 16 hodin) záznamu

- Parametry rozhraní RS232

  57600 baud, 8N1

6.3. Zhodnocení

Vytvořil jsem plně funkční návrh elektronické části přístroje, který je schopen realizovat všechny požadavky uvedené v úvodu. Řídící software podporuje všechny požadované funkce, další vývoj by měl směřovat k doplnění některých funkcí (např. detekci chyb, zkratů, poškozeného akumulátoru apod.) a ke zpřehlednění uživatelského rozhraní.

Funkčnost elektroniky a zejména realizovatelnost a kvalita návrhu mechanické konstrukce se potvrdila při vlastní výrobě zařízení podle vytvořených podkladů.

Praktický přínos navrženého přístroje spočívá zejména v tom, že přesně dodržuje doporučené nabíjecí postupy. Při nabíjení je plně využita kapacita akumulátorů, ale nedochází k přebíjení, což velmi pozitivně ovlivňuje jejich životnost. Užitečnými funkcemi jsou také měření kapacity akumulátoru a možnost uložení nabíjecí či vybíjecí charakteristiky.

V případě požadavku na možnost nabíjení méně obvyklých nebo nových typů akumulátorů, je další algoritmy možné jednoduše doplnit do řídícího programu – nejsou nutné žádné změny v zapojení elektronické části.

Jako možné rozšíření by bylo možné vytvořit software pro PC, který by umožňoval pohodlnou práci s naměřenými charakteristikami. V současné verzi je možné naměřené charakteristiky načíst z vnitřní paměti přístroje a uložit je do datového souboru ve formě tabulky hodnot. Následné zpracování dat a tvorbu grafů je možné provádět např. v tabulkovém kalkulátoru.

7. Seznam použitých zkratek

- **ASCII –** American Standard Code for Information Interchange
  Tabulka, která definuje mimo jiné kódování znaků anglické abecedy.
- **A/D převodník**
  Analogově digitální (číslicový) převodník.
- **CMOS** – Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
  Technologie výroby integrovaných obvodů.
- **DIP –** Dual In-line Package
  Typ pouzdra integrovaných obvodů pro klasickou montáž.
- **EEPROM –** Erasable Programmable Read-Only Memory
  Polovodičová elektricky přepisovatelná paměť.
- **GCC –** GNU Compiler Collection
  Svobodný překladač (kompilátor) jazyka C pro architekturu AVR.
- **GND –** Ground
  Spojení se zemním potenciálem.
- **LCD –** Liquid Crystal Display
  Zobrazovač na bázi kapalných krystalů.
- **PWM** – Pulse Width Modulation
  Pulsně šířková modulace.
- **RS232 –** Recommended Standard 232
  Standardní rozhraní pro sériový přenos dat.
- **SMD –** Surface Mount Device
  Elektronické součástky pro povrchovou montáž.
- **SPI –** Serial Peripheral Interface bus
  Synchronní sériová sběrnice se 4 vodiči.
- **TQFP –** Thin Quad Flat Pack
  Typ pouzdra integrovaných obvodů pro povrchovou montáž (SMD).
- **UART –** Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
  Asynchronní sériové rozhraní (označení používané např. u mikropočítačů Atmel AVR).
- **USB –** Universal Serial Bus
  Sériové rozhraní pro připojení periferních zařízení k osobnímu počítači.

8. Literatura

[1] HANDBOOK OF OPERATIONAL AMPLIFIER APPLICATIONS
Texas Instruments, Bruce Carter and Thomas R. Brown
Application Report SBOA092A – October 2001

[2] LT1176/LT1176-5 Step-Down Switching Regulator Datasheet
Linear Technology Corporation 1993
LT/GP 0393 10K REV 0

[3] Application Note AVR450: Battery Charger
Atmel Corporation
1659C-AVR-09/06

[4] ATmega16 Datasheet
Atmel Corporation
2466P–AVR–08/07

[5] MX7705 16-Bit, Low-Power, 2-Channel, Sigma-Delta ADC Datasheet
Maxim Integrated Products 2005
19-3051; Rev 2; 12/05

[6] OPA335 CMOS OPERATIONAL AMPLIFIERS Datasheet
Texas Instruments Incorporated 2007
SBOS245D – JUNE 2002 – REVISED JULY 2003

[7] REF3325 VOLTAGE REFERENCE Datasheet
Texas Instruments Incorporated 2007
SBOS392A – AUGUST 2007 – REVISED SEPTEMBER 2007

[8] 24LC256 256K I2C CMOS Serial EEPROM Datasheet
Microchip Technology Incorporated 2005
08/24/05 DS21203N

[9] WinAVR: AVR-GCC for Windows
URL http://winavr.sourceforge.net

[10] GCC, the GNU Compiler Collection
URL http://gcc.gnu.org

[11] AVR Libc Home Page
URL http://www.nongnu.org/avr-libc

[12] Atmel ATmega I2C EEPROM Example Schematic and C program
URL http://www.captain.at/electronic-atmega-eeprom.php

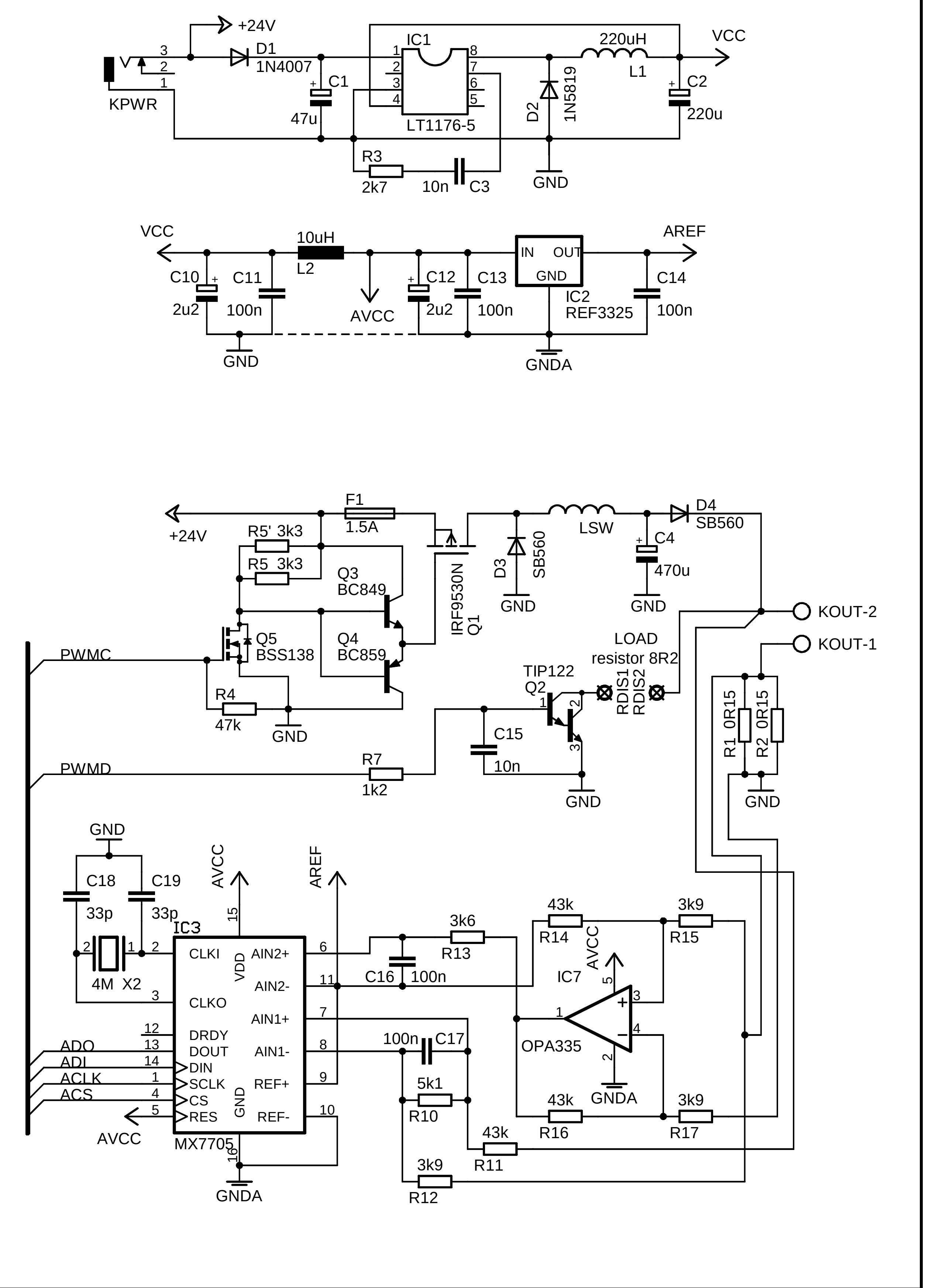
[13] Fischer elektronik Case catalogue
URL http://www.fischerelektronik.de

[14] Battery University
URL http://batteryuniversity.com

[15] KTY81-2 series Silicon temperature sensors datasheet
Philips Semiconductors 1996

9. Seznam příloh

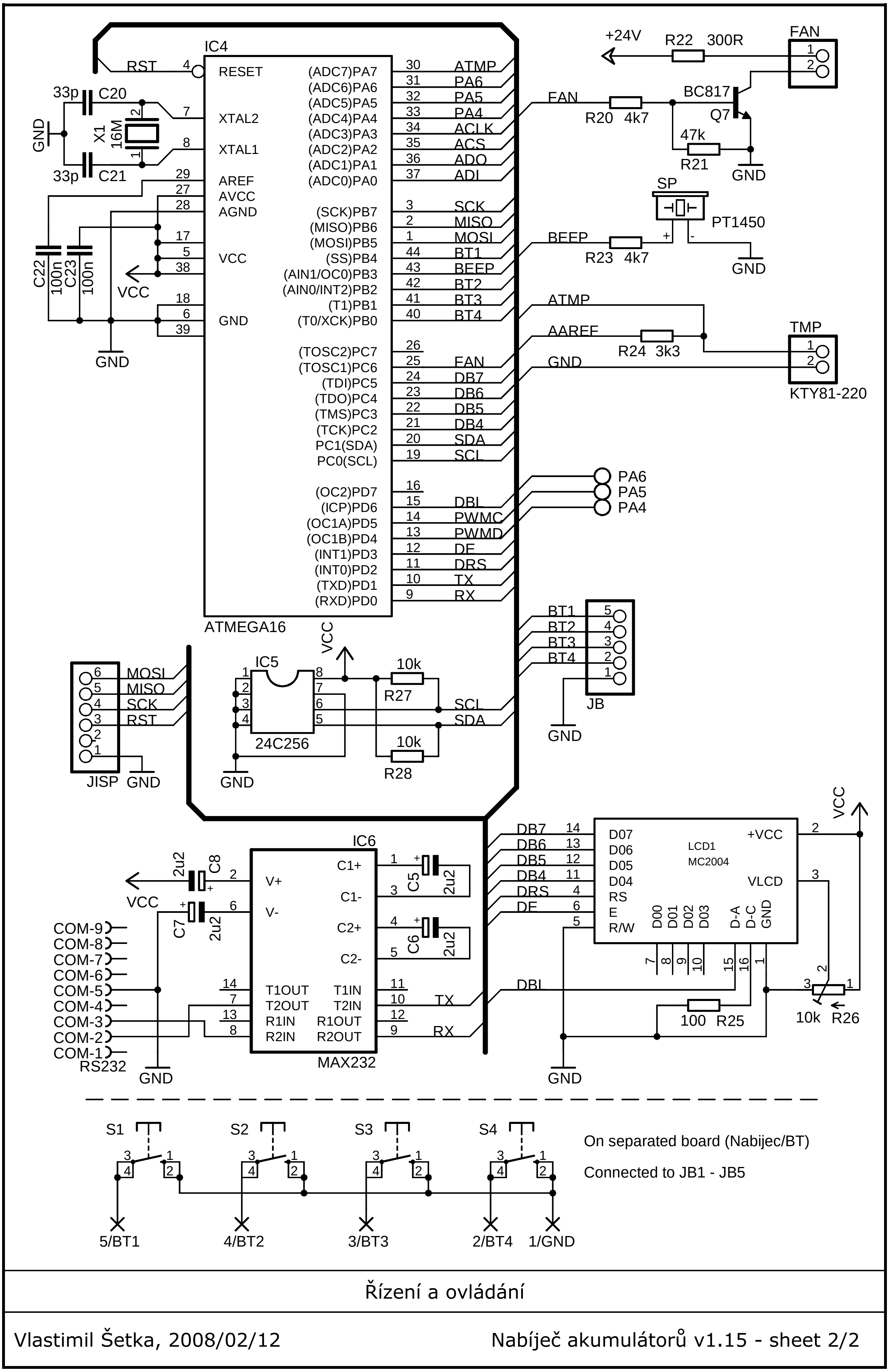
A Schémata zapojení.
B Plošné spoje a osazení součástek.
C Výkresy úprav krabičky a mechanického uspořádání.
D Výpis programů pro CNC frézku.
E CD se zdrojovými kódy řídícího software pro mikropočítač a fotodokumentací.



Zdroj, výkonová a měřící část

Vlastimil Šetka, 2008/02/12

Nabíječ akumulátorů v1.15 - sheet 1/2


IC4
ATMEGA16
RESET
XTAL2
XTAL1
AREF
AVCC
AGND
VCC
GND
(ADC7)PA7
(ADC6)PA6
(ADC5)PA5
(ADC4)PA4
(ADC3)PA3
(ADC2)PA2
(ADC1)PA1
(ADC0)PA0
(SCK)PB7
(MISO)PB6
(MOSI)PB5
(SS)PB4
(AIN1/OC0)PB3
(AIN0/INT2)PB2
(T1)PB1
(T0/XCK)PB0
(TOSC2)PC7
(TOSC1)PC6
(TDI)PC5
(TDO)PC4
(TMS)PC3
(TCK)PC2
PC1(SDA)
PC0(SCL)
(OC2)PD7
(ICP)PD6
(OC1A)PD5
(OC1B)PD4
(INT1)PD3
(INT0)PD2
(TXD)PD1
(RXD)PD0
ATMP PA6 PA5 PA4 ACLK ACS ADO ADI
SCK MISO MOSI BT1 BEEP BT2 BT3 BT4
FAN DB7 DB6 DB5 DB4 SDA SCL
DBL PWMC PWMD DE DRS TX RX
RST
33p C20
33p C21
X1 16M
C22 100n
C23 100n
+24V
R22 300R
FAN
BC817 Q7
R20 4k7
47k R21
SP PT1450
BEEP
R23 4k7
ATMP
AAREF
R24 3k3
TMP
KTY81-220
PA6 PA5 PA4
JB
JISP
IC5
24C256
10k R27
10k R28
IC6
MAX232
C1+ C1- C2+ C2- V+ V-
T1OUT T2OUT R1IN R2IN T1IN T2IN R1OUT R2OUT
C5 2u2
C6 2u2
C7 2u2
C8 2u2
COM-9 COM-8 COM-7 COM-6 COM-5 COM-4 COM-3 COM-2 COM-1
RS232
LCD1
MC2004
D07 D06 D05 D04 RS E R/W
+VCC VLCD
D00 D01 D02 D03 D-A D-C GND
100 R25
10k R26
VCC
GND
S1 S2 S3 S4
5/BT1 4/BT2 3/BT3 2/BT4 1/GND
On separated board (Nabijec/BT)
Connected to JB1 - JB5
Řízení a ovládání
Vlastimil Šetka, 2008/02/12
Nabíječ akumulátorů v1.15 - sheet 2/2

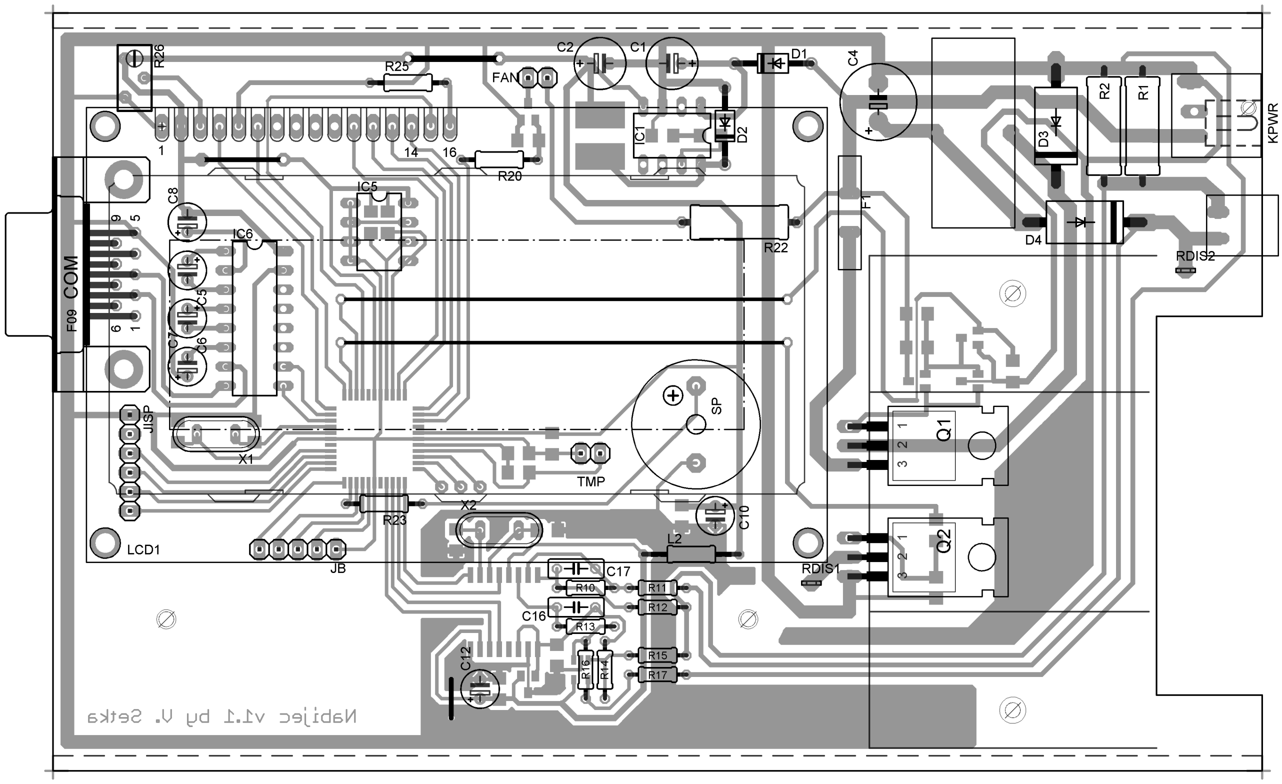
Seznam součástek

součástka	hodnota	poznámka
R1, R2	0R15 2W	0414
R3	2k7	SMD 1206
R4, R21	47k	SMD 1206
R5, R5', R24	3k3	SMD 1206
R7	1k2	SMD 1206
R10	5k1	0207
R11, R14, R16	43k	0207
R12, R15, R17	3k9	0207
R13	3k6	0207
R20, R23	4k7	0207
R22	300R 2W	0414
R25	100R	0207
R26	10k	trimr 5mm
R27, R28	10k	SMD 1206
RDIS	8R2 5W	
C1	47u/35V	RM2,5
C2	220u/10V	RM2,5
C3, C15	10n	SMD 1206
C4	470u/35V	low ESR
C5 - C8, C10, C12	2u2/25V	RM2,5
C11, C13, C14, C22, C23	100n	SMD 1206
C16, C17	100n	foliový 63V
C18 - C21	33p	SMD 1206
D1	1N4007	
D2	1N5819	
D3, D4	SB560	
L1	220uH	TLSMT75P
L2	10uH	radiální
LSW	cca 70uH, 2A, toroid	

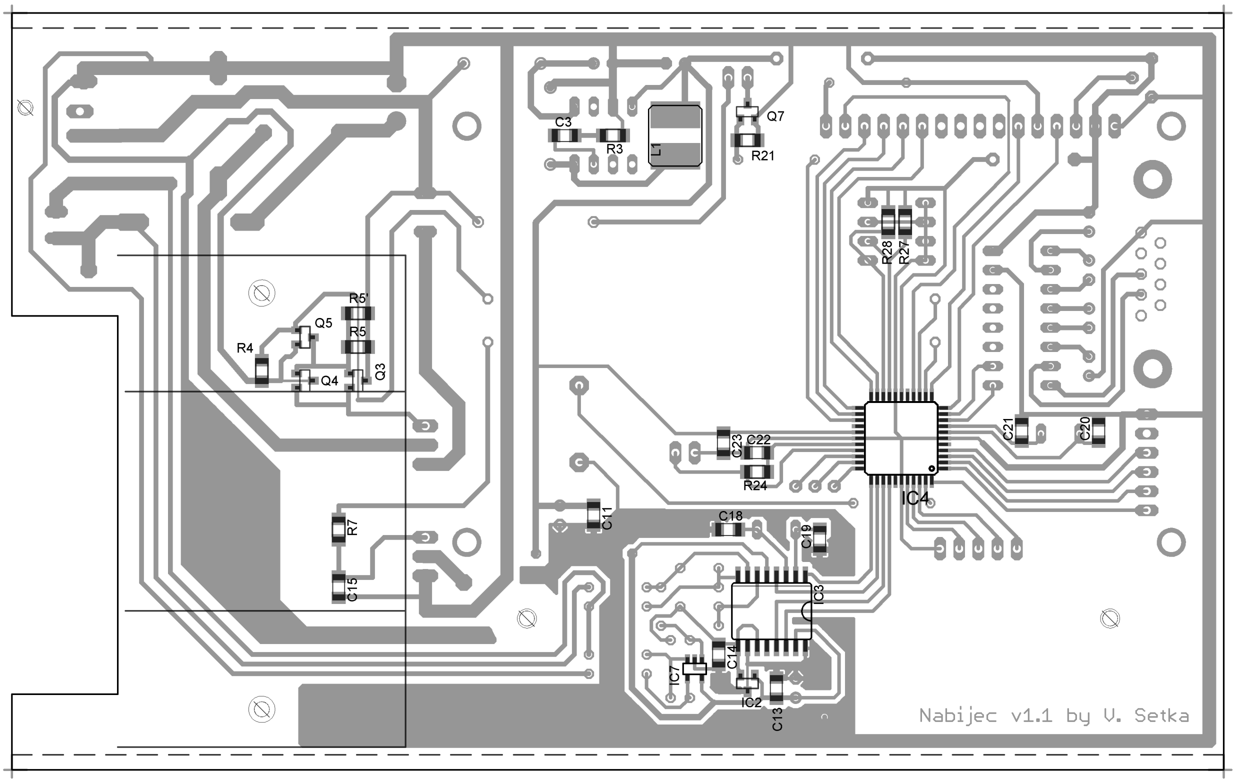
součástka	hodnota	poznámka
Q1	IRF9530N	TO220
Q2	TIP122	TO220
Q3	BC849	SOT23
Q4	BC859	SOT23
Q5	BSS138	SOT23
Q7	BC817	SOT23
IC1	LT1176-5	DIP8
IC2	REF3325	SOT23-3
IC3	MX7705	wideSO16
IC4	ATmega16	TQFP44
IC5	24C256	DIP8
IC6	MAX232	DIP16
IC7	OPA335	SOT23-5
KPWR	napájecí konektor 2,1mm	
KOUT	svorkovnice AK1550/2	
COM	CANNON9F 90°	
FAN	konektor se zámkem 2pin	
JISP	kolíková lišta 90° 6pin	
PA4 - PA6	dutinková lišta 3pin	
JB	dutinková lišta 5pin	
LCD1	MC2004	20×4 znaků
SP	PT1450	piezoměnič
TMP	KTY81-220	
X1	krystal 16MHz	
X2	krystal 4MHz	
F1	pojistka Polyswitch 2A	
S1 - S4	tlačítko P-DT6SW	

ventilátor 40 × 40 mm, 12 V + mřížka
chladič SK 48 37,5 SA (Fischer Elektronik)

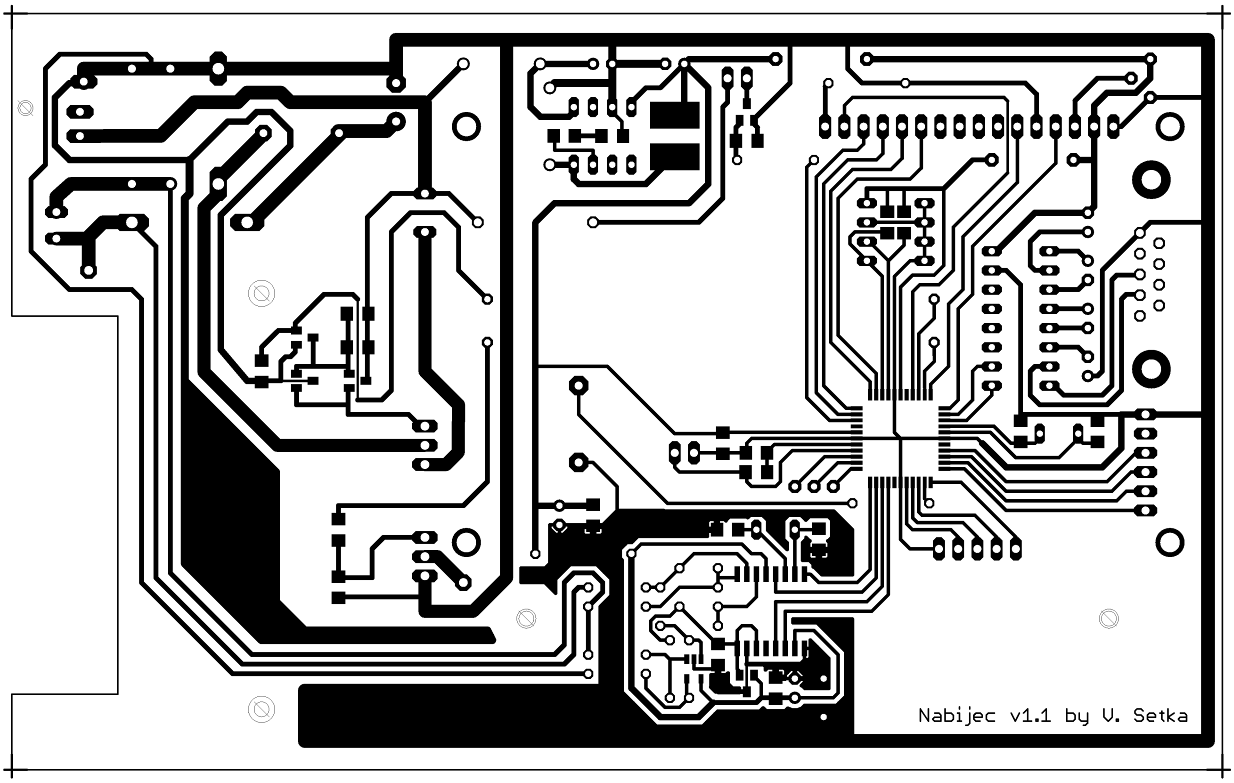
B.1. Osazení horní strany plošného spoje; M 1:1



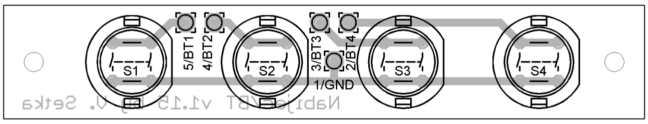
B.2. Osazení spodní strany plošného spoje součástkami SMD; M 1:1



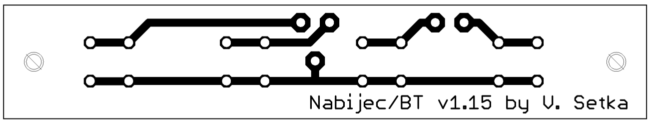
B.3. Motiv plošného spoje (pohled ze spodní strany); M 1:1, 160 × 100 mm

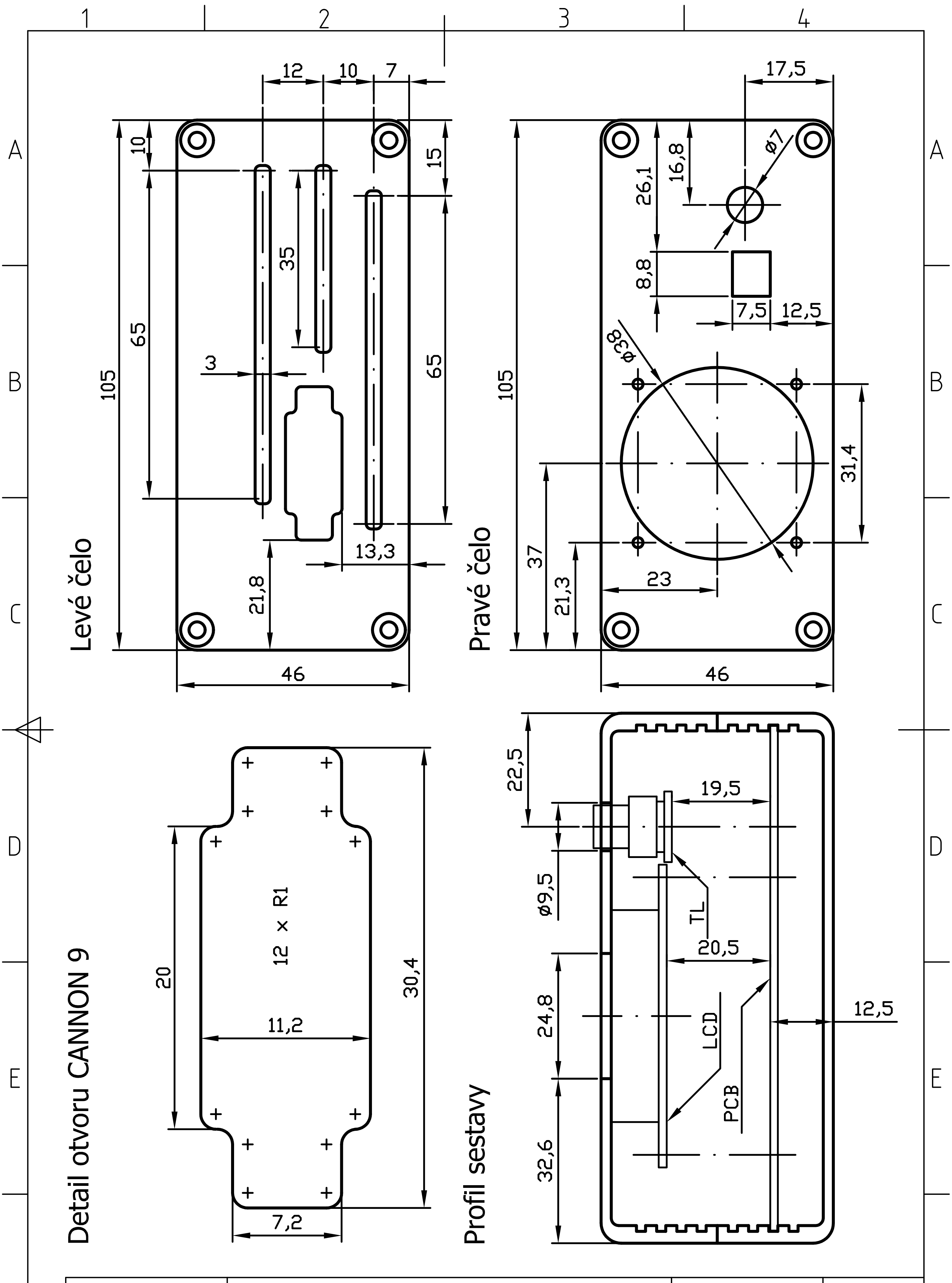


B.4. Osazení horní strany plošného spoje pro tlačítka; M 1:1

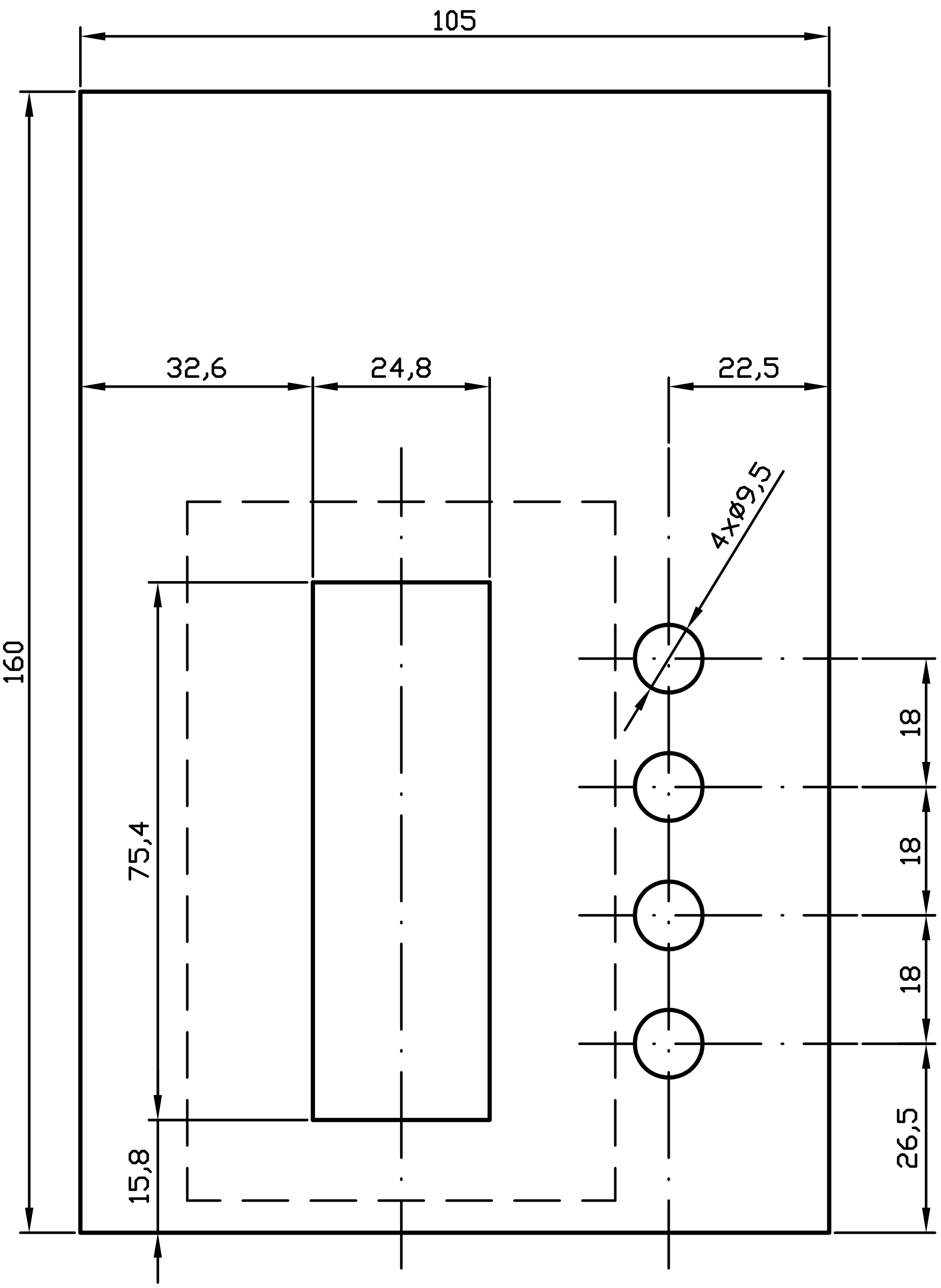


B.5. Motiv plošného spoje pro tlačítka (pohled ze spodní strany); M 1:1; 88 × 15 mm





Designed by Vlastimil Šetka	Material Fischer elektronik - AKG 105 46 160	Date 2008/02/11	Scale 1:1
Příloha C	Nabíječ akumulátorů - čela krabičky		
	VS-Nabijec/1	Edition v1.1	Sheet 1/2



Designed by	Material	Date	Scale
Vlastimil Šetka	Fischer elektronik - AKG 105 46 160	2008/02/11	1:1
Příloha C	Nabíječ akumulátorů - víko krabičky		
	VS-Nabijec/1	Edition v1.1	Sheet 2/2

```
BEGIN PGM VS-SL MM ; čelo levé

BLK FORM 0.1 Z X+0 Y+0 Z-10 ; reference
BLK FORM 0.2 X+105 Y+46 Z+0 ; pro simulaci

TOOL DEF 1 L+0 R+1
TOOL CALL 1 Z S1000 DL+0 DR+0

L X+22,8 Y+16,3 Z+0 F MAX ; CANNON 9 otvor
L Z-10 F100 M4
L IX+3,2
CR IX+2 IY-2 R+2 DR-
L IX+18
CR IX+2 IY+2 R+2 DR-
L IX+3,2
L IY+5,2
L IX-3,2
CR IX-2 IY+2 R+2 DR-
L IX-18
CR IX-2 IY-2 R+3 DR-
L IX-3,2
L IY-5,2
L Z+0 ; End

L X+25 Y+6,5 Z+0 F MAX ; Drazka spodni
L Z-10 F100
L IX+65
L IY+1
L IX-65
L IY-1
L Z+0 ; End

L X+60 Y+16,5 Z+0 F MAX ; Drazka stredni
L Z-10 F100
L IX+35
L IY+1
L IX-35
L IY-1
L Z+0 ; End

L X+30 Y+28,5 Z+0 F MAX ; Drazka horni
L Z-10 F100
L IX+65
L IY+1
L IX-65
L IY-1
L Z+0 ; End

L X+0 Y+0 Z+100 F MAX M0

END PGM VS-SL MM
```

```
BEGIN PGM VS-SP MM ; čelo pravé

BLK FORM 0.1 Z X+0 Y+0 Z-10 ; reference
BLK FORM 0.2 X+105 Y+46 Z+0 ; pro simulaci

TOOL DEF 1 L+0 R+1
TOOL CALL 1 Z S1000 DL+0 DR+0

L X+85,7 Y+17,5 Z+0 F MAX ; Dira kulata
mala
L Z-10 F100 M4
CC X+88,2 Y+17,5
C X+85,7 Y+17,5 DR+
L Z+0 ; End

L X+71,1 Y+13,6 Z+0 F MAX ; Dira hranata
L Z-10 F100
L IX+6,8
L IY+5,5
L IX-6,8
L IY-5,5
L Z+0 ; End

L X+19 Y+23 Z+0 F MAX ; Kulata velka
L Z-10 F100
CC X+37 Y+23
C X+19 Y+23 DR+
L Z+0 ; End

L X+21,3 Y+7,3 Z+0 F MAX ; 1. dira
L Z-10 F100
L Z+0 ; End

L X+52,7 Y+7,3 Z+0 F MAX ; 2. dira
L Z-10 F100
L Z+0 ; End

L X+52,7 Y+38,7 Z+0 F MAX ; 3. dira
L Z-10 F100
L Z+0 ; End

L X+21,3 Y+38,7 Z+0 F MAX ; 4. dira
L Z-10 F100
L Z+0 ; End

L X+0 Y+0 Z+100 F MAX M0

END PGM VS-SP MM
```

```
BEGIN PGM VS-H MM ; horní víko

BLK FORM 0.1 Z X+0 Y+0 Z-10 ; reference
BLK FORM 0.2 X+160 Y+105 Z+0 ; pro simulaci

TOOL DEF 1 L+0 R+1
TOOL CALL 1 Z S1000 DL+0 DR+0

L X+22,75 Y+22,5 Z+0 F MAX ; 1. dira kulata
L Z-10 F100 M4
CC X+26,5 Y+22,5
C X+22,75 Y+22,5 DR+
L Z+0 ; End

L X+40,75 Y+22,5 Z+0 F MAX ; 2. dira kulata
L Z-10 F100
CC X+44,5 Y+22,5
C X+40,75 Y+22,5 DR+
L Z+0 ; End

L X+58,75 Y+22,5 Z+0 F MAX ; 3. dira kulata
L Z-10 F100
CC X+62,5 Y+22,5
C X+58,75 Y+22,5 DR+
L Z+0 ; End

L X+76,75 Y+22,5 Z+0 F MAX ; 4. dira kulata
L Z-10 F100
CC X+80,5 Y+22,5
C X+76,75 Y+22,5 DR+
L Z+0 ; End

L X+16,8 Y+48,6 Z+0 F MAX ; Dira hranata
L Z-10 F100
L IX+73,4
L IY+22,8
L IX-73,4
L IY-22,8
L Z+0 ; End

L X+0 Y+0 Z+100 F MAX M0

END PGM VS-H MM
```