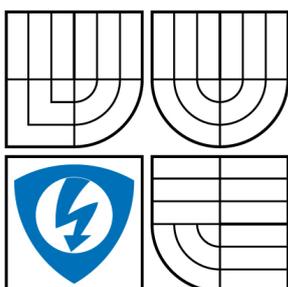


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

TESTOVÁNÍ A NABÍJENÍ AKUMULÁTOROVÝCH ČLÁNKŮ

TESTING AND CHARGING OF ACCUMULATOR CELLS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

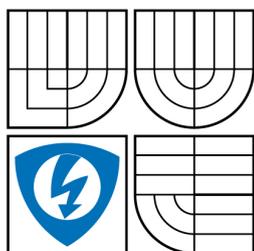
Bc. JAN SRŠEŇ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. IVO LATTENBERG, Ph.D.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Jan Sršeň

ID: 83235

Ročník: 2

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Testování a nabíjení akumulátorových článků

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte elektronický tester akumulátorů a baterií, který bude na základě vložení údajů o typu článku (NiCd, NiMH, Pb, Batt) a jeho kapacitě testovat skutečnou kapacitu a ztrátu kapacity s časem (pouze v případě akumulátoru), napětí naprázdno a vnitřní odpor. Pro realizaci uvažujte mikroprocesor ATmega128. Vybavte tester sériovým kanálem či USB pro přenos dat do PC. Napište jednoduchý program pro PC demonstrující komunikaci s testerem.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] ARENDÁŠ, M., RUČKA, M. Nabíječky a nabíjení. Nakladatelství BEN - technická literatura, Praha 2002, 112 stran, ISBN 80-86056-61-9.
- [2] MATOUŠEK, D. Práce s mikrokontroléry Atmel AVR. Nakladatelství BEN - technická literatura, Praha 2006, 376 stran, ISBN 80-7300-209-4.
- [3] MATOUŠEK, D. Práce s mikrokontroléry ATMEL AT89C2051. Nakladatelství BEN - technická literatura, Praha 2002, 248 stran, ISBN 80-7300-094-6.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 26.5.2009

Vedoucí práce: doc. Ing. Ivo Lattenberg, Ph.D.

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

ANOTACE

Cílem diplomové práce je návrh a konstrukce elektronického zařízení pro testování současně dostupných akumulátorů. Proto jsou zde detailně popsány různé metody nabíjení článků a jejich vhodné použití s ohledem na typ článků. Také případně problémy vznikající při volbě nevhodné metody. Další částí je popis vlastností a principů funkce jednotlivých akumulátorů a jejich zatěžovací charakteristiky, které je nutné znát pro volbu vhodného testovacího postupu. Klíčovou znalostí je také detekce ideálního momentu při nabíjení, kdy akumulátor již není schopen dalšího bezpečného nabíjení nebo vybíjení. Jelikož se metody detekce bodu ukončení nabíjení různí podle typu akumulátoru, je zde uveden jejich přehled. Stěžejní částí je však návrh testeru na základě zmíněných metod. Ten je rozdělen na několik samostatných částí, které spolu komunikují. Řídící část inteligentního testeru staví na jednočipovém mikroprocesoru ATmega128, a proto je uvedena i část řídicího kódu. Poslední část diplomové práce je zaměřena na fyzickou konstrukci zařízení, rozdělení na samostatné celky z důvodu větší univerzálnosti celku a lepšího chlazení jednotlivých částí a logiku fungování celého testeru.

Klíčová slova:

Nabíječ, Vybíječ, Tester, NiCd, NiMH, Li-Ion, Li-Pol, Li-Fe, ATmega128

ABSTRAKT

Direction of the master's thesis is design and construct electronic device for testing available accumulators. Then there are in detail subscribe some methods of charging cells and their right usage to select type of cells. Also eventually problems that can become if the choice is false. Next part contains description of principles as several type accumulator works and their loading characteristic witch are important know for choose the best testing way. The most important knowledge is detection of stop point charging when accumulators are charged and following charging can be dangerous. Because there are more methods to detect this point so in thesis are overwrite. The most important part is design of tester. That is mapped to more segments witch communicating together. Controller part of intelligent tester contains ATmega128 microcontroller so there is present a passage of program code. Last section of master's thesis describe a physical consruction and explain division for smaller parts and hole process of tester function.

Keywords:

Charger, Discharger, Tester, NiCd, NiMH, Li-Ion, Li-Pol, Li-Fe, ATmega128

Citace práce

SRŠEŇ, J. *Testování a nabíjení akumulátorových článků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. XY s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivo Lattenberg, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Testování a nabíjení akumulátorových článků jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedeného diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 18.5.2009

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ivo Lattenberg Ph.D. za velmi užitečnou metodickou pomoc, cenné rady a ochotnou poradit při zpracování moji diplomové práce.

V Brně dne 18.5.2005

.....
podpis autora

OBSAH

1 ÚVOD.....	7
2 RŮZNÉ DRUHY NABÍJECÍCH ČLÁNKŮ.....	9
2.1 Nickel Cadmium (NiCd).....	9
2.2 Nickel Metal Hydride (NiMH).....	10
2.3 Lithium-Iontové / Polymer / Železo (Li-Ion / Li-Pol / LiFe).....	12
2.4 Olovené (Pb) články.....	15
3 BEZPEČNÉ NABÍJENÍ ČLÁNKŮ.....	16
3.1 Detekce nabití pomocí napětí článků.....	16
3.1.1 Detekce maximálního napětí.....	16
3.1.2 Detekce rozdílového napětí.....	17
3.2 Detekce nabití pomocí teploty článků.....	17
3.2.1 Detekce změny teploty.....	18
3.2.2 Detekce rychlosti změny teploty.....	18
3.2.3 Detekce maximální teploty.....	18
3.3 Detekce nabití článků pomocí doby nabíjení	18
4 METODY NABÍJENÍ ČLÁNKŮ.....	20
4.1 Rozdělení nabíjení dle velikosti výstupního proudu.....	20
4.1.1 Pomalé nabíjení.....	20
4.1.2 Standardní nabíjení	20
4.1.3 Rychlé a velmi rychlé nabíjení.....	20
4.2 Nabíjení pomocí zdroje napětí.....	21
4.3 Nabíjení pomocí zdroje proudu.....	21
4.4 Nabíjení pomocí spínaného zdroje proudu.....	21
5 POPIS NAVRŽENÉHO ZAŘÍZENÍ.....	22
5.1 Řídící část.....	23
5.2 Výkonová část pro nabíjení.....	23
5.3 Externí výkonová zátěž pro vybíjení.....	24
5.4 Celkové vlastnosti zařízení.....	24
6 REALIZACE NÁVRHU.....	26
6.1 Popis řídicí části.....	26
6.2 Popis výkonové nabíjecí části.....	27
6.3 Oprava nedostatků (middle layer)	32
6.4 Popis externí výkonové zátěže pro vybíjení.....	37
6.5 Návrh životního cyklu.....	38
6.6 Navrhnuté uživatelské menu.....	40
6.7 Popis řídicího algoritmu (programu).....	41
6.8 Konstrukce zařízení.....	44
7 ZÁVĚR.....	45
8 LITERATURA	46
9 PŘÍLOHY.....	48

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Nabíjecí charakteristiky NiCd/NiMH článku [1].....	10
Obr. 1.2: Vybíjecí charakteristika NiCd/NiMH článku [1].....	10
Obr. 1.3: Nabíjecí charakteristika Li-Ion a Li-Pol článků [5].....	12
Obr. 1.4: Vybíjecí charakteristiky Li-Fe článku v závislosti na okolní teplotě [7]	13
Obr. 1.5: Vybíjecí charakteristiky Li-Fe článku v závislosti na odebíraném proudu [7].....	13
Obr. 1.6: Znázornění úbytku kapacity Li-Fe článku v závislosti na teplotě (celý životní cyklus) [7]....	14
Obr. 2.1: Grafické znázornění výše popsaných metod ukončení nabíjení [1].....	19
Obr. 5.1: Blokové schéma navrženého zapojení testeru	22
Obr. 5.2: Schéma zapojení balanceru článků	25
Obr. 6.1: Ochranné odělení vstupu.....	27
Obr. 6.2: Zapojení referenčního zdroje podkládacího napětí.....	30
Obr. 6.3: Napěťová konverze logických úrovní.....	33
Obr. 6.4: Zapojení napěťového zesílení úbytku napětí na odporu.....	35
Obr. 6.5: Zapojení hardwarového zamezení hazardního stavu.....	36
Obr. 6.6: Znázornění fungování hardwarové logiky middle layer.....	37
Obr. 6.7: Navigační schéma uživatelského menu.....	40
Obr. 6.8: Zobrazení okna programu pro zpracování dat v počítači.....	43
Obr. 6.9: Zobrazení řídicí části zařízení.....	44
Obr. 6.10: Výkonová část zařízení s opravnou deskou.....	44
Obr. 6.11: Celková sestava výkonové nabíjecí části testeru.....	45
Obr. 6.12: Externí výkonová zátěž bez chladiče.....	45

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

A/D	analogově-digitální
D	(<i>drain</i>) elektroda unipolárního tranzistoru odpovídající kolektoru
EEPROM	(<i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i>) elektricky programovatelná paměť
G	(<i>gate</i>) řídicí elektroda unipolárního tranzistoru
JTAG	(<i>Joint Test Action Group</i>) komunikační rozhraní
LCD	(<i>Liquid Crystal Display</i>) typ displeje
Li-Fe	(<i>Lithium-Ferrum</i>) typ akumulátorů
Li-Ion	(<i>Lithium-Ion</i>) typ akumulátorů
Li-Po	(<i>Lithium-Polymer</i>) typ akumulátorů
MOS-FET	(<i>Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor</i>) typ unipolárního tranzistoru
NAND	Logické hradlo s funkcí negovaného logického součinu
NiCd	(<i>Nickel Cadmium</i>) typ akumulátorů
NiMH	(<i>Nickel Metal Hydride</i>) typ akumulátorů
OZ	operační zesilovač
PWM	(<i>Pulse Width Modulation</i>) pulzně šířková modulace
S	(<i>source</i>) elektroda unipolárního tranzistoru odpovídající emitoru
SMD	(<i>Surface Mount Device</i>) součástky pro povrchovou montáž
SMT	(<i>Surface Mount Technology</i>) technologie povrchové montáže
SPI	(<i>Serial Peripheral Interface</i>) seriové komunikační rozhraní
USART	(<i>Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter</i>) univerzální seriové rozhraní
USB	(<i>Universal Serial Bus</i>) univerzální seriová sběrnice

1 ÚVOD

V dnešní době, kdy dochází k miniaturizaci veškerých elektronických zařízení, jsou také kladeny velké požadavky na mobilitu těchto zařízení. Každé mobilní elektronické zařízení však ke své činnosti potřebuje nějaký zdroj elektrické energie. V současnosti tuto funkci zastávají nejrůznější typy bateriových, akumulátorových a palivových článků. Podle povahy zařízení, k jakým účelům bude sloužit a jak často, se vybírá mezi těmito typy článků.

Výhodou nenabíjecích článků (zvláště pak alkalických) je dlouhá a prakticky bezúdržbová doba jejich života. Nevýhodou však zůstává, že po vybití článků se stávají již nepoužitelnými a je nutno je vyměnit za nové. Tento typ článků proto stále nachází své uplatnění v zařízeních s malými nároky na odběr proudu, kde dochází k pomalému vybití článků a zařízení tak může fungovat několik měsíců až let bez nároků na údržbu uživatelem. Dobrymi příklady takových zařízení jsou například náramkové hodinky nebo kapesní kalkulačky. Pokud ovšem přenosné zařízení pro svoji korektní funkčnost potřebuje odebrat vyšší proud, byly by nenabíjecí články velmi neefektivním a v mnoha případech i nemožným řešením. Spíše by uživatele obtěžovaly častými požadavky na výměnu.

Tento problém prakticky řeší druhý typ článků. Nabíjecí články jsou schopny dodávat do obvodu podstatně vyšší proud a po vybití článků nejsou znehodnoceny jako předchozí typ, ale dají se znovu nabít (akumulovat elektrický náboj) a opětovně použít. Výrobci uváděné počty nabíjecích a vybíjecích cyklů, bez razantního snížení kapacity článků jsou udávány ve stovkách až tisících. Nabíjecí články (akumulátory) tvoří solidní základ pro fungování složitějších a náročnějších mobilních zařízení, než tomu bylo u výše zmíněných nenabíjecích článků. Aby si však akumulátor zachoval co možná nejdéle svoje původní vlastnosti (maximální kapacitu a životnost), je nutné se o ně odpovídajícím způsobem také starat. Čím větší jsou na články kladeny nároky, tím více by měla stoupat úroveň nabíjecích zařízení, od jednoduchých nabíječek až po inteligentní procesorově řízené nabíjecí

stanice. V současné době se s nabíjecími články počítá jako jedním z možných alternativních zdrojů energie. Například v automobilovém průmyslu, kde požadavky kladené na články jsou obrovské a bez správné diagnostiky by ani nebylo možné vybrat z různých druhů akumulátorů ty nejlepší pro konkrétní účel.

Posledním z typů článků pro mobilní zařízení jsou palivové články, které by v budoucnu mohly nahradit předchozí typy. Palivové články mají odlišný způsob získávání energie než předchozí typy, u kterých dochází k akumulaci energie při nabíjení článku (akumulátory) nebo energií disponují již od výroby (energie získaná na základě chemické reakce) jako tomu je u nenabíjecích článků. Palivové články fungují (vyrábějí energii) při dodání paliva do článků. Právě způsob získávání energie u těchto článků je jejich velkou výhodou, protože jsou schopny prakticky nepřetržitého provozu, za předpokladu nepřetržité dodávky paliva. Tento typ článků je však ještě na počátku vývoje a články nedosahují takového poměru výkon/cena, aby propukl jejich hojný prodej.

Nejrozšířenějším typem momentálně dostupných článků jsou tedy nabíjecí články. Jejich správnou údržbu zajišťují zařízení, do kterých jsou články integrovány a pomocí připojitelného zdroje také dobíjeny. Druhou možností je, že články jsou pořízeny nezávisle na zařízení, které posléze napájí. Pro jejich údržbu je možné vybrat si z široké nabídky nabíjecích zařízení. Pokud je ovšem zařízení možné napájet z více druhů akumulátorových článků, určení těch nejvhodnějších je možné provést až na základě měření charakteristik jednotlivých druhů článků. Pro tyto účely slouží testery, umožňující simulovat nejrůznější vybíjecí a nabíjecí cykly. Na základě analýzy takto získaných dat je možné rozhodnout o vhodnosti použití jednoho z druhů akumulátorových článků.

2 RŮZNÉ DRUHY NABÍJECÍCH ČLÁNKŮ

V současné době existuje několik různých typů nabíjecích článků, které se však od sebe odlišují svými parametry. Pro lepší orientaci mezi nimi je níže uveden přehled parametrů a grafů nejvíce používaných článků.

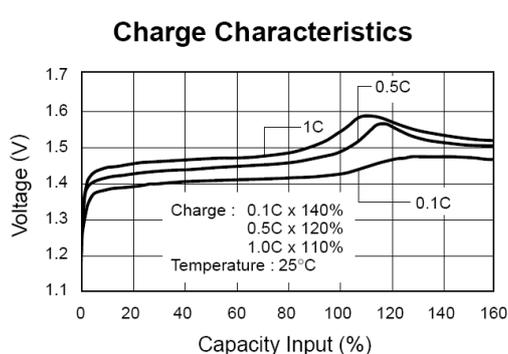
2.1 Nickel Cadmium (NiCd)

Niklkadmiové články fungují na principu elektrochemické reakce mezi dvěma opačně polarizovanými elektrodami. Při nabíjení článků dochází na kladné i záporné elektrodě k přeměně elektrické energie na chemickou. To je doprovázeno vratnou chemickou reakcí uvnitř článků, kdy se následkem průtoku proudu článkem, štěpí a přenášejí volné částice s elektrickým nábojem a tím se změní i chemické sloučeniny elektrod. Při vybíjení naopak dochází k opačné reakci a uložená chemická energie se přemění opět v energii elektrickou. Stejně jako v případě nabíjení dochází k přenosu částic s elektrickým nábojem, avšak opačným směrem. [1]

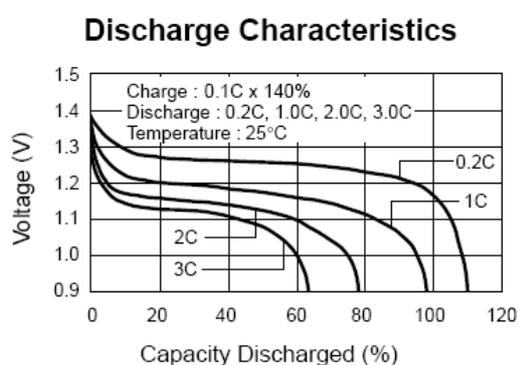
Výroba niklkadmiových článků již byla zastavena, z ekologických důvodů, ale stále se ještě v hojné míře prodávají. Existuje velké množství různých dostupných tvarů článků, které odpovídají daným normám. S objemem článků roste jejich kapacita a maximální proud, který jsou schopny dodávat do elektrického obvodu. Jmenovité napětí na jeden článek je 1,2V.

Velkou výhodou NiCd článků proti NiMH je podstatně nižší náchylnost na samovybíjení a problémy s ním způsobené. Také celková životnost článků při nepravidelném používání v různých režimech zatížení je u NiCd článků podstatně vyšší než u NiMH. Nevýhodou však zůstává podstatně nižší jmenovitá kapacita než u NiMH článků a většinou i nižší maximální proud, který je článek schopen dodat do elektrického obvodu, při stejných rozměrech článků. Další nevýhodou je náchylnost na paměťový efekt, kdy dochází při neúplném vybití a následném nabití k mírnému snížení

efektivního výkonu článku, v důsledku chemických změn uvnitř článku. Tomu se však dá předcházet správnou údržbou článků, a to vybitím na napětí doporučené výrobcem před dalším nabíjecím cyklem.[2] Z této drobné nevýhody se však může stát i výhoda, pokud si uvědomíme, že při skladování stačí NiCd články pouze vybit na doporučené napětí, což je veškerá potřebná údržba. I když napětí na NiCd člancích při dlouhodobém nepoužívání může klesnout na minimum, při následných nabíjecích a vybíjecích cyklech se články opět dostanou na předchozí úroveň. To je u většiny současných NiMH článků naprosto nemožné.



Obr. 1.1: Nabíjecí charakteristiky NiCd/NiMH článku [1]



Obr. 1.2: Vybíjecí charakteristika článku [1]

2.2 Nickel Metal Hydride (NiMH)

Články NiMH nebo také často používané slangové označení “NiMHy” fungují v podstatě na stejném principu jako tomu bylo u NiCd článků s tím rozdílem, že záporná elektroda je vyrobena z jiného materiálu a má tudíž jiné chemické vlastnosti. Z elektrického hlediska je však princip totožný s výše uvedeným. [3]

Jelikož se jedná o velmi podobné články jako jsou NiCd je i jmenovité napětí shodné 1,2V. V současnosti vyráběné NiMH články však disponují podstatně vyšší kapacitou než NiCd a jsou schopny dodávat i vyšší proudy do elektrických obvodů. Tyto vlastnosti by z NiMH článků dělaly neporazitelného

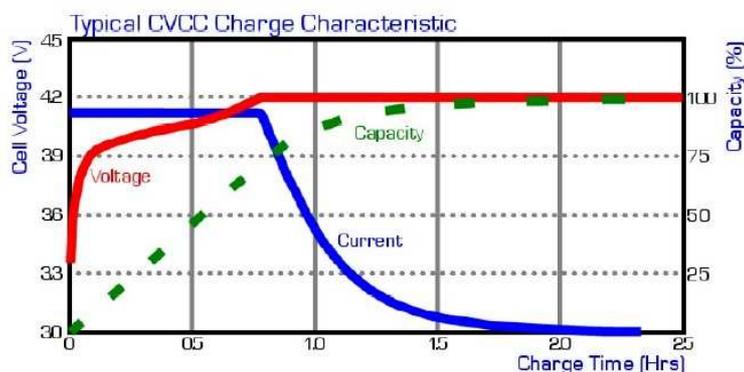
soupeře pro NiCd články. Avšak právě požadavek na vysoké proudy s sebou přináší jednu z velmi nepříjemných vlastností. Tou je krátká životnost článků. Při snaze vyrobit článek s co největší kapacitou, který je schopen dodávat velké proudy do elektrického obvodu, je nutné aby článek disponoval velmi malým vnitřním odporem. Určitá část takovýchto článků však skončí hned po výrobě s vnitřním zkratem. Další procentuálně velká část článků nepřežije dlouhou dobu transportu ke koncovému uživateli a v důsledku samovybití dojde uvnitř článku k nevratným změnám, které mají následně za následek opět zničení článku vnitřním zkratem nebo alespoň snížení životnosti a skutečné kapacity článku. Tyto neblahé vlastnosti ještě více vyniknou při použití článků v přístrojích, které často atakují maximální možnosti těchto článků. V důsledku toho se NiMH články doporučují skladovat v nabitěm stavu a po uplynutí určité doby články opět nabít. Udávaná doba skladování bez údržby se u různých výrobců liší, běžně však činí čtyři týdny od posledního nabíjení. Nejlepší vlastnosti článku tak vyniknou pokud je použit ihned po nabití. NiMH články (na rozdíl od NiCd) nejsou náchylné na paměťový efekt, takže je možné jejich dobíjení i v nevybitém stavu bez negativního dopadu na jejich kapacitu a výkon.

Snahou na zlepšení negativních vlastností NiMH článků jsou například články typu eneloop od firmy Sanyo. U nich jsou spojeny kladné vlastnosti NiMH článků (velká kapacita, možnost nabíjení) a alkalických článků (malé samovybití, dlouhá životnost). Ve výsledku články nejsou schopny dodávat tak velké proudy jako běžné NiMH, ale jejich skutečně použitelná kapacita odpovídá jmenovité a životnost samotných článků je nesrovnatelně vyšší.[4] Nabíjecí a vybíjecí charakteristiky jsou téměř totožné s výše uvedenými charakteristikami pro NiCd články. Proto jsou uvedeny oba typy článků ve stejném grafu.

2.3 Lithium-Iontové / Polymer / Železo (Li-Ion / Li-Pol / LiFe)

Všechny typy těchto článků (Li-Ion, Li-Pol, LiFe) fungují na stejném principu. Při nabíjení či vybíjení dochází ke komutaci iontů lithia mezi anodou a katodou. Anoda je vyrobena z hliníkové fólie (až na LiFe články, kde je ze železa), jejíž povrch pokrývá vrstva sloučeniny oxidu lithia a kobaltu. Jako katoda slouží měděná fólie pokrytá grafitem. Odlišností mezi články je pak použitý separátor a elektrolyt článku, díky kterým jsou i odlišné vlastnosti článků.[5]

Lithium-Iontové články fungují na bázi kapalného elektrolytu a jejich jmenovité napětí je 3,6V (později i 3,7V) což v podstatě odpovídá napětí tří NiCd nebo NiMH článků. Lithium-Polymerové články mají jmenovité napětí dokonce ještě o jednu desetinu vyšší, tedy 3,7V. [6] Naopak lithium-železo fosfátové články mají díky své odlišné konstrukci jmenovité napětí nižší, a to 3,3V. [7]



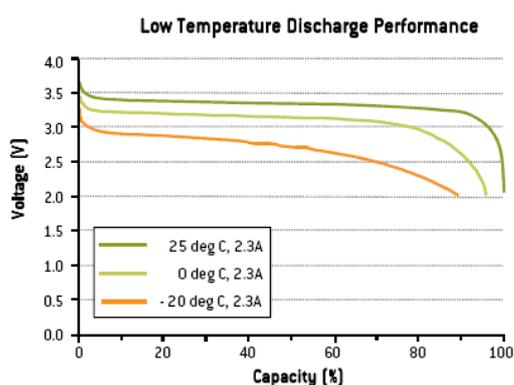
Obr. 1.3: Nabíjecí charakteristika Li-Ion a Li-Pol článků [5]

Lithiové články mají oproti výše uvedeným NiCd a NiMH také znatelně vyšší hustotu energie, a to při menší hmotnosti. Také nejsou náchylné na paměťový efekt a netrpí téměř žádným samovybíjením.

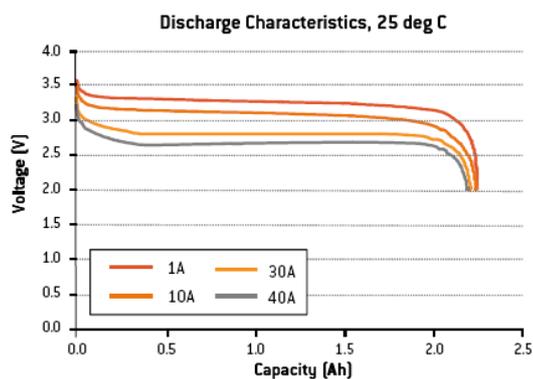
Jednou z nevýhod však je menší mechanická odolnost prvních dvou typů článků (Li-Ion a Li-Pol). Jelikož je snaha o co nejnížší hmotnost baterie, mají články v podstatě jen tenký a lehký obal a zbytek tvoří tělo článku, které však

nedisponuje přílišnou mechanickou odolností. Právě tato vlastnost bývá uváděna mezi problémy spojovanými s lithiovými články. Při nevhodném zacházení s články totiž může dojít k jejich poškození a to má při dalším používání za následek zničení článků, nebo v horším případě dokonce destrukci celého zařízení, či zranění uživatele. Také proto existují LiFe články, které díky své konstrukci a použitým materiálům jsou schopny vydržet daleko horší zacházení, ať už mechanické či při nabíjení. Zároveň články LiFe jsou konstruovány tak, aby byly schopny konstantně dodávat do elektrického obvodu relativně velmi vysoké proudy.[7] Naproti tomu však oproti Li-Ion a Li-Pol mají menší energetickou hustotu a vyšší hmotnost.

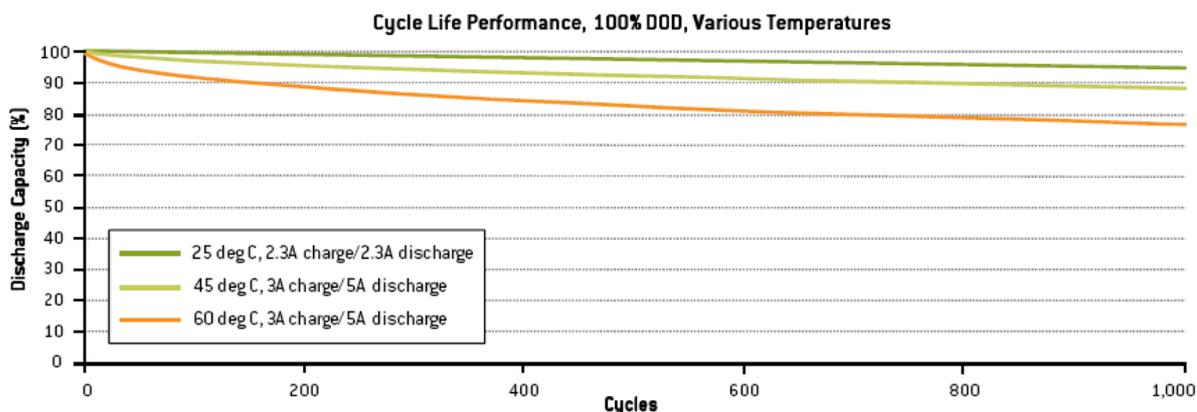
Zjednodušeně řečeno LiFe články využívají elektrických vlastností lithiových článků a zároveň mechanických vlastností NiCd a NiMH článků.



Obr. 1.4: Vybíjecí charakteristiky Li-Fe článku v závislosti na okolní teplotě [7]



Obr. 1.5: Vybíjecí charakteristiky Li-Fe článku v závislosti na odebíraném proudu [7]



Obr. 1.6: Znárodnění úbytku kapacity Li-Fe článku v závislosti na teplotě (celý životní cyklus) [7]

V současnosti jsou již běžně dostupné i lithium-polymerové články, které dovolují odběr relativně velkých proudů, vůči svojí kapacitě. Avšak nabíjecí proudy těchto článků zatím nedovolují takovou volnost jako v případě LiFe, kde mohou být až 5krát větší než jmenovitá kapacita článků. Nedá se však říci, které z lithiových článků jsou nejlepší. To se odvíjí od způsobu jejich použití v konkrétním zařízení.

Všechny typy lithiových článků jsou náchylné na nevhodné zacházení při nabíjení a vybíjení, a to nejen z hlediska dodržení udávaných nabíjecích a vybíjecích proudů, ale také hlavně z hlediska napětí. Každé, i nepatrné, překročení krajních hodnot, znamená snížení životnosti článku. [8] Proto by nabíjení mělo probíhat nezávisle a nebo alespoň s kontrolou každého článku. Toho je v praxi v akumulátorových sadách docíleno použitím tzv. balanceru, který v průběhu nabíjení kontroluje články a udržuje hodnoty jejich napětí na shodné úrovni.

2.4 Olověné (Pb) články

Olověné články fungují na základě vratné chemické reakce probíhající v roztoku sloučenin vody a kyseliny sírové. Jako elektrody zde slouží olověné desky, které jsou vůči účinkům kyseliny sírové odolné. Při nabíjení tedy dochází k chemické reakci sloučenin elektrolytu a částečně i elektrod. Výsledkem je větší koncentrace kyseliny sírové a oxidu olovičitého. Elektrolyt tak postupně houstne, což je známka nabíjení, případně úplného nabití akumulátoru. Stav nabití se u olověných článků může kontrolovat hustoměrem nebo sledováním napětí článků. Při nabíjení olověných akumulátorů také dochází k elektrolýze vody a tudíž rozkladu na její základní prvky (H_2 vodík a O_2 kyslík). Olověné články jsou opatřeny ventily pro odvádění těchto plynných složek. Ty je však nutno před nabíjením ručně demontovat. Pokud by článek zůstal při nabíjení v zakrytovaném stavu, mohlo by dojít ke zvýšení vnitřního tlaku článku a následné poruše obalu, nebo výbuchu. Při vybíjení je chemická reakce totožná s opačným průběhem. Jmenovité napětí jednoho olověného článku je rovno 2 V. Vyšších napětí je dosaženo sériovým skládáním článků stejně jako tomu je u výše jmenovaných typů. [9]

Tento typ akumulátorů byl nahrazen bezúdržbovými akumulátory, které kromě bezúdržbového provozu přinášejí řadu dalších výhod. Jednodušší a odolnější konstrukce, zvýšení životnosti a to i při horším zacházení s články a také snížení hmotnosti. [9]

3 BEZPEČNÉ NABÍJENÍ ČLÁNKŮ

Před nabíjením či vybíjením článku nebo sad článků (tzv. packu) je důležité zjistit údaje o jejich mezních hodnotách, které by v průběhu nabíjení nebo vybíjení neměly být překročeny pro zachování maximální životnosti článků. Tyto hodnoty se pro různé typy článků liší a jsou většinou udávány výrobcem. Máme například dva seriově zapojené lithium-polymerové články (jmenovité napětí rovno 7,4V), jmenovitou kapacitu 2100mAh a doporučené hodnoty pro nabíjení 1C a vybíjení 10C. V praxi to znamená, že maximální napětí packu je rovno 8,4V (4,2V je nejvyšší doporučené napětí na článek), maximální nabíjecí proud odpovídá 2,1A a maximální vybíjecí proud by neměl přesáhnout hodnotu 21A, pro zachování dlouhé životnosti packu.

Při nabíjení je tedy důležité kontrolovat velikost proudu a napětí článků. Dalšími parametry mohou být snímaná teplota článků nebo čas nabíjení. Díky kombinaci těchto parametrů je nabíjecí zařízení schopno vyhodnocovat úroveň nabití článků a detekovat ideální bod ukončení nabíjení. Existuje několik způsobů detekce nabití.

3.1 Detekce nabití pomocí napětí článků

Princip metody spočívá ve stálém sledování napětí článků a při detekci určitého napětí dochází k přerušení nabíjení.

Je však dále nutné rozlišit za jakých podmínek dochází k určení konce nabíjení. V důsledku toho se dá metoda detekce ukončení nabíjení pomocí napětí rozdělit ještě do několika svých podskupin.

3.1.1 Detekce maximálního napětí

Princip tohoto způsobu ukončení nabíjení je, že při detekci maximálního napětí článků (tzv. peak nebo také špičky) dojde k ukončení nabíjení. Díky

tomu, že je detekováno špičkové napětí je článek maximálně nabit a zároveň nedošlo ke zbytečnému přebíjení článků. K detekci špičkového napětí dochází při určitém úbytku napětí. Pro NiMH články tento úbytek činí maximálně 3mV na článek. [1]

Podobného způsobu se využívá také při nabíjení lithiových článků, kdy předem specifikovano maximální napětí a od něj se detekuje úbytek. Po dosažení maximálního napětí článků však nedochází okamžitě k zastavení nabíjení, ale dojde ke snižování proudu tak, aby již napětí nestoupalo. Díky tomu je detekce nabití lithiových článků podstatně jednodušší než tomu je u článků NiCd a NiMH.

3.1.2 Detekce rozdílového napětí

Často také označovaná jako delta peak nebo negative delta. U této metody nedojde k ukončení nabíjení okamžitě v bodě špičky, ale až po delší době, kdy je naměřen určitý úbytek napětí od maximální hodnoty (špičky) naměřené v průběhu nabíjení. Metoda není tak ideální jako předchozí, protože dochází k určitému přebíjení článků. Neklade však tak vysoké nároky na rozlišovací schopnosti zařízení (A/D převodník a přesnost součástí) při detekci tohoto napětí. Tím je dáno, že zařízení používající tuto metodu jsou levnější, a proto je také velmi často používána. Detekované rozdílové napětí pro NiMH články vzrostlo oproti předchozí metodě na 5mV. [1]

3.2 Detekce nabití pomocí teploty článků

Při nabíjení dochází k postupnému zvyšování teploty článků. Ke konci nabíjecího cyklu článků je nárůst teploty podstatně vyšší a teplota článku (nebo packu) strměji stoupá. Díky této skutečnosti je nabíječ opatřený teplotním čidlem, umístěným nejlépe přímo na článcích, schopen rozpoznat nabité články a ukončit nabíjení. Metoda se podle citlivosti na teplotu může rozdělit na několik dalších. [1]

3.2.1 Detekce změny teploty

Teplota článků je sledována od začátku nabíjení. Pokud rozdíl teploty od začátku nabíjení překročí nastavenou hodnotu, nabíjení je ukončeno.[1]

3.2.2 Detekce rychlosti změny teploty

Při tomto způsobu detekce je sledována rychlost změny teploty. Pokud se teplota mění s časem jen velmi pomalu, nabíječ na tuto skutečnost nijak nereaguje. Dojde-li však k většímu nárůstu teploty za kratší časový interval, nabíjení je ukončeno. Rychlost změny teploty pro ukončení nabíjení může být nastavitelná. Za základní je však považována hodnota jednoho stupně za minutu.[1]

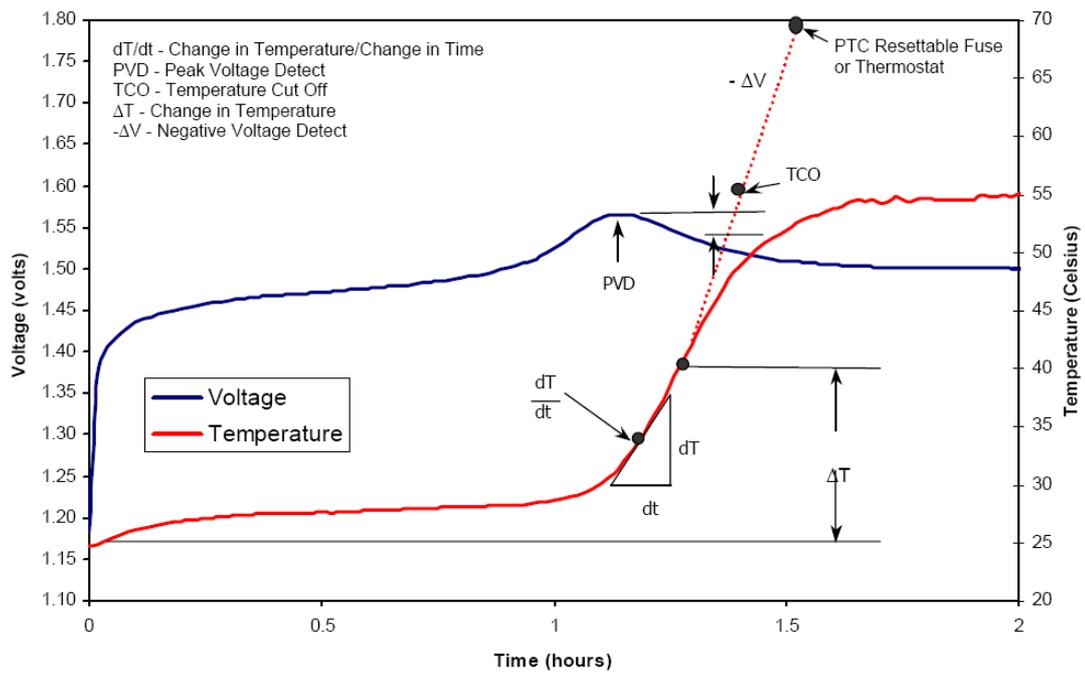
3.2.3 Detekce maximální teploty

Nastavením maximální možné teploty je jasně daná mez, při které již musí dojít k přerušení nabíjení. Tato metoda se často používá jako doplňková ochrana při nabíjení založeném na detekci napětí.[1]

3.3 Detekce nabití článků pomocí doby nabíjení

Při použití této metody je předem zvolen čas nabíjení článků, po jehož dosažení je nabíjení automaticky ukončeno. Tuto metodu je možné použít pouze tehdy, jedná-li se o nabíjení pomalé a nabíjecí proud dosahuje maximálně pouze jedné desetiny jmenovité kapacity akumulátoru (max. 0,1C). [1]

Metoda ukončení nabíjení v závislosti na čase nabíjení je velmi pomalá a hodí se pro nabíjení článků, které jsou používány v zařízeních s velmi malou spotřebou.



Obr. 2.1: Grafické znázornění výše popsaných metod ukončení nabíjení [1]

4 METODY NABÍJENÍ ČLÁNKŮ

Nabíjení akumulátorů je velmi často děleno podle velikosti výstupního proudu nabíječe. Čím vyšší výstupní proud je, tím větší jsou kladeny nároky na přesnost a počet měření. Stoupá také počet různých sekundárních ochranných mechanismů článků a tím roste i cena celého zařízení. Velkou výhodou však je velmi rychlé nabití vybitých článků a zkrácení doby, po kterou články nejsou schopny provozu.

4.1 Rozdělení nabíjení dle velikosti výstupního proudu

4.1.1 Pomalé nabíjení

Při pomalém nabíjení velikost proudu dosahuje maximální hodnoty 0,1 násobku jmenovité kapacity článku a doba nabíjení může být i nepřetržitá. Tento typ nabíjení se používá spíše jako udržovací, po dokončení některé z rychlejších metod.[1],[2]

4.1.2 Standardní nabíjení

Nabíjecí proud je roven 0,1 násobku jmenovité kapacity, avšak již je použito časovače nastaveného na 16 hodin, pro ukončení nabíjení.[1],[2] Tato metoda nabíjení je využívána při prvním cyklu nabíjení sad akumulátorů, kdy je nutné srovnat napětí článků na stejnou hodnotu (využíváno hlavně pro NiCd články).

4.1.3 Rychlé a velmi rychlé nabíjení

Nabíjení je již poměrně rychlé a proud je možné nastavit až na 0,5 násobek jmenovité kapacity. Pro detekci ukončení nabíjení je použita metoda detekce maximální hodnoty napětí, detekce rozdílu napětí nebo detekce rychlosti změny teploty. Jako sekundární ochrana proti přebíjení článků slouží detekce maximální teploty a časovač.[1]

Velmi rychlé nabíjení je shodné, pouze maximální výstupní proudy jsou až

5-ti násobkem jmenovité kapacity článků (např. u LiFe článků).

4.2 Nabíjení pomocí zdroje napětí

Použitím napěťového zdroje s výstupním napětím shodným s maximálním napětím článků, je automaticky docíleno ukončení nabíjení po dosažení tohoto napětí. Dojde totiž k vyrovnání napětí v obvodu a přestane protékat proud. Jediným problémem, který při zvolení této metody nabíjení je nutné ošetřit, je omezení proudu obvodem na začátku nabíjení. Proud musí být zvolen tak, aby nebyla překročena maximální povolená hodnota nabíjecího proudu akumulátorů.[10]

U této metody je však nevýhodou, že proud obvodem se v průběhu nabíjení mění. Tím je podstatně ztíženo měření dodaného náboje (kapacita).

4.3 Nabíjení pomocí zdroje proudu

Použitím zdroje proudu pro nabíjení je kontrola dodaného náboje podstatně jednodušší. Odpovídá velikosti proudu dodávaného za určitý čas. Nabíjení však neprobíhá se stoprocentní účinností, což znamená, že dodaná kapacita neodpovídá přesně kapacitě naměřené. [10]

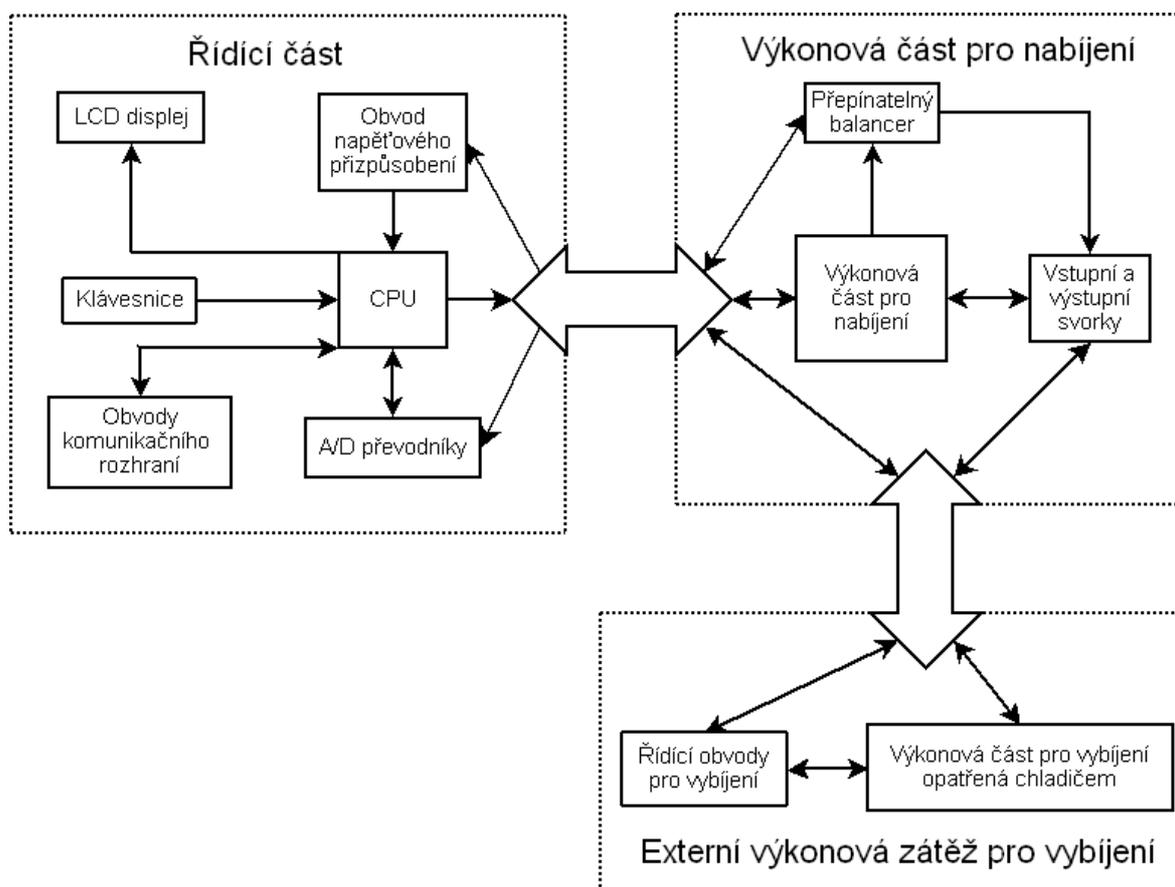
4.4 Nabíjení pomocí spínaného zdroje proudu

Proudové impulzy kladně ovlivňují chemické reakce uvnitř článků, takže měření dodané kapacity je přesnější než v předchozím případě. Navíc změnou frekvence a střídy výstupních proudových impulzů se dá pohodlně měnit střední hodnota nabíjecího proudu, což je v diskrétně pracujících obvodech velkou výhodou.

Pokud nabíječ pracuje ve spínaném režimu, je možné mezi nabíjecí impulzy zařadit krátké vybíjecí impulzy ve zbytku periody zařadit měření článků. Tato posloupnost je z pohledu přesnosti měření nejlepší a v moderních zařízeních často používána.[10]

5 POPIS NAVRŽENÉHO ZAŘÍZENÍ

Návrh zařízení na měření a testování článků je rozděleno do tří základních částí, jak je zobrazeno v blokovém schéma na obr. 5.1. Každá z částí bude zhotovena na samostatné desce plošného spoje, takže v podstatě vzniknou tři moduly. Tím je zajištěna větší univerzálnost celého zařízení. Pokud například bude potřeba použít zařízení pouze jako nabíječ, není nutné připojovat vybíjecí jednotku, která bude obsahovat rozměrný chladicí systém. Stejně tak při dalším vývoji je možné zachovat například řídicí jednotku ostatní části pouze vyměnit díky jednoduchým pinovým portům.



Obr. 5.1: Blokové schéma navrženého zapojení testeru

5.1 Řídící část

Řídící část zařízení je navržena jako nezávislá část na zbytku zařízení. Bylo by tedy možné ji (s určitým omezením) použít i pro řízení kteréhokoli jiného zařízení. Omezení se odvíjí od potřeby jiných obvodů než deska poskytuje. Nejdůležitějším prvkem je jednočipový 8-bitový mikrokontroler AVR (ATmega128), který zajišťuje výpočetní a řídicí funkce celého zařízení. Programování je možné provádět přímo na desce přes JTAG nebo ISP rozhraní. Pro komunikaci s okolními zařízeními, například pro export zjištěných dat slouží USB rozhraní s portem mini-USB B (female). Pro rychlé nastavení parametrů nabíjení (vybíjení) a orientaci v menu, slouží čtveřice tlačítek a 16-ti znakový dvouřádkový LCD displej. Posledními obvody řídicí desky jsou neméně důležité 12-ti bitové sériové A/D převodníky (MCP3202), které poskytují vyšší rozlišení než “pouze” 10-ti bitové, které jsou součástí mikrořadiče. Veškeré volné porty a vstupy převodníku jsou přivedeny na komunikační pinový port. Přes tento port je zajištěno řízení celého testeru a v opačném směru funguje také pro sběr dat, které jsou následně zpracovávána A/D převodnicích.

5.2 Výkonová část pro nabíjení

Obsahuje obvody využívající technologii MOS-FET pro spínání proudu do zátěže (článků). Nabíječ je navržen pro maximální nabíjecí proud až 10A a při maximálním napětí 16,8V (maximální napětí čtyř seriově zapojených Li-Pol článků). Vstupní napětí je možné zvolit v rozmezí od 12,5V do 18V, v závislosti na počtu nabíjených článků, protože zapojení není navrženo s konvertorem napětí.

Deska dále obsahuje balancer napětí pro připojení až čtyř lithiových článků (viz. Obr. 5.2). Ty jsou podstatně náchylnější na vznik rozdílu napětí mezi články než NiCd nebo NiMH. Proto je nutné napětí jednotlivých článků udržovat při nabíjení na stejné úrovni. Balancer je řízen mikrořadičem a jeho

funkce je navržena tak, že při nabíjení přes hlavní nabíjecí okruh dochází zároveň k mírnému vybíjení jednotlivých článků přes servisní konektor. Články s vyšším napětím jsou vybíjeny více a s nižším méně nebo vůbec. Vybíjecí proud přes servisní konektor však bude podstatně nižší než nabíjecí, aby nebyla ohrožena funkce nabíjení. Přes operační zesilovače, zapojené jako rozdílové, je snímané napětí jednotlivých článků zesíleno a zasíláno do A/D převodníku. Snímání napětí na jednotlivých člancích probíhá nepřetržitě, avšak ke zpracování je z každého snímače zasíláno pouze jednou za měřicí periodu. Princip je shodný jako časové dělení kanálu na sloty. Takto navržené zapojení vyžaduje pouze jeden vstup A/D převodníku a přitom nedochází k chybě měření, protože perioda vyčítání napětí je proti rychlosti změny napětí na článku naprosto zanedbatelná.

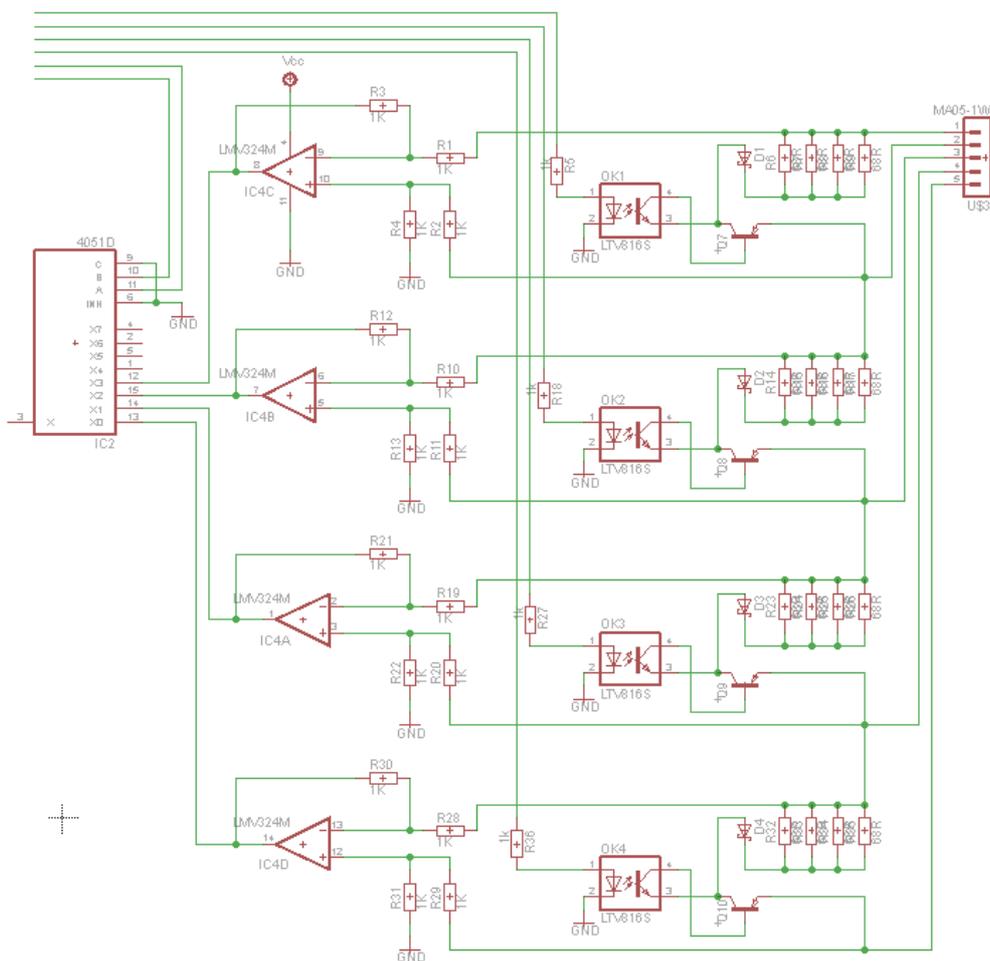
5.3 Externí výkonová zátěž pro vybíjení

Vybíjecí okruh je navržen jako připojitelný modul k nabíjecí soustavě, avšak jeho řízení opět obstarává mikrořadič. Jelikož může celkově navržené zatížení dosahovat až 30A při 15V, je nutné odvádět až 450W ztrátového tepla. To vyžaduje poměrně rozměrný chladič, nejlépe opatřený jedním nebo více ventilátory. O odvádění ztrátového tepla do chladiče se bude starat pole bipolárních výkonových tranzistorů zapojených paralelně. Tím je zajištěna univerzalita zařízení pro všechny možné kombinace napětí článků a zvoleného proudového odběru. Řízení velikosti proudu bude zajištěno PWM řídicím slovem. Protékající proud bude snímán jako úbytek napětí na výkonových rezistorech.

5.4 Celkové vlastnosti zařízení

Testovací zařízení je navrženo tak, aby bylo možné nabíjet či vybíjet samostatné články nebo sady článků pro napětí 1 až 16,8V. Nabíjecí proud je pak nastavitelný v rozsahu 0,1 až 10A a vybíjecí proud v rozsahu 1 až 30A.

Pro detekci konce nabíjení a vybíjení bude využito standardně používaných technik pro zvolený typ článků. Jako sekundární stupeň ochrany je navrženo použití časovače. Pro případnou ještě vyšší ochranu článků proti přebíjení, by zařízení mohlo dále obsahovat vstup pro připojení tepelného čidla na snímání teploty článku. Vybíjení článků bude podporovat více různých režimů, počínaje konstantní proudovou zátěží, až pro časově proměnlivou zátěž, která umožňuje simulovat nepravidelně zatěžované zařízení.



Obr. 5.2: Schéma zapojení balanceru článků

6 REALIZACE NÁVRHU

Pro vlastní realizaci zařízení byla zvolena technologie povrchové montáže součástek (SMT), díky které je navržené zařízení podstatně kompaktnější. Proto i většina součástek, kromě výkonových prvků, je typu SMD. Výkonové součástky jsou zvoleny klasické, pro jejich větší dostupnost, a také snadnější odvod ztrátového tepelného výkonu.

6.1 Popis řídicí části

Zapojení řídicí desky vychází z doporučených zapojení, udávaných v datasheet. Displej je spojen s mikrořadičem pomocí 8-bitové datové sběrnice (DB0 až DB7) a tří-bitové řídicí sběrnice (signály RS, RW, E), kde při konfiguraci zařízení je využíváno všech 11 bitů pro korektní inicializaci displeje. Ještě jedním bitem (port C PIN 4) je spínáno podsvícení displeje, kde je možné změnou střídy nastavit intenzitu jasu. Nastavení kontrastu je zvoleno manuálně pomocí trimru (R49).

Pro nastavení uživatelských dat slouží čtyř-tlačítková klávesnice, kde zmáčknutí některého z nich se projeví úrovní logické nuly na odpovídajícím vstupním pinu mikrořadiče. Tento stav je ošetřen v programu zavoláním funkce na obsluhu uživatelského vstupu a vyvolá odpovídající změny na displeji.

Další vstupní částí jsou A/D převodníky. Ty jsou přímo připojeny na vstup/výstupní řídicí konektor, který tvoří komunikační rozhraní mezi jednotlivými deskami. V převodníku dochází k převodu analogových dat získaných měřeními napětí na patřičných obvodech ve výkonové nabíjecí části (viz. níže popsaná funkčnost) na digitální. Digitální data jsou přenesena do mikrořadiče přes seriové rozhraní SPI, kde jsou následně zpracována, použita k dalšímu řízení (dle algoritmu programu), a také dále odeslána přes seriové rozhraní USART na převodník FT232R. Tento obvod zastává funkci

rozhraní mezi USART na straně mikrořadiče a USB na straně druhé.

Zpracovaná data tedy nejsou nikde ukládána, ale je zajištěn jejich okamžitý přenos na komunikační port a dále do PC pro “on-line” sledování průběhu testování.

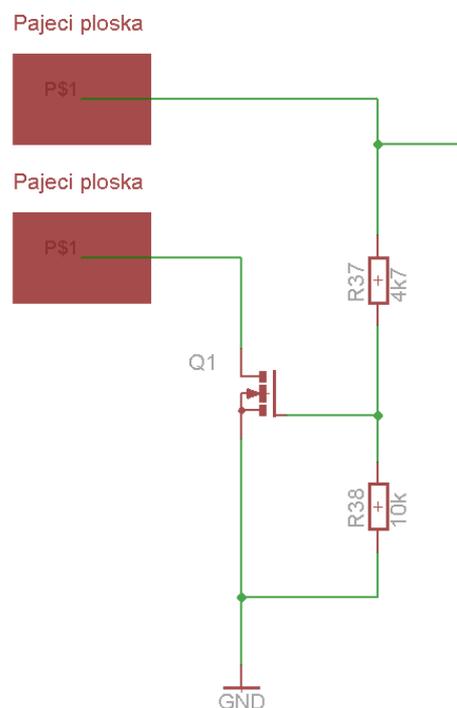
Řídící deska ještě obsahuje vlastní regulátor napětí, který mění vstupní napájecí napětí na 5V, což je pro řídicí část optimální napájení. Ještě lepší variantou by bylo napájení A/D převodníků z přesného referenčního zdroje k dosažení menší chyby při digitalizaci informace.

Posledními porty, které deska ještě obsahuje, jsou rozhraní pro programování JTAG port, ISP port a propojka na programovací jumper.

6.2 Popis výkonové nabíjecí části

Přes vstup/výstupní komunikační port řídicí desky je připojena výkonová nabíjecí část, která se dá pomyslně rozdělit na několik samostatných celků.

Prvním z nich, směrem od vstupních svorek pro napájecí napětí, je ochranné oddělení (viz. Obr. 6.1).



Obr. 6.1: Ochranné oddělení vstupu

Oddělení je realizováno unipolárním MOS-FET tranzistorem (typ N) s indukovaným vodivým kanálem. Při správně polarizovaném napájecím napětí je na řídicí vstup (G) tranzistoru Q1 přivedeno přes rezistor R37 kladné napětí, což umožní vytvoření vodivého kanálu mezi D a S. Tím je tranzistor otevřen a tedy napájen celý obvod. Díky rezistoru R38 vznikne mezi vstupními svorkami napěťový dělič, který nikterak zásadně nezatěžuje obvod (proud děličem se pohybuje kolem 1mA), avšak napomáhá udržení tranzistoru v otevřeném stavu. Pokud by, například chybou uživatele, došlo k přepólování vstupních svorek, nestane se prakticky nic, protože nedojde k naindukování vodivého kanálu a tranzistor zůstane zavřený.

Další částí je samotná nabíjecí výkonová část. Nabíjení a tedy průtok proudu směrem od zdroje k akumulátoru je řízeno (spínáno) pomocí MOS-FET tranzistoru Q2 (typ P). Aby byl snížen proudový náraz je s ním v sérii zapojena tlumící cívka L1, která je patřičně dimenzována, protože přes ní poteče nabíjecí proud. Dále jsou zde zapojeny rychlé shottky diody na ochranu tranzistoru Q2 před indukovanými vysokonapěťovými pulzy. Obvod je ještě doplněn o MOS-FET tranzistor Q3, který je použit na velmi krátký zkratovací impuls umístěný mezi nabíjecí impuls a měřicí část. Tento impuls sníží napětí na akumulátoru, které je vlivem nabíjení vyšším napětím v tu chvíli vyšší než napětí na prázdně. To zpřesňuje měření napětí a rozhodování, zda již není akumulátor plně nabitý. Poslední dva tranzistory Q4 a Q5 slouží pro připojení vhodného odporu do série k akumulátorům a to na základě nabíjecího proudu. Měření nabíjecího (i vybíjecího) proudu je totiž založeno na principu sledování úbytku napětí na rezistoru. Pro měření jsou navrženy dvě cesty. První s odporem 0,1 Ω (rezistor R44) pro proudy do 1A a druhá s odporem 0,01 Ω (rezistor R43) pro proudy od 1 do 10A. Volba cesty záleží na uživatelsky nastaveném nabíjecím proudu a provádí se právě sepnutím buď tranzistoru Q4 nebo Q5. Takto rozdílné rozsahy jsou zvoleny z důvodu maximálního výkonového zatížení (napětí na odporu X proud odporem tekoucí). Druhou možností by bylo zvolit pouze jeden odpor např. 0,1 Ω . Jenže maximální výkonové zatížení by pak vzrostlo na 10W a rezistor s takovými parametry je podstatně větší a tím by logicky došlo i ke zvětšení

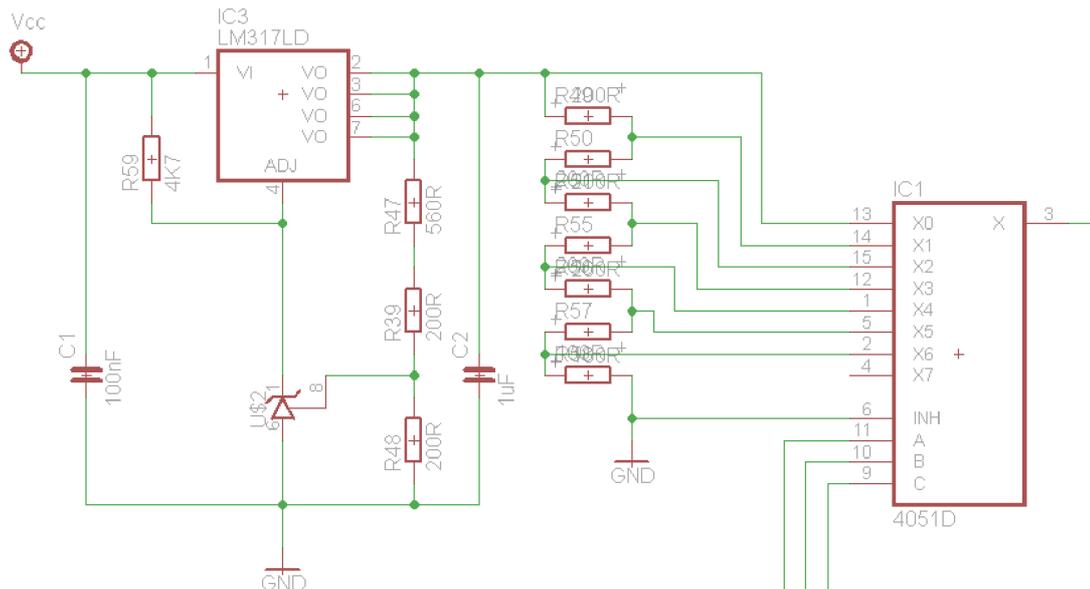
celého zařízení a to by při snaze o kompaktní rozměry nepřinášelo takový efekt. Navíc by stouply i nároky na chlazení zařízení, což má opět neblahý vliv na rozměry.

Podstatnou část navržené desky zabírá také oblast s napětovou referencí (viz. Obr. 6.2), jejíž výstupní V_0 napětí je dáno vztahem:

$$V_0 = \left(1 + \frac{R_{39} + R_{41}}{R_{48}}\right) * V_{ref}$$
$$V_0 = \left(1 + \frac{760}{200}\right) * 2,5 = (1 + 3,8) * 2,5 = 12V \quad (6.1)$$

Výstupní napětí z referenčního zdroje je přivedeno na odporový dělič, kde je rozděleno na vhodné úrovně (1V, 2V, 4V, 6V, 8V, 10V a 12V). Zvolené napětí je pak připojeno přes multiplexer (IC1) na vstup operačního zesilovače a použito jako reference, ke které se vztahuje měřené napětí akumulátoru. Jelikož napětí z referenčního zdroje by mělo být velmi přesné, proto jsou také na zapojení použity rezistory s přesností 0,1%, může být i napětí na vstupu operačního zesilovače považováno za precizní. Celá tato část je navržena pro docílení velmi jemného rozlišení napětí na vstupu A/D převodníku, protože při podložení měřeného napětí správně zvoleným referenčním napětím je rozsah posunut do oblasti maximálně 5V od reference. Přesnost měření je pak dána rozlišením A/D převodníku (12bitů) na 5V rozsahu. To odpovídá měřitelnému rozlišení asi 1mV. Pokud bereme v úvahu, že na posledním bitu bude chyba měření včetně šumu a omezíme se na 11bitový převod, pak je rozlišení asi 2mV.

Druhou úspornější možností by bylo nepoužívat napětovou referenci, ale napětí pomocí operačního zesilovače snížit tak, aby odpovídalo maximálnímu měřitelnému rozsahu A/D převodníku. Tím by se značně zjednodušilo zapojení celého obvodu pro měření napětí článků, ale vzrostla by chyba a to s násobkem dělitele použitým u operačního zesilovače. Takto je docíleno rozlišení zhruba 5mV až 10mV, což je v praxi hraniční hodnota, kterou by nabíjecí zařízení, založené na metodě delta peak, mělo minimálně zvládat.



Obr. 6.2: Zapojení referenčního zdroje podkládacího napětí

Poslední část nabíjecí desky patří výše zmíněnému balanceru (viz. Obr. 5.2). Napětí je snímáno pomocí operačního zesilovače zapojeného jako rozdílový [22] a výstupní napětí je dáno vztahem:

$$U_0 = \frac{R_0}{R_1} * (U_2 - U_1) \quad (6.2)$$

kde U_2 je napětí na neinvertujícím vstupu a U_1 je napětí na vstupu invertujícím. Rozdíl napětí se dá ještě vhodnou volbou odporu R_1 a R_0 zesílit případně zeslabit, pro dodržení pracovního rozsahu napětí, které zvládá snímat A/D převodník. Pokud zvolíme shodné hodnoty odporu, je výstupní napětí přímo rovno napětí jednoho lithiového článku, připojeného mezi svorky operačního zesilovače. Tento stav je vyhovující, protože dosud vyráběné nabíjecí lithiové články se pohybují v rozsahu napětí od 2,3V (minimální napětí jednoho LiFe článku) po napětí 4,2V (což je maximální napětí jednoho LiPo článku). S takovým rozsahem napětí si zvolený A/D převodník poradí naprosto ideálně s dostatečnou přesností. Pokud došlo k překročení rozsahu na jedné nebo druhé straně, bude tento stav signalizován jako chybný a

nedojde k nabíjecímu (ani vybíjecímu) cyklu.

Ke snímání napětí na jednotlivých článcích připojených k balanceru dochází nepřetržitě, avšak nelze ho nepřetržitě měřit u všech článků současně, protože k dispozici je pouze jeden kanál A/D převodníku (finanční úspora, protože A/D převodníky jsou oproti OZ podstatně dražší). Odečítání jednotlivých napětí probíhá v cyklicky se opakujících intervalech. Pomocí multiplexeru jsou na vstup převodníku postupně spínány výstupy operačních zesilovačů měřených článků.

Řízení je uskutečňováno na základě vyhodnocení změřeného napětí (článku), hodnoty nabíjecího proudu a celkového napětí celé sady (akupacku). Pro články s vyšším napětím, je po dobu jedné periody nabíjecího a měřicího cyklu, přes optočlen otevřen odpovídající tranzistor (Q7 až Q10) a tím je uzavřen obvod pro malé vybíjení zvoleného článku. Vybíjecí proud je dán vztahem:

$$I_{vyb} = \frac{U_{rezistoru}}{R_{zateze}} \quad (6.3)$$

$$U_{rezistoru} = U_{clanku} - U_{diody} - U_{tranzistoru} \quad (6.4)$$

To by např. znamenalo, že při stále otevřeném tranzistoru, bude vybíjecí proud jednoho LiPo článku roven:

$$I_{vyb} = \frac{(U_{clanku} - U_{diody} - U_{tranzistoru})}{(4 \parallel R_{zateze})} \quad (6.5)$$

$$I_{vyb} = \frac{(4,2 - 0,7 - 0,7)}{(4 \parallel 68)} = \frac{2,8}{17} \approx 165\text{mA} \quad (6.6)$$

Tento proud je dostatečně nízký, aby zásadně neovlivňoval nabíjecí proces, ale zároveň dostatečný pro vyrovnání napětí článků na konci nabíjecího cyklu. Při vybíjení se balancování nepoužívá, ale servisní konektor může být připojen a tím umožněno měření napětí jednotlivých článků.

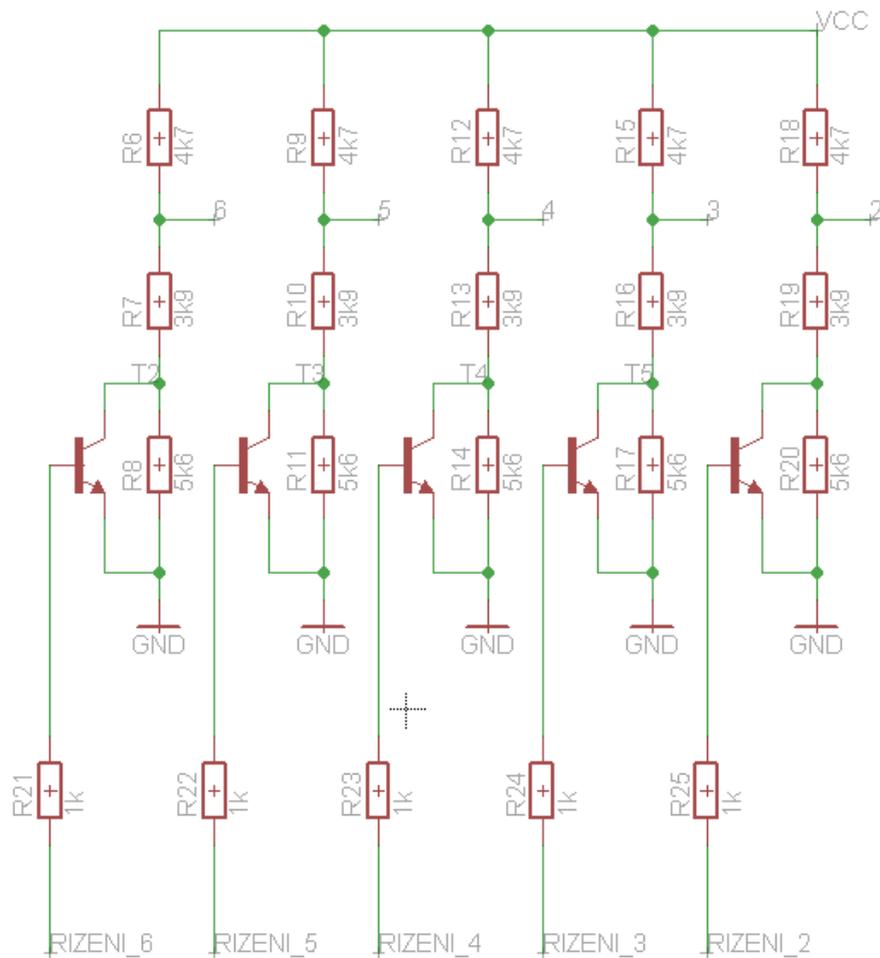
Zvýšení vybíjecího proudu balanceru je možné výměnou čtveřic paralelně zapojených rezistorů za rezistory s nižší hodnotou. Takto je možné posunout vybíjecí proud až na hodnotu 360mA, což je maximální možná hodnota s ohledem na výkonové zatížení rezistoru (0,25W na jeden rezistor tj. 1W celkem) a následně i tranzistoru ($I_{c\ MAX} = 500mA$).

$$I_{vybMAX} = \frac{P_{celkove}}{U_{rezistoru}} = \frac{1}{2,8} \approx 360mA \quad (6.7)$$

Zvýšením proudu tekoucího v obvodech balanceru lze urychlit nabití článku s korektním vyrovnaním. To sebou však přináší sofistikovanější metodu řízení obvodů balanceru například pomocí metody PWM.

6.3 Oprava nedostatků (middle layer)

Při návrhu výkoné nabíjecí vrstvy nebyla korektně vyřešena konverze mezi rozdílným napětím spojených desek a také hardwarové ošetření některých hazardních stavů řízení. A jelikož demontáž a přepájení SMD součástek na upravenou je velmi složitá, byla navržena tzv. střední vrstva pro opravu vzniklých nedopatření. Opět by se nechala rozdělit na několik dílčích částí. První z nich řeší napěťovou konverzi (viz. Obr. 6.3) rozhodovacích úrovní pro multiplexery (IC1 a IC2).



Obr. 6.3: Napěťová konverze logických úrovní

Napěťové úrovně pro logiku mikrořadiče a CMOS multiplexeru se podstatně liší a to zvláště pak při rozdílném napájení. Řešení problému vychází z odporového děliče. Díky vhodně zvoleným hodnotám jednotlivých odporů, je možné přesně nastavit hodnotu logické 1 a při otevření PNP tranzistoru i logické 0. Pro jednodušší výpočet budeme uvažovat napájecí napětí 14,2V.

$$I = \frac{V_{cc}}{R_{celkove}} = \frac{14,2}{(14,2 * 10^3)} = 1 \text{ mA} \quad (6.8)$$

Pokud je tedy řídicí tranzistor (Q1 až Q5) zavřen, je úroveň napětí na

odbočce (2 až 6) vedoucí k multiplexeru (např. pro řízení č.6) rovno:

$$U_{(\log 1)} = (R_8 + R_7) * I = (5,6 * 10^3 + 3,9 * 10^3) * 10^{-3} = 9,5 V \quad (6.9)$$

což je hodnota v rozsahu odpovídajícím log. úrovni 1 dle [19]. Podobně je tomu tak i pro logickou 0.

$$I = \frac{(V_{cc} - 0,7)}{(R_6 + R_7)} = \frac{13,5}{(8,6 * 10^3)} \approx 1,6 mA \quad (6.10)$$

$$U_{(\log 0)} = R_7 * I + 0,7 = (3,9 * 10^3) * (1,6 * 10^{-3}) + 0,7 V \approx 6,9 V \quad (6.11)$$

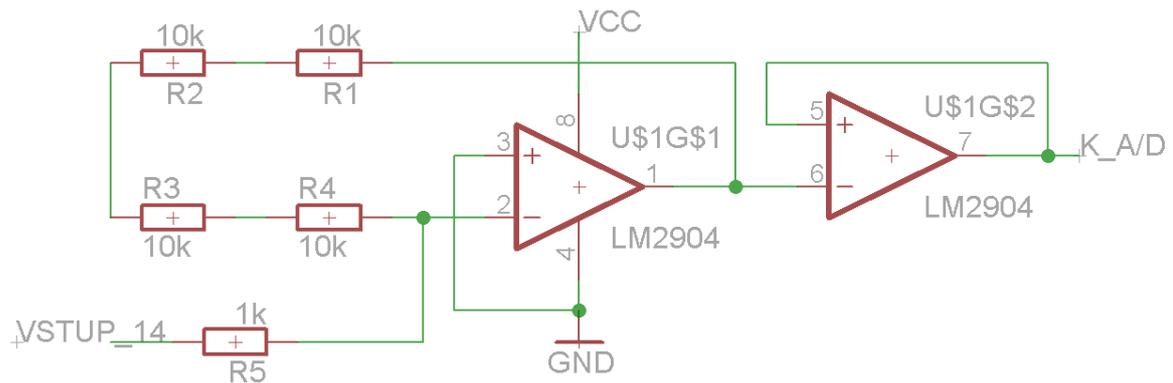
Další část middle layer je tvořena dvojicí operačních zesilovačů. Oba v invertujícím zapojení, což zajišťuje zesílení napětí sloužícího pro určení nabíjecího proudu.

Snímané napětí je díky velmi malým hodnotám odporů řádově desítky mV a tomuto rozsahu by se při převodu v A/D převodníku špatně určovala odpovídající hodnota. Snímané napětí je nejprve zesíleno (viz. Obr. 6.4) a následně až měřeno.

Aby bylo využito maximálního rozsahu převodníku, je původní napětí (10 až 100mV) zesíleno 40krát. Tím se dostáváme na hodnoty 0,4 až 4V. Jelikož se jedná o OZ v invertujícím zapojení je nutné použít ještě druhý OZ pro zpětný převod. Ten již bude mít pouze jednotkové zesílení. Zesílení na invertujícím zapojení operačního zesilovače je dáno vztahem [22] :

$$U_{\text{vystupni}} = -\left(\frac{R_0}{R_1}\right) * U_{\text{vstupni}} = -k * U_{\text{vstupni}} \quad (6.12)$$

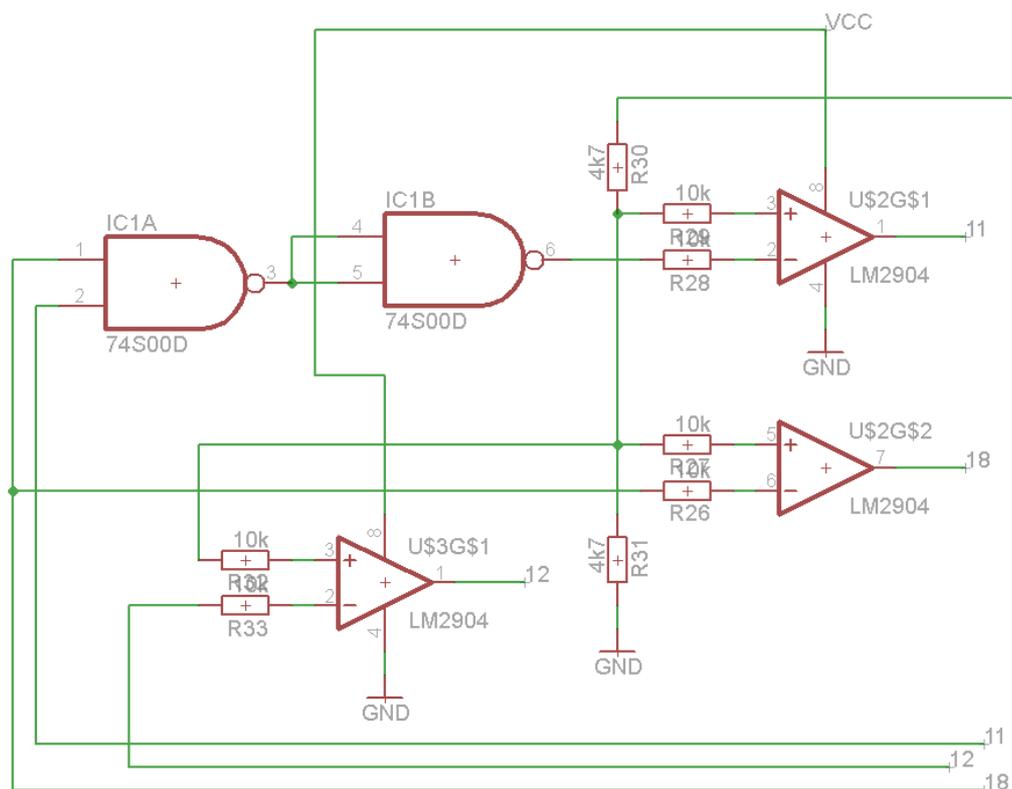
$$U_{\text{vystupni}} = \frac{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)}{R_5} * U_{\text{vstupni}} = \frac{-(40 * 10^3)}{10^3} * U_{\text{vstupni}} = -40 * U_{\text{vstupni}} \quad (6.13)$$



Obr. 6.4: Zapojení napětového zesílení úbytku napětí na odporu

Poslední částí middle layer je hardwarová logika pro ošetření hazardního stavu. Jinými slovy je nutné zabezpečit, aby tranzistory Q2 a Q3 na výkonové nabíjecí desce nikdy nemohly být otevřeny současně. To by pak došlo ke zkratování zdroje a následnému zničení buď pojistky ve zdroji nebo třeba ke zničení MOS-FET tranzistoru v nabíjecí části zařízení. Správné řízení by mělo být zajištěno mikrořadičem, jenže ten má určité zpoždění při zapnutí systému (restartu) a pak by již mohlo být pozdě. Protože hardwarové zakázání nedovoleného stavu je podstatně rychlejší, neměl by takový stav nastat. Pro fyzické řešení je použito dvou hradel NAND.

Při návrhu bereme v úvahu pouze dva stavy řízení, zapnuto rovno log. 1 a vypnuto rovno log. 0 pro tranzistor typu N (Q3). Pro tranzistor typu P (Q2) je situace přesně opačná (0 zapnuto a 1 vypnuto). Pokud označíme řídicí vodiče například čísly pinu komunikační sběrnice, jak je vidět na zapojení (viz. Obr. 6.5), je nutné zakázat výstupní stav, kdy je na pinu 11 log. 0 (tranzistor Q2 otevřený) a na pinu 18 log. 1 (Q3 otevřený).

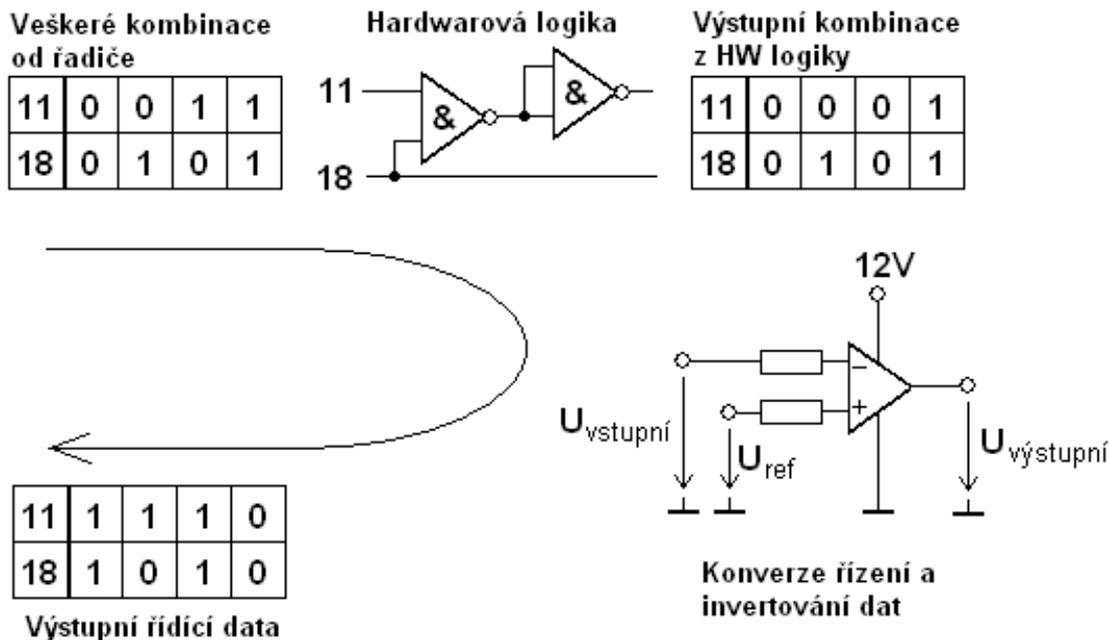


Obr. 6.5: Zapojení hardwarového zamezení hazardního stavu

Postup převodu vstupní informace na výstupní řídicí data je naznačen na obrázku 6.6. I pro celkové zjednodušení nabíjecí části je na této desce zapojena napěťová konverze, takže výstupy (11,12,18) jsou již přímo připojeny na řídicí vstupy MOS-FET tranzistorů. Operační zesilovače jsou nyní v zapojení napěťového komparátoru. [22]

Middle layer je nyní nedílnou součástí návrhu zařízení a zabezpečuje korektní komunikaci všech obvodů s různým napájecím napětím a ošetřen velmi nebezpečný stav, který mohl nastat v okamžiku zapnutí zařízení.

Změnou návrhu nabíjecí části tak, aby nebyla middle layer potřebná je v plánu až na další verzi zařízení. Ta však bude přímo kompatibilní s řídicí částí a externí výkonovou vybíjecí částí.



Obr. 6.6: Znárodnění fungování hardwarové logiky middle layer

6.4 Popis externí výkonové zátěže pro vybíjení

Poslední částí celého návrhu je připojitelná výkonová zátěž. Její návrh klade důraz na velké tepelné ztráty a je připravena pro osazení rozměrným chladícím systémem. Proto již není tak úzce propojena s ostatními částmi zařízení. Díky tomu je zařízení ve své podstatě kompaktní a lze jej bez extrení zátěže použít jako velmi rychlou inteligentní nabíječku. Teprve výkonová zátěž však z celého systému vytváří tester.

Zátěž je tvořena 8-mi paralelně zapojenými bipolárními tranzistory, přes jejichž pouzdra bude odváděno vzniklé teplo do chladiče. Navrženy jsou pro připojení na jeden chladič, aby byla zajištěna shodná teplota a nedocházelo tak vlivem rozdílu teploty k přetěžování některého z nich. Proud do báze tranzistorů (Q1 až Q8) je řízen dalším tranzistorem Q9. Pokud budeme uvažovat maximální zatížení 30A, které se rovnoměrně rozdělí mezi tranzistory Q1 až Q8, pak každým z nich bude protékat 3,75A. Při tomto

proudu je proudový zisk tranzistorů $h_{21E} = 80$ viz datasheet.[23] Což znamená, že na bázi každého z nich je nutné dodat zhruba 0,047A. Celkem tedy 0,38A, takže stačí jeden tranzistor Q9 pro celé řízení. Otevření tranzistoru Q9 je řízeno přímo z mikrořadiče pouze přes omezující odpor R1. Řízení probíhá pomocí PWM modulace.

Princip snímání protékajícího proudu je shodný jako výše popsany princip při nabíjení. Je měřen úbytek napětí na odporech, který je následně neinvertujícím operačním zesilovačem 8krát zesílen. Vybíjecí proud je zvolen na 1 až 30A, což na pěti paralelně zapojených rezistorech s celkovým odporem $0,02\Omega$, odpovídá úbytku maximálně 0,6V a minimálně 0,02V. Po zesílení je tedy měřené napětí v rozsahu od 160mv do 4,8V.

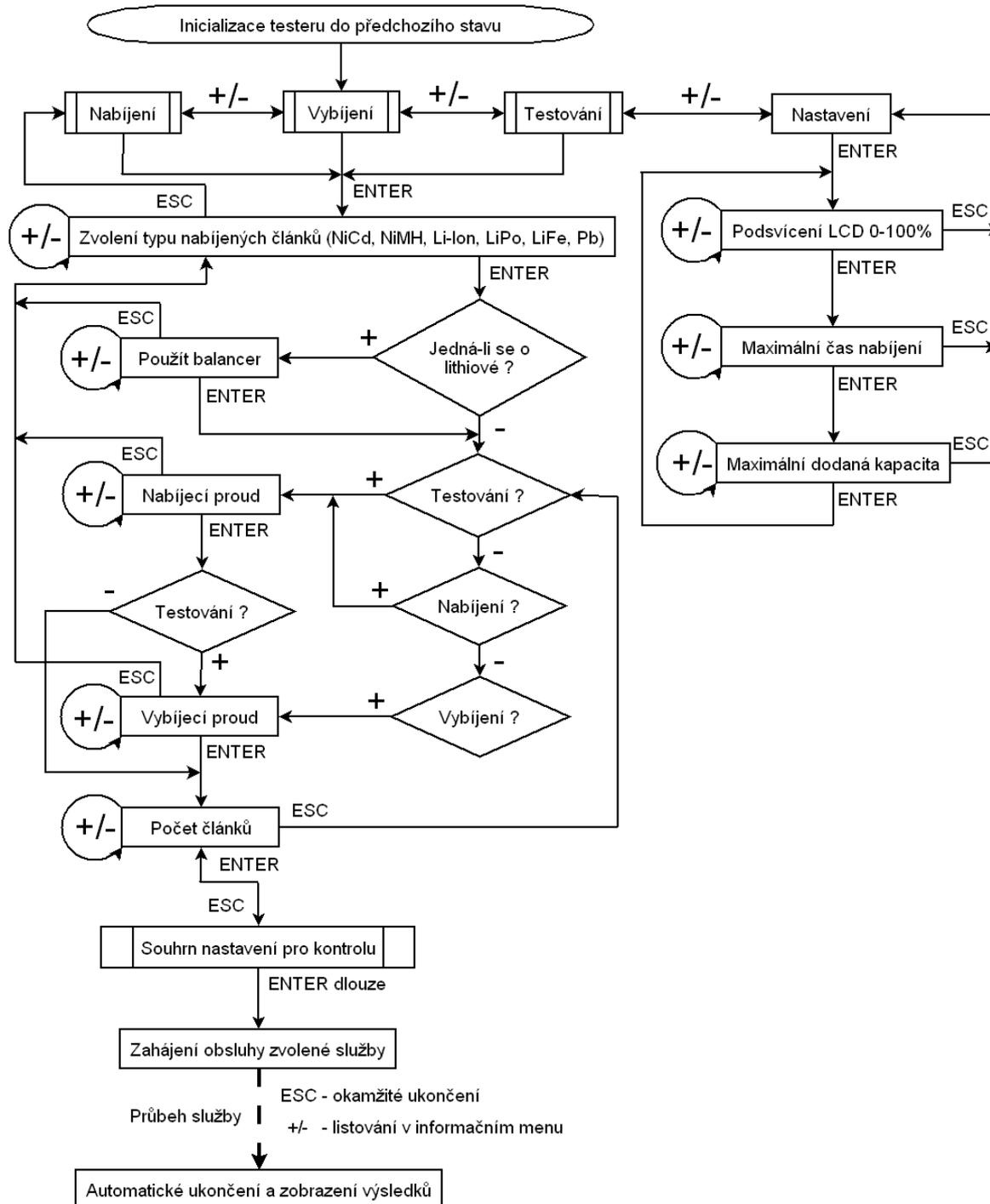
6.5 Návrh životního cyklu

Každé zařízení má svůj životní cyklus (algoritmus), na který je navrženo a od něj se také odvíjí jeho funkce.

Cyklus začíná připojením zařízení ke zdroji a následkem toho proběhne inicializace. Inicializací testeru je myšleno nastavení všech vstupů a výstupu podle připraveného softwaru. Dále pak zobrazení odpovídající informace na LCD displeji, jako zpětnou vazbu uživateli, že vše proběhlo v pořádku a zařízení čeká na další nastavení. Uživateli je umožněno procházet menu zařízení a nastavovat ho podle potřeby, ale zařízení zatím stále nic jiného nevykonává. Pokud uživatel skončí veškerá nastavení pak pokračuje ve zvoleném režimu (nabíjení, vybíjení, testování) tlačítkem START. V tu chvíli přichází na řadu výkonná logika testeru a zařízení začne pracovat ve zvoleném režimu. Nejprve dojde k testování článku, zda jsou vůbec připojeny a také jestli splňují zadaná kritéria. Pokud ne, tester opět přejde do nečinného režimu a upozorní uživatele na chybu výpisem na LCD. Ten může na problém reagovat přenastavením vstupních parametrů nebo také zkontrolovat připojení akumulátoru. Proběhne-li testování připojených článků v pořádku ihned je zahájen zvolený cyklus. V průběhu cyklu je uživatel opět

informován o současném stavu prostřednictvím zpráv zobrazovaných na displeji, případně zasíláním hodnot na připojený PC. Po dokončení obsluhované služby, tester na LCD displeji zobrazí výsledné hodnoty a přejde opět do nečinného stavu, kde čeká na další požadavky uživatele. Zároveň jsou do paměti mikrořadiče zapsány údaje o posledním nastavení, aby je uživatel nemusel při příštím připojení testeru opět všechny nastavovat a použití bylo pohodlnější.

6.6 Návrhnuté uživatelské menu



Obr. 6.7: Navigační schéma uživatelského menu

6.7 Popis řídicího algoritmu (programu)

Pro programování mikrořadiče je možné zvolit rozhraní SPI nebo JTAG, které umožňují konfiguraci nejen flash paměti (paměť programu), ale také paměti EEPROM. Ta může být využita k uložení uživatelsky zadaných dat. Třetí možností by teoreticky mohlo být programování i přímo přes USB, které řídicí deska také poskytuje. Při návrhu však s touto možností nebylo počítáno a vyžadovala by úpravu v zapojení.

Jako vývojové prostředí pro psaní programu byl zvolen program AVR Studio, které je volně k dispozici po registraci na stránkách Atmelu. Prostředí však neobsahuje překladač, takže je nutné jej doinstalovat. Rozumnou volbou je WinAVR, který je také volně dostupný.

Pro přenos přeloženého programu (hexadecimální kód) do zařízení je ještě nutný programátor, který implementuje některé z výše uvedených rozhraní.

Program psaný v jazyce C vždy musí obsahovat main funkci, která je volána při spuštění programu, tedy při přivedení napájecího napětí na odpovídající piny mikrořadiče. Pro správný běh a korektní řízení mikrořadičem je důležité, aby main funkce nebyla nikdy ukončena po dobu celého životního cyklu. To se nejčastěji řeší nekonečnou smyčkou. Níže uvedený kód zobrazuje právě hlavní main funkci programu.

V první jeho části je inicializace důležitých proměnných, používaných v celém zbytku kódu, pro správné řízení a zobrazování na LCD displej. Použití v dalších funkcích je zajištěno dynamickým předáváním parametrů pomocí pointerů (ukazatele na místa v paměti). Definici pole kod, datového typu int, je zde uvedena s implicitními hodnotami, které jsou výchozí pro první nastavení zařízení. Při dalším spuštění zařízení se již používají data nastavena uživatelem, která se v průběhu programu ukládají do paměti EEPROM. Implicitní nastavení je zvoleno tímto způsobem, na místo přímého uložení do uživatelské paměti, protože pokud by došlo k náhodnému smazání EEPROM (např. vlivem nízkého napájecího napětí při zápisu do této paměti [11]), nemělo by zařízení vstupní data a mohl by nastat nedefinovaný stav. Pokud jsou však součástí přeloženého programu, data se uloží do flash paměti, do

kteřé je zápis během normálního režimu zakázán. Tímto je zajištěno korektní načtení vstupních dat jak pro řízení, tak pro zobrazení.

Dále jsou v programu volány funkce pro inicializaci portů mikrořadiče na zvolené hodnoty a inicializace řadiče LCD displeje. Pro orientační otestování knihoven se zpožděním a zobrazovacích schopností displeje programátorovi slouží funkce LCDAnimace. Pro uživatele může být určitým zpřijemněním před vstupem do konfiguračního menu.

Poslední částí main funkce je výše zmíněná nekonečná smyčka, kde jsou také odchyťávány případné uživatelské vstupy od klávesnice pomocí testování funkce Tlačítko.

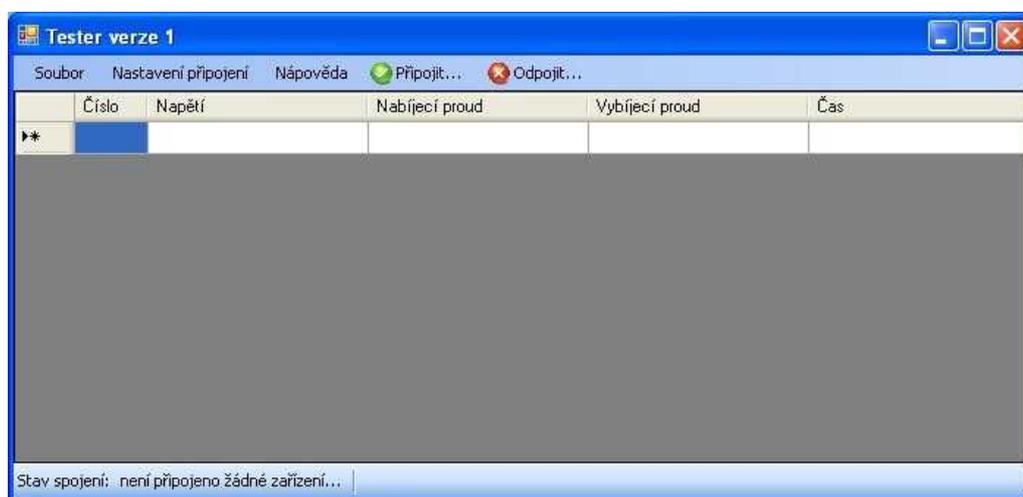
```
void main(void)
{
    //*****
    // Promene pro praci s menu LCD
    int level[2] = {1,0};
    int kod[20] = { 2,0,50,0,2,
                  4,1,0,100,3,
                  1,0,50,80,7,
                  0,0,100,120,6000};

    // kod na sluzbu, typ, balancer, proudN, proudV, pocet cl.
    // pro 4.radek x,x,podsviceni,cas,kapacita
    int vyber = 0;

    // Pro stav tlacitek
    int tl[4] = {0,0,0,0};
    //*****
    // Nacteni promenych z EEPROM
    if(EEPROM_read(0x00) != 0xFF)
        NacteniPromenych(&vyber,kod);
    //*****
    // Inicializece
    PORTinit();
    LCDinit();
    // Uvodni animace a prechod do menu
    LCDAnimace();
    ZobrazMenu(kod,&vyber,level);
    // Cyklus na obsluhu tlacitek
    for(;;){
        if(Tlacitko(tl,kod,&vyber,level) == 0)
            for (int k=0; k<4;k++)
                tl[k] = 0;
    }
}
```

Dále jsou v programu již jen obsluhovány události vyvolané stiskem některého z tlačítek. Dochází tedy k modifikaci proměnných a nastavení celého zařízení. Teprve až se uživatel prokliká přes menu k potvrzení jeho nastavení a pokračuje klávesou ENTER, spustí se obslužná rutina na vykonání zvolené služby. V tu chvíli se zařízení stává aktivním a zahájí se testování článků. Program přejde do cyklického zpracovávání kombinace změřených a nastavených dat. Po skončení obsluhy se chod programu opět vrací k původní smyčce testující uživatelský vstup z klávesnice.

Změřené hodnoty jsou při zpracování uloženy do připravených proměnných, a proto jejich export do počítače není složitý a probíhá vždy po zvolené době. Ta se odvíjí od přerušení vyvolaného čítačem, jehož čítání se je závislé na nastavní inicializační hodnoty a na knitočtu druhého krystalu obsaženého na desce. Program v počítači (viz Obr. 6.8) je vytvořen pro pouhé zpracování dat a možnosti jejich uložení do souboru. V plánované druhé verzi, bude schopen přímo zobrazovat graf z přijímaných hodnot a umožňovat nastavení zařízení přímo z počítače.



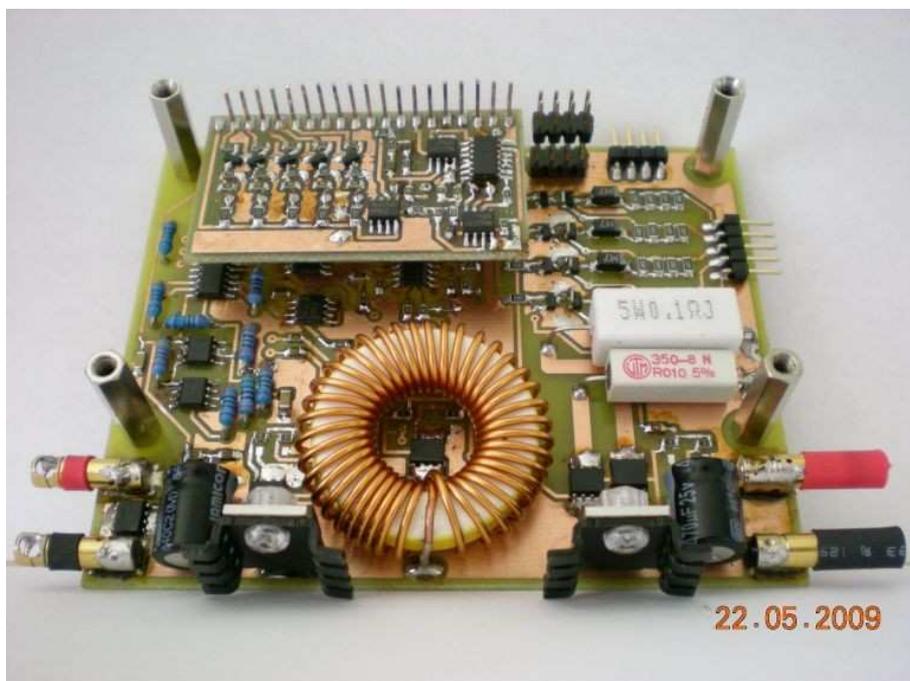
Obr. 6.8: Zobrazení okna programu pro zpracování dat v počítači

6.8 Konstrukce zařízení

Pro ilustraci jsou zde uvedeny fotografie vytvořeného zařízení.



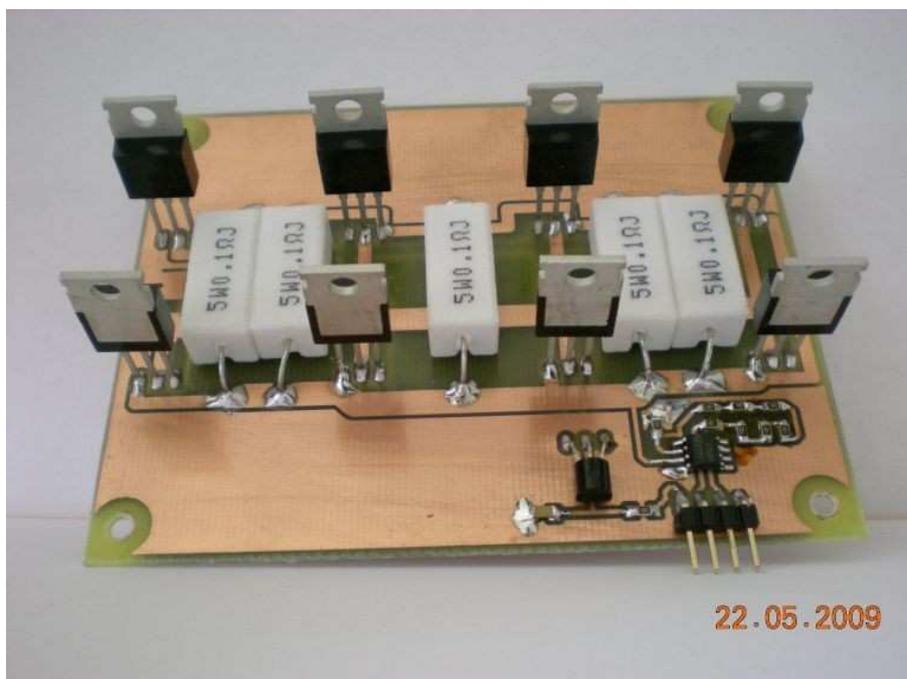
Obr. 6.9: Zobrazení řídicí části zařízení



Obr. 6.10: Výkonová část zařízení s opravnou deskou



Obr. 6.11: Celková sestava výkonové nabíjecí části testeru



Obr. 6.12: Externí výkonová zátěž bez chladiče

7 ZÁVĚR

Testování a celková analýza článků, za jejich životní cyklus, je důležitá především s ohledem na možnosti jejich využití. Například v oblastech modelářství se v současné době velmi horlivě diskutuje nad tématem pohonných akumulátorů. Nikl-cadmiové (NiCd) články již dávno nevyhovují velkým nárokům kladeným na články při rychlostních závodech. Jejich nástupci nikl-metal-hydride (NiMH) se již také stávají zastaralou a paradoxně i znatelně dražší záležitostí než lithiové články. Jejich výkony jsou často více než dostačující, ale tuto skutečnost kazí fakt, že údržba je velmi náročná a životnost krátká. Proto je vhodné testovat články za účelem nalezení optimální zatěžovací charakteristiky.

Navržené zařízení by mělo sloužit pro testovací účely všech výše zmíněných článků a to právě v podmínkách extrémního zatížení článků, případně zařízení, pokud charakteristiky článků převyšují možnosti zařízení. Další využití je také jako kompaktní samostatný nabíječ, pokud bude odpojena externí zátěž.

Data získaná při nabíjení a vybíjení je pak možné použít jako vhodný základ při optimalizaci zařízení, které díky článkům určitým způsobem pracuje. A to ať už se jedná o model auta, skutečný automobil budoucnosti nebo třeba družici na oběžné dráze.

8 LITERATURA

- [1] *Nickel Metal Hydride* [online]. 2004 [cit. 2008-12-08]. Dostupný z WWW: <<http://www.elektroda.pl/rtvforum/download.php?id=223020>>
- [2] *Technical Hand Book* [online]. 2006 [cit. 2008-12-08]. Dostupný z WWW: <http://www.gpbatteries.co.uk/downloads/technical_handbooks/GP_NiCd_Technical.pdf>
- [3] *Technical Hand Book* [online]. 2006 [cit. 2008-12-08]. Dostupný z WWW: <http://www.gpbatteries.co.uk/downloads/technical_handbooks/GP_NiMH_Technical.pdf>
- [4] *What is eneloop?* [online]. 2007 [cit. 2008-12-08]. Dostupný z WWW: <<http://www.eneloop.info/>>
- [5] *Lithium Ion Technical Manual* [online]. 2004 [cit. 2008-12-08]. Dostupný z WWW: <http://www.moltechpower.co.uk/pdfs/LithiumIon_Technical_Manual2.pdf>
- [6] *Akumulátory Lithium-Polymer* [online]. 2007 [cit. 2008-12-08]. Dostupný z WWW: <http://vyuka.fel.zcu.cz/kae/NSA/Texty/Akum_Lipol.pdf>
- [7] *High Power Lithium Ion* [online]. 2008 [cit. 2008-12-08]. Dostupný z WWW: <http://a123systems.textdriven.com/product/pdf/1/ANR26650M1_Datasheet_AUG_UST_2008.pdf>
- [8] *Návod k použití pro akumulátory Lithium Polymer* [online]. 2006 [cit. 2008-12-08]. Dostupný z WWW: <<http://www.horejsi.cz/czech/akku/navodlipo.pdf>>
- [9] *Olověné akumulátory* [online]. 2007 [cit. 2008-12-08]. Dostupný z WWW: <<http://www.jergym.hiedu.cz/~canovm/elektro/clanky2/olov.pdf>>
- [10] LÁNÍČEK, R. : *Elektronika - obvody, součástky, děje*. Praha, BEN 1998
- [11] *Datasheet AVR ATmega128* [online]. 2008 [cit. 2009-16-05]. Dostupný z WWW: <http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2467.pdf>
- [12] *Datasheet LCD MC1602E* [online]. 2009 [cit. 2009-16-05]. Dostupný z WWW: <http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/513/513-128/dsh.513-128.1.pdf>
- [13] *Datasheet MCP3202* [online]. 2009 [cit. 2009-16-05]. Dostupný z WWW: <http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/931/931-011/dsh.931-011.1.pdf>

- [14] *Datasheet FT232R* [online]. 2009 [cit. 2009-16-05]. Dostupný z WWW: <http://www.ftdichip.com/Documents/DataSheets/DS_FT232R_V202.pdf>
- [15] *Datasheet IRF7413* [online]. 2009 [cit. 2009-16-05]. Dostupný z WWW: <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/68232/IRF/IRF7413.html>>
- [16] *Datasheet TPC8111* [online]. 2009 [cit. 2009-16-05]. Dostupný z WWW: <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/88394/TOSHIBA/TPC8111.html>>
- [17] *Datasheet LM2904 SMD* [online]. 2009 [cit. 2009-16-05]. Dostupný z WWW: <http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/925/925-007/dsh.925-007.1.pdf>
- [18] *Datasheet LM324 D SMD* [online]. 2009 [cit. 2009-16-05]. Dostupný z WWW: <http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/925/925-002/dsh.925-002.1.pdf>
- [19] *Datasheet 4051* [online]. 2009 [cit. 2009-16-05]. Dostupný z WWW: <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/173652/UTC/4051.html>>
- [20] *Datasheet TL431 SMD* [online]. 2009 [cit. 2009-16-05]. Dostupný z WWW: <http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/934/934-007/dsh.934-007.1.pdf>
- [21] *Datasheet HD44780* [online]. 2009 [cit. 2009-16-05]. Dostupný z WWW: <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/63673/HITACHI/HD44780.html>>
- [22] *Operační zesilovače* [online]. 2009 [cit. 2009-16-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.isse.pr-net.cz/materialy/Elektronika/OZ.doc>>
- [23] *Datasheet BD711* [online]. 2009 [cit. 2009-16-05]. Dostupný z WWW: <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/21996/STMICROELECTRONICS/BD711.html>>
- [24] *Datasheet BC489* [online]. 2009 [cit. 2009-16-05]. Dostupný z WWW: <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/2888/MOTOROLA/BC489.html>>

9 PŘÍLOHY

A ŘÍDÍCÍ ČÁST

- A.1 Schéma zapojení
- A.2 Deska plošného spoje (vrchní strana)
- A.3 Deska plošného spoje (spodní strana)

B VÝKONOVÁ NABÍJECÍ ČÁST

- B.1 Schéma zapojení
- B.2 Deska plošného spoje (vrchní strana)
- B.3 Deska plošného spoje (spodní strana)

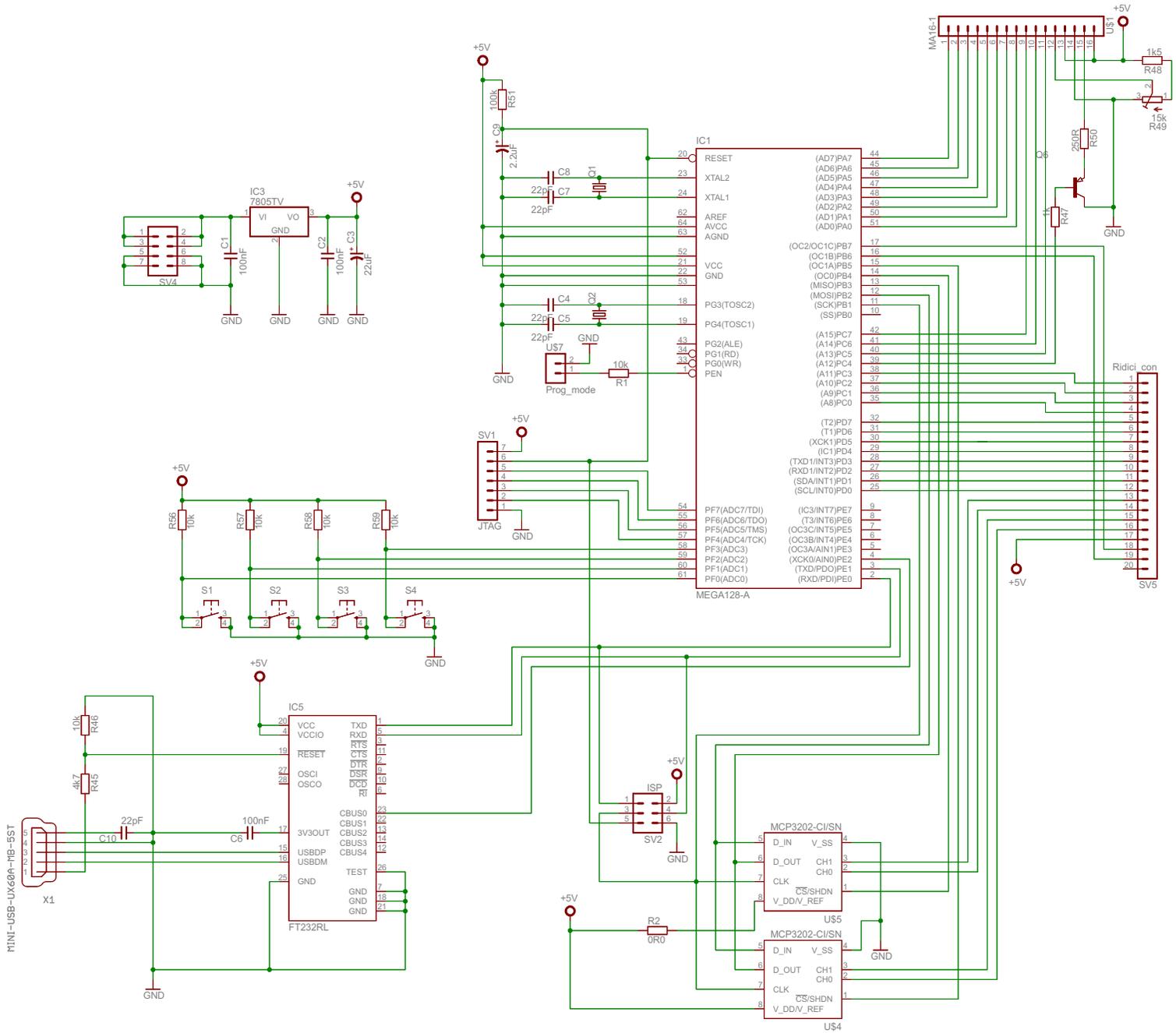
C MIDDLE LAYER

- C.1 Schéma zapojení
- C.2 Deska plošného spoje (vrchní strana)
- C.3 Deska plošného spoje (spodní strana)

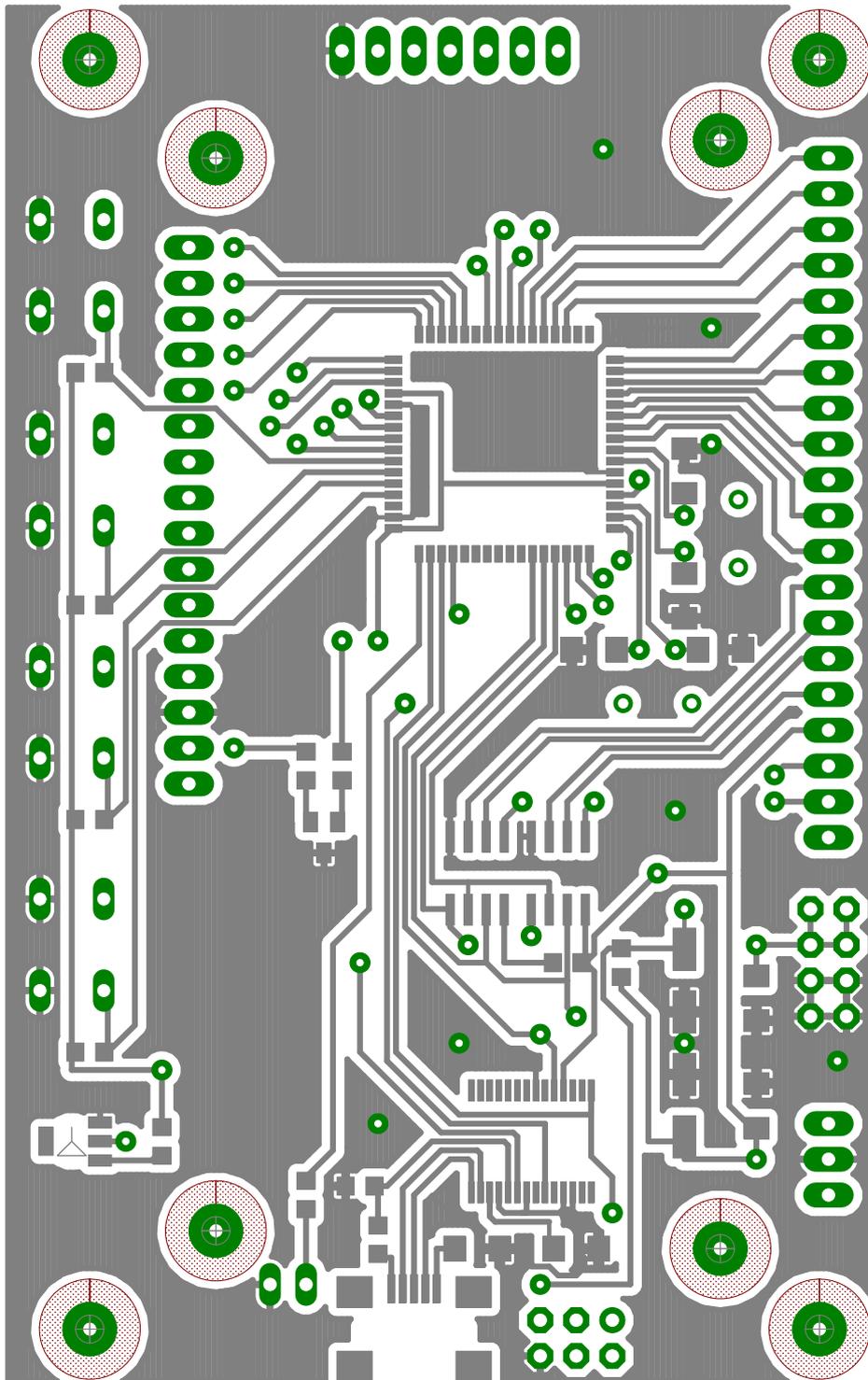
D EXTERNÍ VÝKONOVÁ ZÁTĚŽ

- D.1 Schéma zapojení
- D.2 Deska plošného spoje (vrchní strana)
- D.3 Deska plošného spoje (spodní strana)

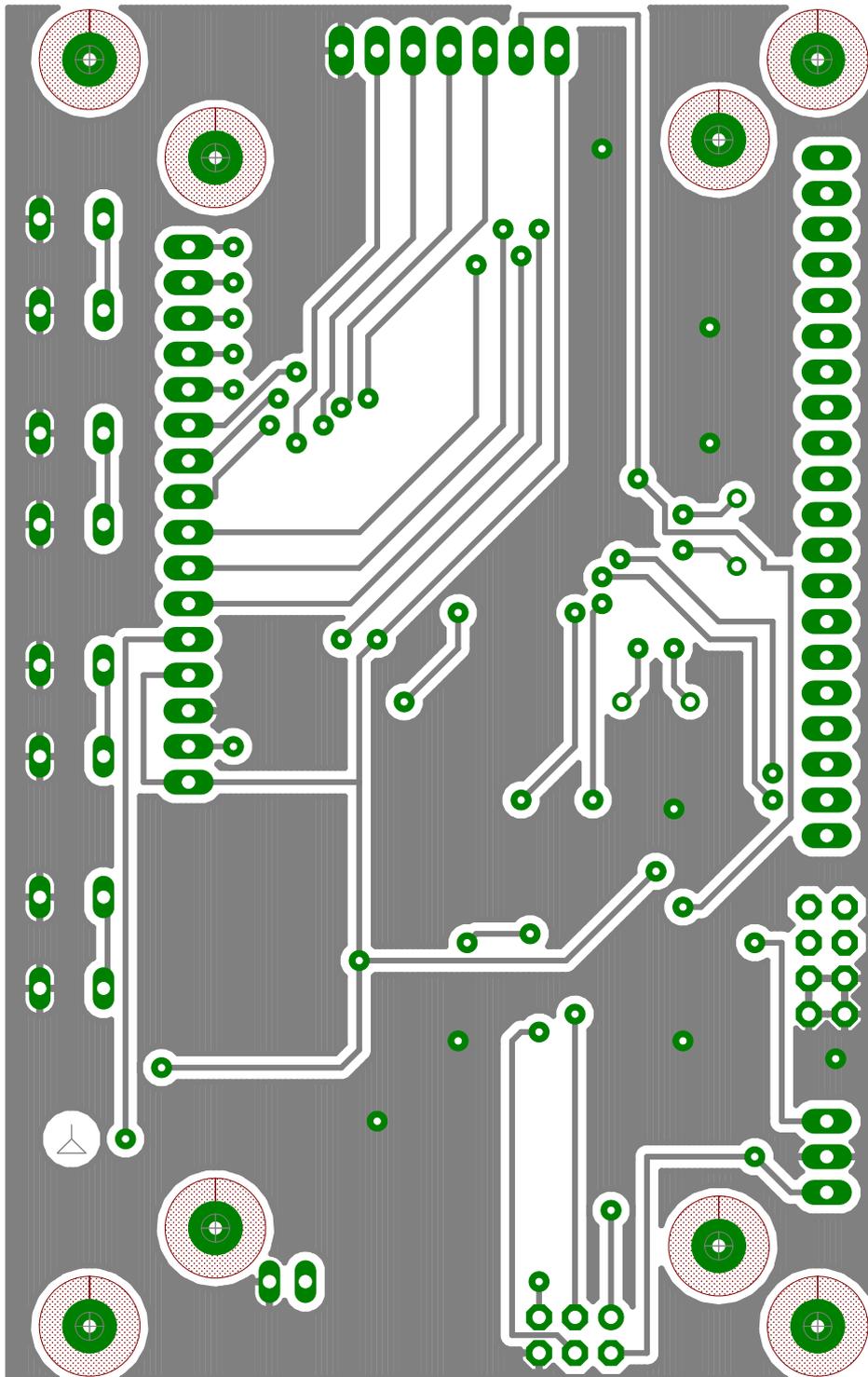
A.1



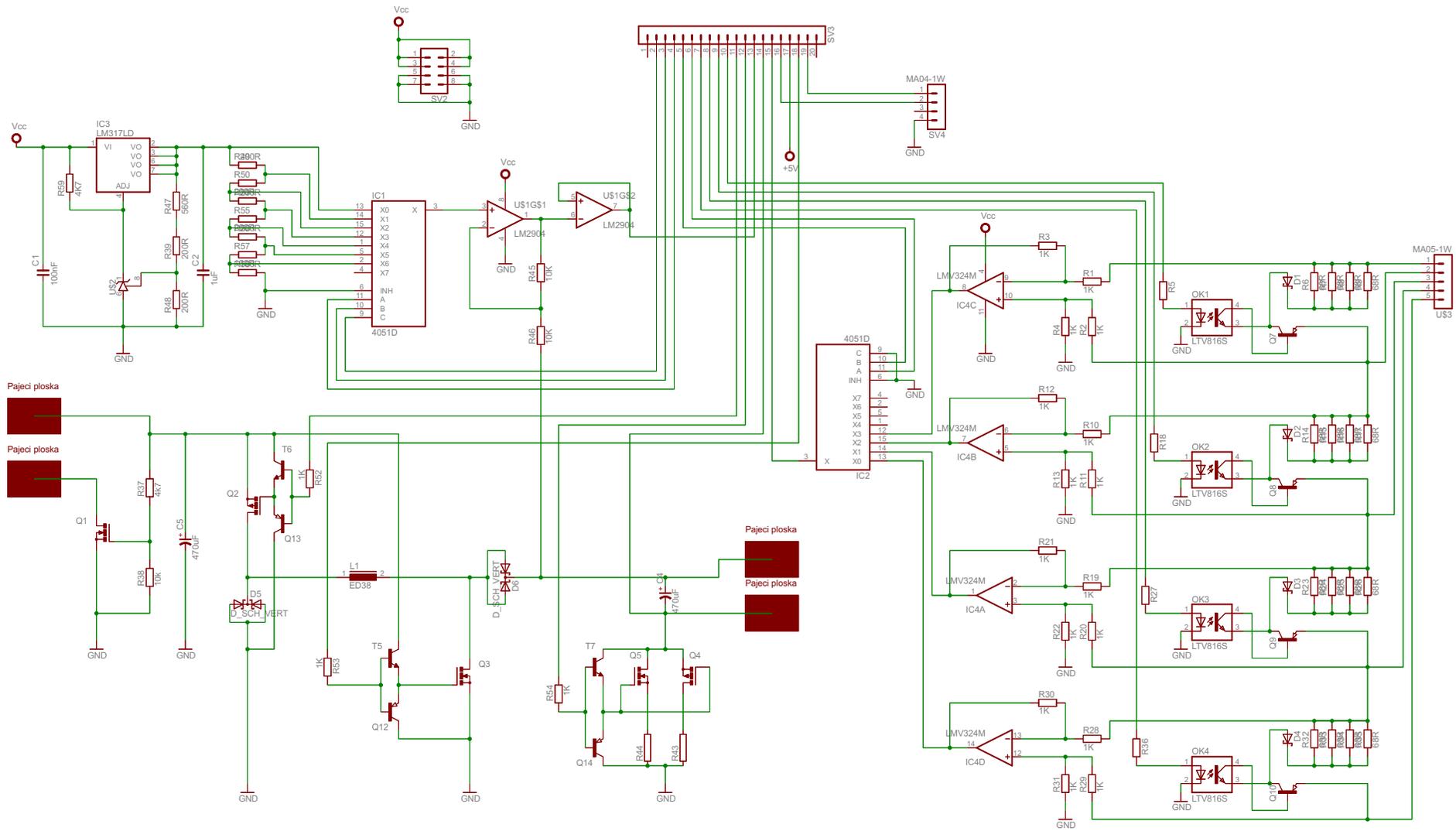
A.2



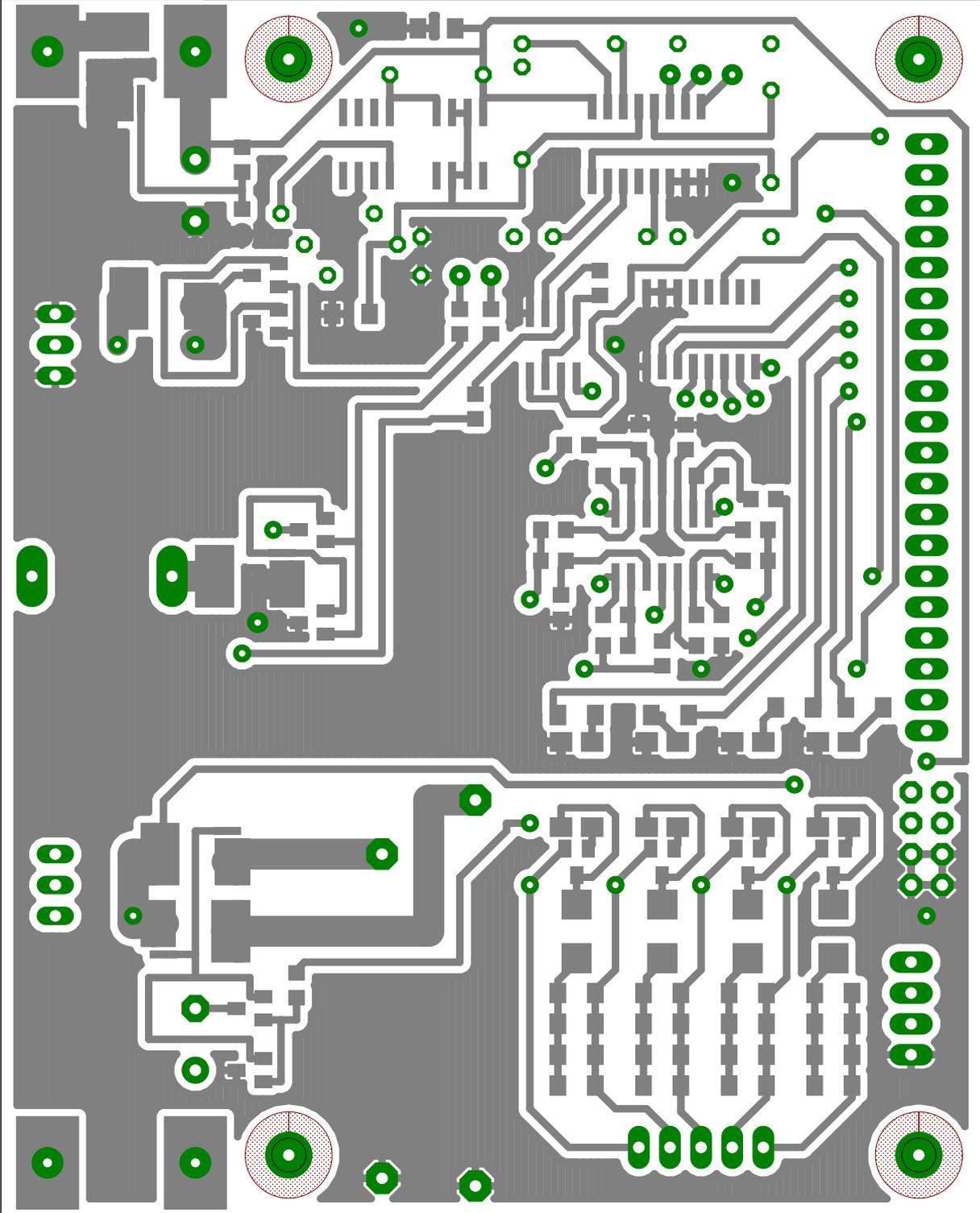
A.3



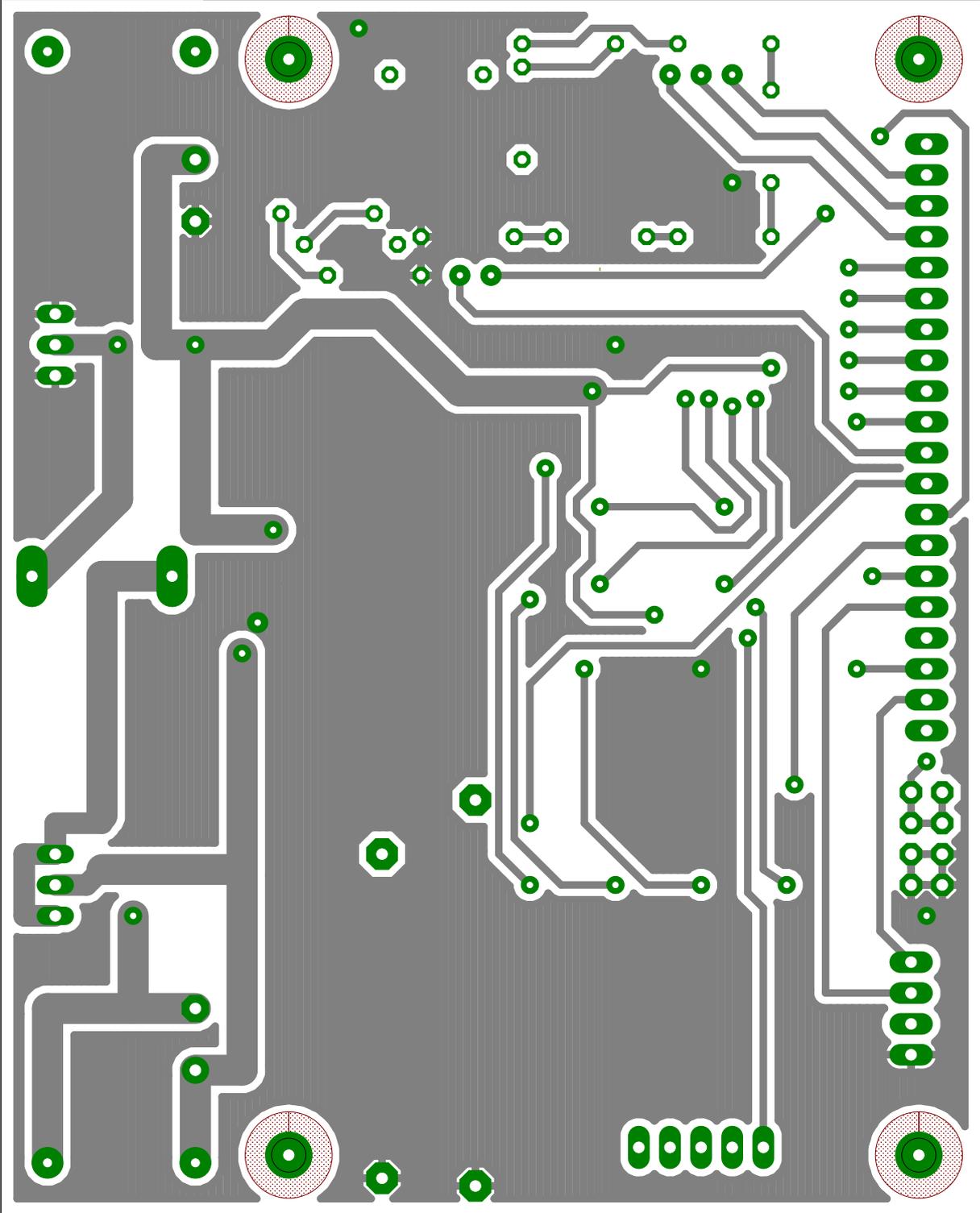
B.1



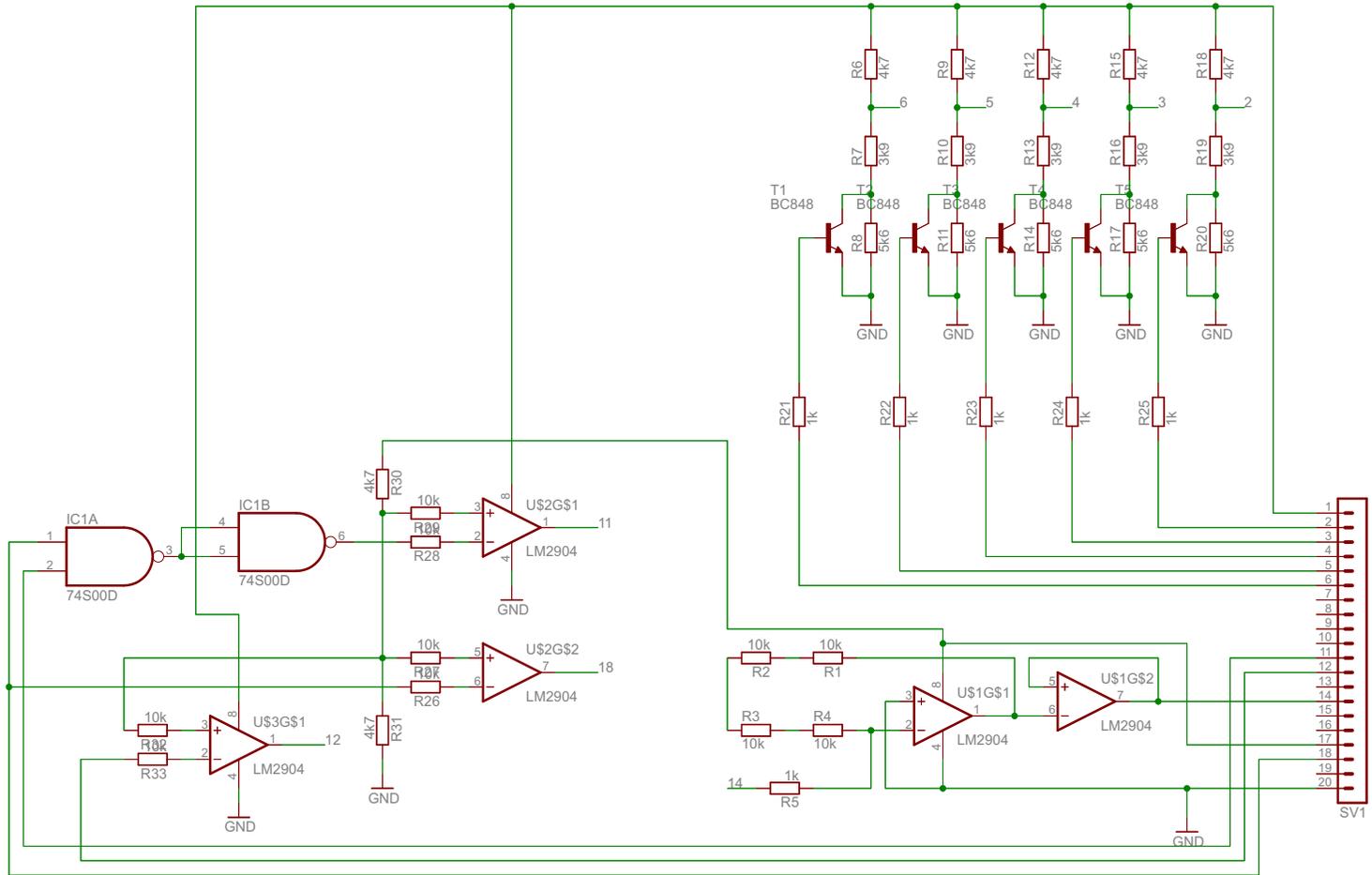
B.2



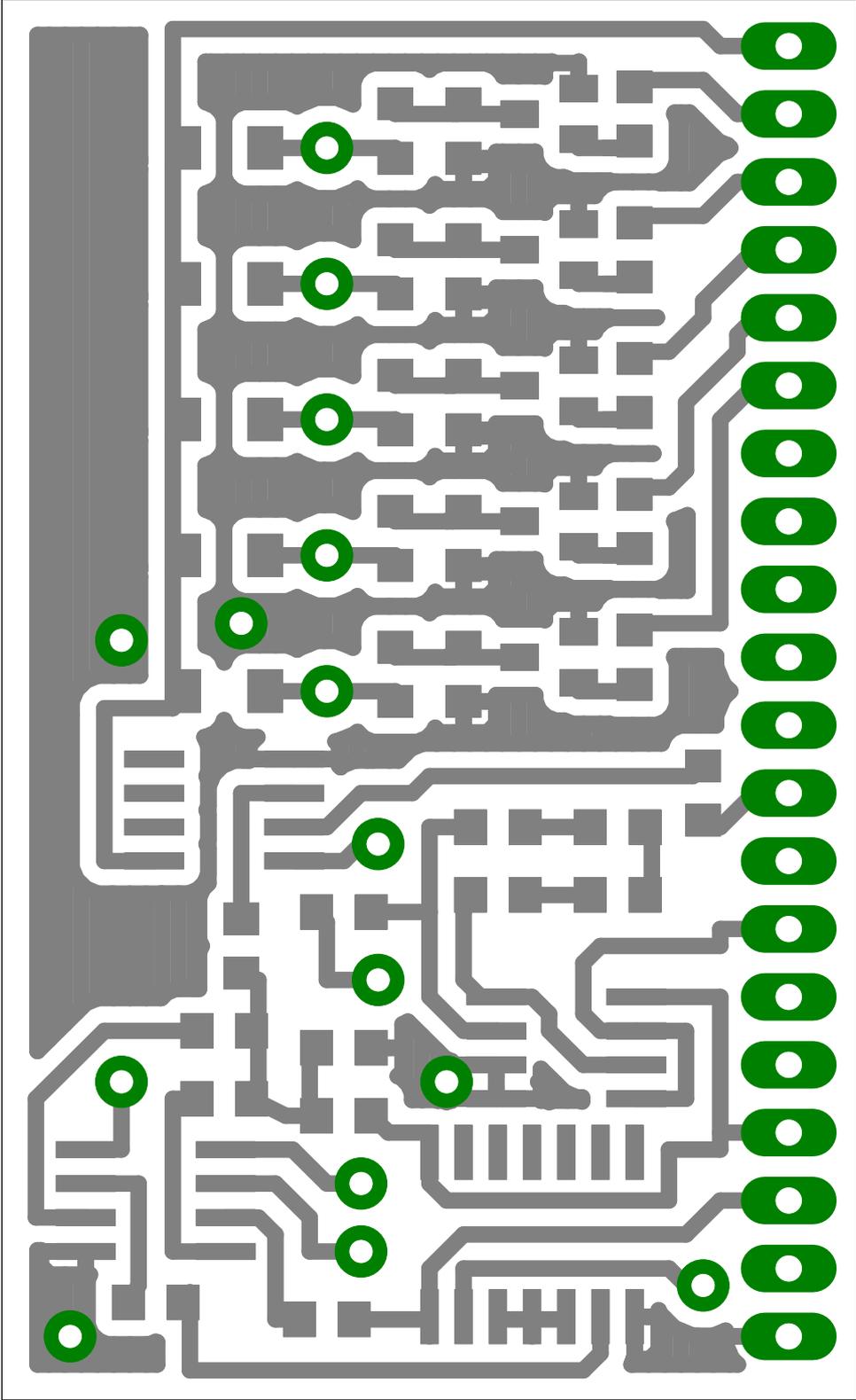
B.3



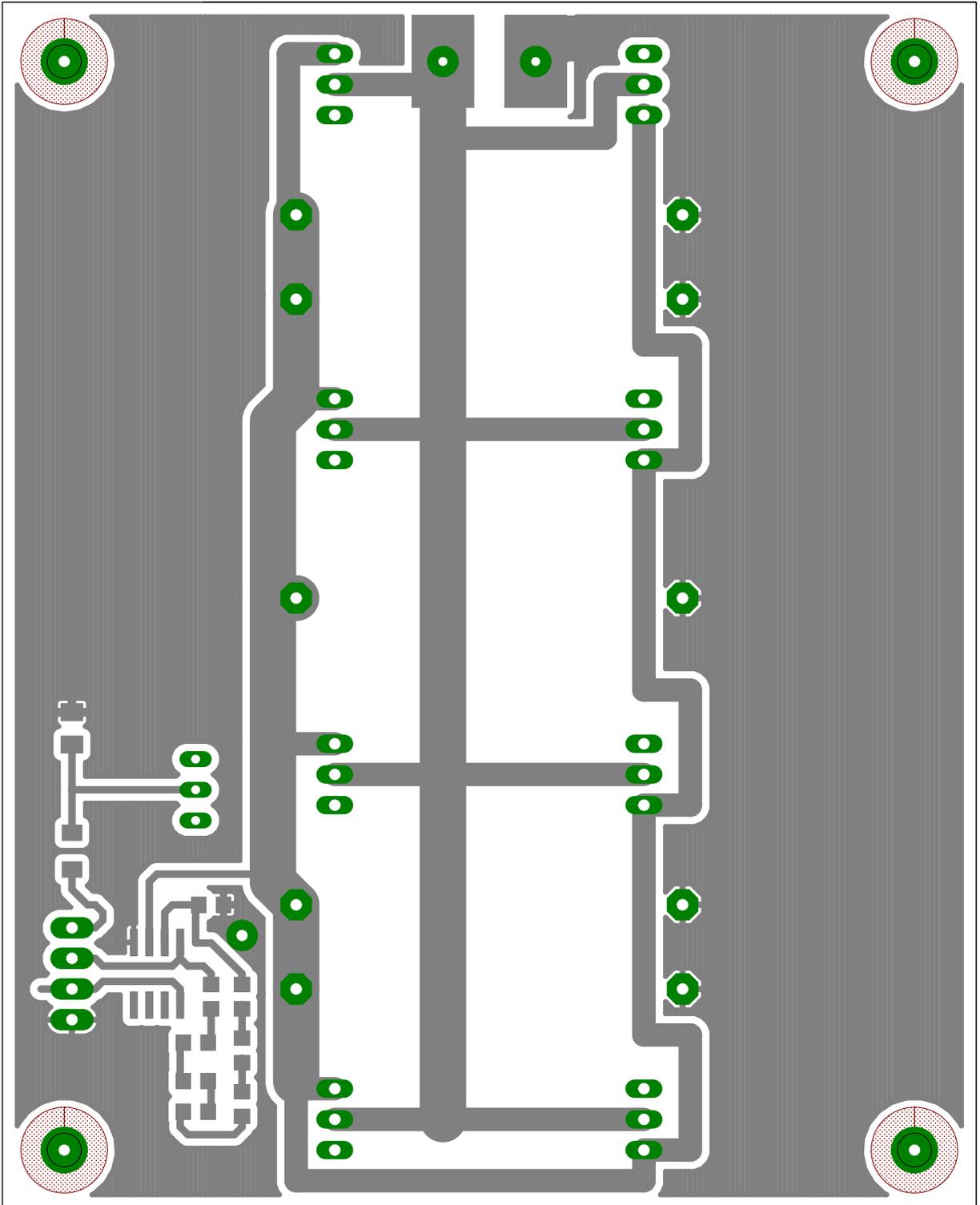
C.1



C.2



D.2



D.3

