

**Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera**

Akumulátorový balancér

Bc. Radomír Filip

**Diplomová práce
2009**

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě
Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Radomír FILIP**

Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**

Studijní obor: **Dopravní infrastruktura-Elektrotechnická zařízení v dopravě**

Název tématu: **Akumulátorový balancér**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Stanovení provozních stavů akumulátoru, nabíjecí a vybíjecí charakteristiky
2. Metody zjišťování stavu nabití akumulátoru
3. Návrh balancéru, výpočty, simulace
4. Realizace balancéru, měření parametrů, vyhodnocení

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Cenek, M.: Akumulátory od principu k praxi, Praha, FCC PUBLIC, 2003

Arendáš, M.: Nabíječky a nabíjení, Praha, BEN, 1999

Krejčířík, A.: Napájecí zdroje II, Praha, BEN, 1996

Faktor, Z.: Transformátory a tlumivky pro spínané zdroje, Praha, BEN, 2002

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Ondřej Černý

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací
techniky v dopravě

Datum zadání diplomové práce: **5. prosince 2008**


Termín odevzdání diplomové práce: **25. května 2009**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



prof. Ing. Vladimír Schejbal, CSc.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 17. února 2009

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

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

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 25. 5. 2009

Bc. Radomír Filip

Poděkování

Chtěl bych touto cestou poděkovat za cenné připomínky a podněty oponentovi bakalářské práce Ing. Miloši Noskovi a vedoucímu diplomové práce Ing. Ondřeji Černému. Dále děkuji rodině, která mi byla oporou po celou dobu mého studia při zaměstnání.

Souhrn

V současném přetechnizovaném světě plném množství sofistikovaných elektronických zařízení, zvláště pak v oblasti jejich napájení, lze jen s velkými obtížemi nalézt oblast neřešenou, takovou, která je doposud na okraji zájmu uživatelů, a takovou, která by se přesto mohla stát zajímavou v některých specifických oblastech technických řešení.

Při běžné praxi vystačíme s běžně dostupnými napájecími zdroji, jak elektrochemickými, tak elektronickými. Jsou však oblasti, ve kterých je jejich běžné použití z nějakého důvodu omezeno nebo zcela vyloučeno.

V úvodu práce bude na jednom z mnoha praktických příkladů v krátkosti objasněna situace, která povede k návrhu nového technického zařízení nazvaného „Akumulátorový balancér“.

Klíčová slova

akumulátor; balancér, měnič; řízení; nabíjení; napájení

Title

Accumulator balancer

Annotation

In today's overtechnologized world full of sophisticated electronic devices, especially in the field of their power supply, it is almost impossible to find unexplored area which is not the centre of attention until now and which may become interesting in some specific areas of technical solutions.

Common electrochemical or electronic power supplies are sufficient with everyday practice. But there are some where their usage is limited for some reasons or entirely impossible.

In the preamble of this work the situation leading to the draft of new technical device called "Accumulator balancer" will be briefly explained on the practical examples.

Keywords

accumulator; balancer; converter; control; charging, power supply

OBSAH

Úvod	9
Popis stávající situace	9
Hledání řešení:	11
1 Základní požadavky	13
2 Akumulátory a jejich vlastnosti	16
2.1 Nabíjecí články - akumulátory	16
2.2 Základní parametry akumulátorů	16
2.2.1 Kapacita akumulátoru - C	16
2.2.2 Napětí akumulátoru	17
2.2.3 Nabíjecí proud	18
2.2.4 Vybíjecí proud	18
2.2.5 Nabíjecí a vybíjecí křivky (charakteristiky)	18
2.2.6 Vnitřní odpor	18
2.3 Vybrané typy alkalických akumulátorů	19
2.3.1 Nikl – kadmium (Ni-Cd)	19
2.3.2 Nikl – metalhydrid (Ni-MH)	20
2.4 Olověné (kyselé) akumulátory	22
2.4.1 Základní parametry olověných akumulátorů	22
2.4.2 Popis olověného akumulátoru	22
2.4.3 Proces nabíjení a vybíjení	22
2.4.4 Nabíjecí a vybíjecí charakteristiky	24
3 Rozbor metod zjišťování stavu nabití akumulátorů	28
3.1 Způsoby určení nabití a ukončení nabíjení alkalických akumulátorů NiCd a NiMH ..	28
3.1.1 Proudové ukončení nabíjení	28
3.1.2 Časové ukončení nabíjení	28
3.1.3 Napětíové ukončení nabíjení	28
3.1.4 Teplotní ukončení nabíjení	29
3.2 Olověné (kyselé) akumulátory	29
3.3 Rozbor metod zjišťování stavu nabití	30
3.3.1 Alkalické akumulátory NiCD a NiMH	30
3.3.2 Olověné (kyselé) akumulátory	30
3.4 Stanovení základního způsobu činnosti „Akumulátorového balancéru“	30
3.4.1 Způsob činnosti s akumulátory NiCD a NiMH	31
3.4.2 Způsob činnosti s olověnými (kyselými) akumulátory	31
3.5 Závěr rozboru	32
4 Návrh balancéru	33
4.1 Stanovení základních parametrů	33
4.1.1 Pracovní napětí balancéru	33
4.2 Koncepce	34
4.3 Blokové schéma, obr. 4.2	36
4.4 Deska koncového (výkonového) stupně (DKS), obr. 4.3	37

4.4.1	Výkonový stupeň.....	38
4.4.2	Simulace a návrh koncového stupně	40
4.4.3	Popis činnosti navrženého výkonového stupně, obr. 4.8:	42
4.4.4	Návrh tlumivky TL.....	42
4.4.5	Budící obvody koncového stupně.....	43
4.4.6	Přizpůsobovací a vyhodnocovací obvody DKS	45
4.4.7	Napájecí obvody, obr. 4.10.....	48
4.5	Deska řízení DŘ (řídící obvody)	48
4.5.1	Okénkový diskriminátor a vstupní děliče	49
4.5.2	Vyhodnocovací a řídící logika.....	52
4.5.3	Obvody PWM.....	59
5	Realizace balancéru	67
6	Měření parametrů	69
6.1	Deska řízení DŘ	69
6.1.1	Napájecí napětí	69
6.1.2	Okénkový diskriminátor a vstupní děliče (OZ1).....	70
6.1.3	Vyhodnocovací a řídící logika.....	71
6.1.4	Obvod tvorby řídicího napětí (OZ2, OZ3)	71
6.1.5	Obvody PWM.....	73
6.2	Deska koncového stupně DKS	75
6.2.1	Napájecí napětí	76
6.2.2	Přenos vstupních logických proměnných na výstup.....	76
6.3	Balancér jako celek.....	77
6.3.1	Ověření funkce	78
6.3.2	Parametry balancéru	79
6.4	Vyhodnocení měřených parametrů.....	80
7	Po uzávěrce – obvody proudové ochrany.....	81
7.1	Základní popis činnosti integrovaných senzorů proudu.....	81
7.2	Návrh obvodu proudových ochranných DPO (deska proudových ochrann)	83
7.3	Funkce komparátorů a vstupní děliče.....	85
7.4	Realizace DPO.....	86
7.4.1	Napájecí napětí	86
7.4.2	Rozsahy nastavení komparátorů.....	87
	Závěr, vyhodnocení	89
	Seznam obrázků.....	91
	Seznam tabulek.....	93
	Seznam použité literatury	94
	Seznam www stránek	95
	Seznam příloh.....	97
	Seznam použitých měřících přístrojů a pomůcek.....	99

ÚVOD

V současném přetechizovaném světě plném množství sofistikovaných elektronických zařízení, zvláště pak v oblasti jejich napájení, lze jen s velkými obtížemi nalézt oblast neřešenou, takovou, která je doposud na okraji zájmu uživatelů, a takovou, která by se přesto mohla stát zajímavou v některých specifických oblastech technických řešení.

V následujících odstavcích se pokusím na jednom z mnoha možných praktických příkladů v krátkosti objasnit situaci, která povede k návrhu nového technického zařízení nazvaného „Akumulátorový balancér“.

Popis stávající situace

Představme si technické řešení pojízdného prostředku uvedeného v bakalářské práci s názvem „Studie zástavby mobilního spojovacího uzlu“ [1]. V kapitole 1 literatury [1] je uvedeno základní blokové schéma upravené a uvedené na Obr. 0.1. Blokové schéma ukazuje základní strukturu napájení zmíněného pojízdného prostředku. Pojízdný prostředek je zpravidla při své činnosti na místě připojen k vnějšímu zdroji elektrické energie 230/400 V/50 Hz. Zařízení instalovaná v pojízdném prostředku (napájené technické prostředky) jsou dále napájena napájecí soustavou pojízdného prostředku tvořenou velmi často okruhy střídavého napětí 230 V/50 Hz (230 VAC)¹ a okruhy stejnosměrného napětí 24 VDC² a 12 VDC³.

V kapitole 6 literatury [1] je podrobněji popsáno napájení celého zařízení v několika variantách. Pro popis problému jsou dále použita převzatá a upravená bloková schémata napájecí soustavy.

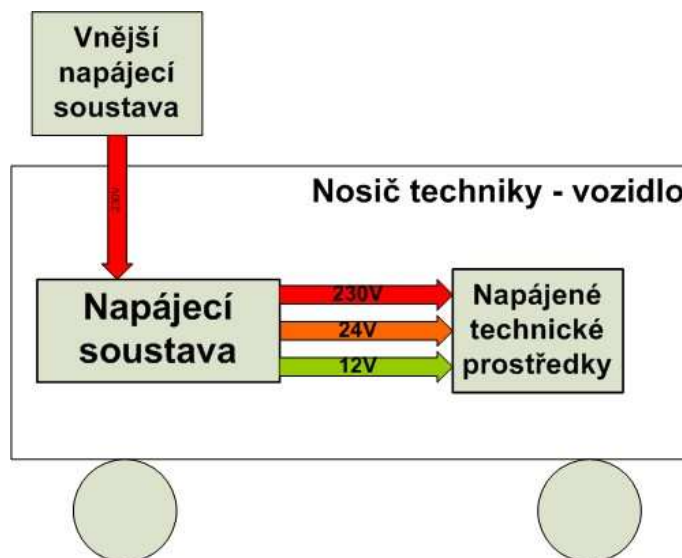
Blokové schéma Obr. 0.2 popisuje jak část silovou (230 V včetně uzemňovací soustavy), tak část určenou pro napájení zařízení stejnosměrným napětím 24 V, nebo 12 V. Pro napájení jsou v uvedeném případě použity dostatečně dimenzované měniče napětí 230 V/24 V a 24 V/12 V. Měnič 230 V/24 V v uvedeném případě plní roli nabíječe akumulátorů⁴, takže celé zařízení je ve skutečnosti napájeno v rozvodu 24 V ze dvou sérově zapojených 12 V nabíjených AKU a v rozvodu 12 V z dostatečně dimenzovaného měniče 24 V/12 V.

¹ Pro potřeby popisu střídavého napájecího napětí 230 V/50 Hz nebo 230 VAC bude dále v textu používáno pouze označení 230 V.

² Pro potřeby popisu stejnosměrné napájecího napětí 24 VDC bude dále používáno pouze označení 24 V.

³ Pro potřeby popisu stejnosměrné napájecího napětí 12 VDC bude dále používáno pouze označení 12 V.

⁴ Pro označení akumulátor bude v textu dále používána i zkratka AKU.



Obr. 0.1 Blokové schéma pojízdného prostředku

Funkce akumulátorů je v daném případě dvojí:

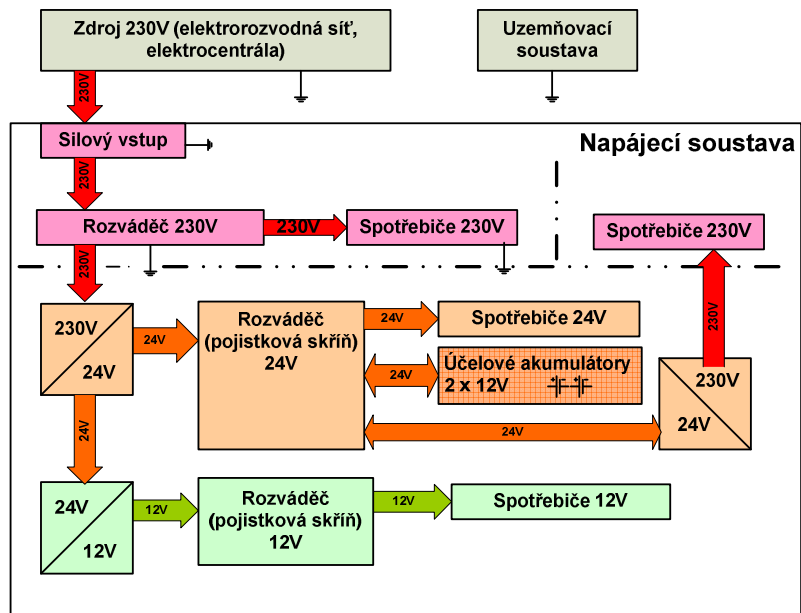
- AKU zajišťují bezvýpadkové napájení při přerušení napájení ze sítě 230 V,
- AKU zajišťují krátkodobě napájení v případě, kdy špičkový proudový odběr v rozvodu 24 V překročí možnosti měniče (nabíječe) 230 V/24 V.

Nevýhodou uvedeného zapojení je, že špičkové odběry v rozvodu 12 V musí pokrýt výhradně měnič 24 V/12 V. Až doposud zde nebylo popsáno nic nového a jedná se pouze o rekapitulaci v daném případě obvyklé situace.

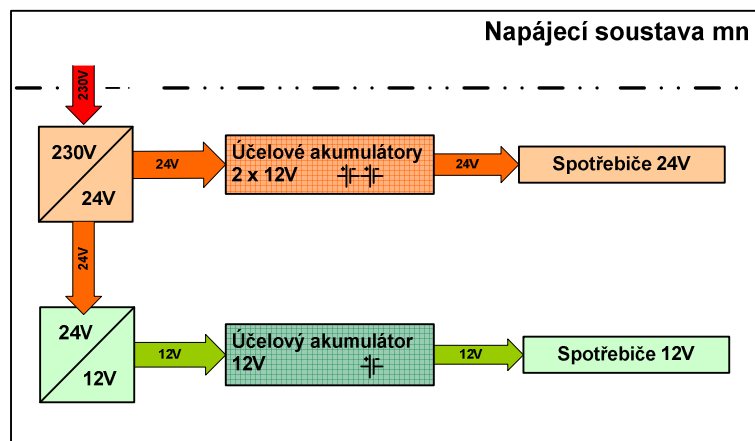
Na dalším blokovém schématu Obr. 0.3 je zobrazena varianta, kdy je rozvod 12 V doplněn akumulátorem, který stejně jako v případě rozvodu 24 V zajišťuje krátkodobě napájení v případě, kdy špičkový proudový odběr v rozvodu 12 V překročí možnosti měniče (nabíječe) 24 V/12 V. Varianta umožňuje použití měniče dimenzovaného na menší odebíraný proud. To může znamenat v některých případech, i přes nutnost použití akumulátoru, podstatnou finanční úsporu. Akumulátor navíc v rozvodu plní funkci filtru, což je v některých případech nezbytností.

Mezi nevýhody daného řešení patří především:

- péče spojená s použitím dalšího akumulátoru,
- zvětšení zastavěného prostoru,
- nárůst hmotnosti v pojízdném prostředku, který je v některých případech při zastavení technikou na hranici své únosnosti,



Obr. 0.2 Blokové schéma napájecí soustavy



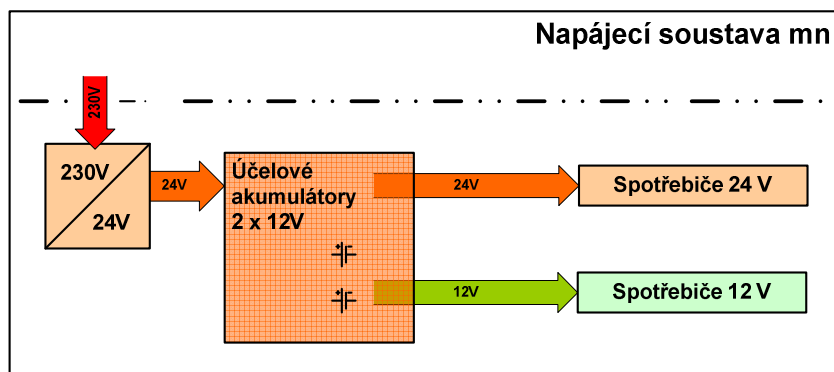
Obr. 0.3 Použití AKU v rozvodu 12 V

Hledání řešení:

Úlohou této práce je nalezení takového technického řešení, které:

- v sobě spojuje výhody předchozích dvou řešení, a to použití akumulátorů v rozvodu 24 V a 12 V pro zajištění napájení při krátkodobých špičkových odběrech,
- odstraňuje některé jejich nevýhody jako, je použití dalšího akumulátoru nebo výkonného měniče 24 V/12 V,
- přinese další zlepšení kvality napájení – dokáže například vzájemně vyrovnat kapacitu AKU,
- bude použitelné i v jiných aplikacích.

Jako nejjednodušší se může nabídnout řešení, které bylo v minulosti nejednou použito. Je to napájení spotřebičů v rozvodu 12 V z poloviny napájecího napětí (z jednoho akumulátoru) při zachování společného nabíjení obou sériově zapojených akumulátorů Obr. 0.4.



Obr. 0.4 Napájení spotřebičů v rozvodu 12 V z poloviny napájecího napětí

Zapojení s sebou přináší kromě jednoduchosti řešení jednu zásadní nevýhodu. Ta spočívá v nerovnoměrném vybíjení akumulátorů, s tím související rozdílnou velikostí zbytkového využitelného náboje AKU a dále rozdílný požadavek AKU na množství dodaného náboje měničem (nabíječem) 230 V/24 V.

Důsledkem uvedeného zapojení a nerovnoměrného vybíjení (nabíjením) je:

- přebíjení jednoho – méně zatíženého akumulátoru,
- nedostatečné nabíjení druhého – více zatíženého akumulátoru,
- zvýšené nároky na údržbu akumulátorů,
- následné omezení životnosti jednoho z akumulátorů v závislosti na převládajícím negativu (prebíjení nebo činnost na hranici vybití).

Řešením nevýhod všech doposud uvedených způsobů napájení může být zařízení nazvané „Akumulátorový balancér“⁵, které je tématem této práce.

⁵ Pro označení „Akumulátorový balancér“ bude v textu dále používán i zkrácený název „Balancér“

1 ZÁKLADNÍ POŽADAVKY

Před započítáním návrhu balancéru je vhodné stanovit základní požadavky na jeho činnost, požadované parametry a koncepci. V této kapitole budou definovány a shrnuty základní požadavky na činnost balancéru.

Pro základní popis činnosti balancéru je dále potřeba definovat základní režimy provozu dvou sériově zapojených akumulátorových baterií. Z důvodu předpokládaného použití budeme uvažovat použití pro dvě akumulátorové baterie se jmenovitým napětím 12 V zapojené do série (2 x 12 V), prozatím bez bližšího určení typu. Pro další popis funkce bude jakýkoliv zdroj nabíjecího proudu (měnič, nabíječ) nazýván nabíječem.

Režimy provozu:

- AKU bez připojeného nabíječe s a bez připojené zátěže. Zbytkový náboj akumulátorů v intervalu (0-100) %,
- AKU bez připojeného nabíječe s připojenou zátěží na napětí 24 V. Zbytkový náboj akumulátorů v intervalu (0-100) %,
- AKU bez připojeného nabíječe s připojenou zátěží na 24 V a 12 V. Zbytkový náboj akumulátorů v intervalu (0-100) %,
- AKU s připojeným nabíječem bez připojené zátěže,
- AKU s připojeným nabíječem s připojenou zátěží na napětí 24 V,
- AKU s připojeným nabíječem s připojenou zátěží na napětí 24 V a 12 V,
- AKU s připojeným nabíječem a s připojenou zátěží na jednom (libovolném) AKU (napětí) 12 V.

Základní způsob připojení balancéru do obvodu a základní režimy provozu jsou zobrazeny na Obr. 1.1.

Na základě zmíněných režimů provozu lze již stanovit základní požadavky na činnost balancéru.

Patří mezi ně především:

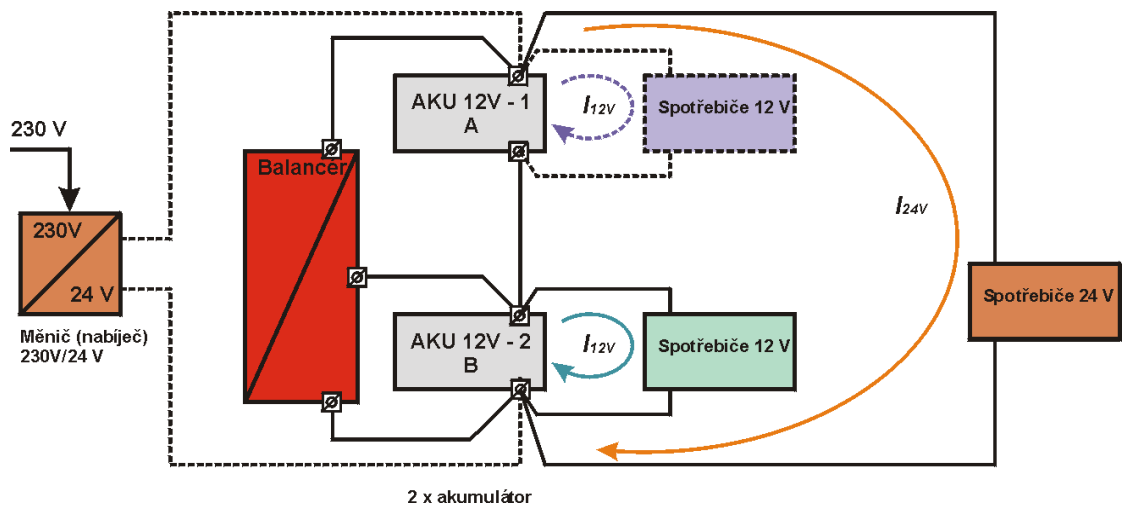
- Schopnost vyrovnat kapacitu (náboj) obou sériově zapojených akumulátorů v režimu provozu se zátěží nebo bez zátěže bez ohledu na to, je-li připojen nabíječ nebo ne. Zátěž je připojena k napětí 24 V.

- Schopnost udržet v rozumné míře stejnou kapacitu akumulátorů při připojení zátěže na jeden libovolný akumulátor (libovolné napětí 12 V), při proudovém odběru odpovídajícímu maximálně jmenovitému proudu balancéru.
- Schopnost vyrovnat kapacitu akumulátorů po krátkodobém zatížení jednoho z akumulátorů zvýšeným proudovým odběrem, který překračuje možnosti balancéru. Zvýšený proudový odběr je způsoben například přechodovými jevy po zapnutí spotřebičů – nabíjením kondenzátorů, počátečním temperováním přístrojů, náběhem termostatů do oblasti pracovní teploty a podobně.
- Při režimech provozu nesmí docházet při vyrovnávání kapacity k „překmitávání“ mezi akumulátory - periodickému dodávání náboje jednomu a poté druhému akumulátoru bez změny vnějších podmínek (zátěže, velikosti nabíjecího proudu,...).
- Schopnost vyrovnávat kapacitu v podstatě libovolným akumulátorům se stejným typem elektrolytu a obdobnou kapacitou (olověné, alkalické, ...), pro které je balancér konstruován.
- Zachovat si funkci bez připojeného nabíječe i s ním.
- Zachovat si funkci v celém rozsahu napětí akumulátorů.
- Vyrovnávat kapacitu s co nejvyšší účinností.
- Zatěžovat akumulátory a nabíječ co nejmenší vlastní spotřebou (např. spotřebou řídicích obvodů).

Mezi další požadavky na funkce, které přímo nesouvisí s funkcí balancéru může patřit:

- zajištění ochrany proti hlubokému vybití nebo přebití akumulátorů,
- funkce elektronické pojistky proti nadproudům,
- obvody chránící balancér proti špatnému připojení akumulátorů (přepólování).

Předpokladem pro definování základní koncepce balancéru je i znalost chování akumulátorů, pro které bude balancér konstruován. Z uvedeného důvodu bude v následujících kapitolách proveden popis a rozbor chování základních typů olověných (kyselých) a alkalických akumulátorů a jejich nabíjecích a vybíjecích charakteristik. Pro potřeby popisu a rozboru vlastností akumulátorů budou použity výsledky měření a porovnání uvedené v literatuře [3] („Zjišťování stavu nabití akumulátorů“).



Obr. 1.1 Základní režimy provozu

2 AKUMULÁTORY A JEJICH VLASTNOSTI

Pro potřebu návrhu koncepce balancéru bude v následující kapitole proveden popis a rozbor vlastností a chování vybraných typů akumulátorů. V závěru bude provedena rekapitulace a určeny vhodné typy akumulátorů pro již zmíněný režim provozu. Dále budou definována případná doporučení a omezení u konkrétních vybraných typů akumulátorů.

2.1 Nabíjecí články - akumulátory

Jedná se o články (akumulátory) schopné vícenásobného vybití a opětovného nabití. Elektrická energie nabíjecího proudu se v článku mění na energii chemickou. Při vybíjení je pak energie chemická zdrojem energie elektrické.

Akumulátory se prioritně dělí podle použitého elektrolytu na akumulátory:

- kyselé
- alkalické
- s nevodivými, tuhými nebo roztavenými elektrolyty

Představitelem kyselého akumulátoru je akumulátor olověný. Představiteli alkalických akumulátorů jsou například akumulátory nikel-kadmiové (Ni-Cd), nikel-metalhydridové (Ni-MH), lithiové (Li-Ion, Li-Pol, Li-Metal) a další. Poslední skupina článků je zmíněna pouze pro úplnost.

2.2 Základní parametry akumulátorů

K popisu vlastností akumulátorů je možno využít velkého množství údajů. Základní údaje v sobě zahrnují parametry jak měřitelné, tak parametry dané technickou specifikací konkrétního typu. Na výsledné naměřené parametry má vliv řada vnějších vlivů. Mezi hlavní vlivy na parametry akumulátorů patří především teplota, stáří, režimy provozu, počet nabíjecích a vybíjecích cyklů, velikost nabíjecího a vybíjecího proudu, teplotní režimy provozu a další.

2.2.1 Kapacita akumulátoru - C

Kapacita akumulátoru je množství náboje, který může článek dodat při vybíjení do zátěže. Množství náboje je udáváno v ampérhodinách (Ah), pro menší kapacity v miliampérhodinách (mAh). V praxi je třeba rozlišit skutečnou a jmenovitou kapacitu.

- **jmenovitá kapacita** je definovaná výrobcem za přesně daných podmínek jako je např. teplota okolí, velikosti vybíjecího proudu a konečné, resp. minimální vybíjecí napětí,

- **skutečná kapacita** je kapacita využitelná za reálných podmínek při skutečné teplotě okolí, vybíjecím proudem daným potřebami zátěže a podobně.

2.2.2 Napětí akumulátoru

Napětí akumulátoru se měří vždy přímo na svorkách akumulátoru tak, aby byl omezen vliv přechodových odporů svorek a přívodních kabelů zatížených případným nabíjecím nebo vybíjecím proudem. Napětí na svorkách akumulátoru lze rozdělit na napětí:

- **jmenovité**, které je definováno příslušnými normami a bývá uvedeno na obalu akumulátoru,
- **skutečné**, které je naměřené na svorkách akumulátoru při skutečném zatížení,
- **na prázdno** je napětí naměřené na svorkách akumulátoru bez zatížení,
- **maximální nabíjecí** napětí je napětí uváděné výrobcem, které nesmí být za žádných okolností překročeno,
- **minimální vybíjecí** napětí (konečné vybíjecí napětí) je napětí, na které smí být akumulátor vybit. Důsledkem překročení může být stav nazývaný **hluboké vybití**, který může v některých případech vést k trvalému poškození akumulátoru.

Další parametry jsou používány především v souvislosti s **akumulátory olověnými**.

- **plynovací napětí** je napětí o velikosti 2,4 V na článek, při kterém začíná při nabíjení olověný akumulátor v důsledku elektrolyzy vody a elektrolytu uvolňovat vodík a kyslík – akumulátor začíná plynovat. Se vzrůstajícím napětím se pak uvolňování plynů intenzivně zvyšuje,
- **konečné nabíjecí napětí** je napětí, kterého akumulátor dosáhne po plném nabití na konci nabíjení. Při nabíjení konstantním proudem se dále jeho velikost nemění. V závislosti na ostatních veličinách, především na velikosti vnitřního odporu a teplotě akumulátoru se pohybuje jeho velikost v rozmezí 2,4 až 2,8 V na článek při teplotě 20 °C (14,4 až 16,8 V u 12-ti voltového akumulátoru). U akumulátorů hermetických je velikost konečného nabíjecího napětí 2,25 až 2,3 V na článek při pohotovostním provozu (trvalé konzervování bez zátěže) a 2,4 až 2,47 V na článek při cyklickém provozu (vybití/nabíjení). Krajním důsledkem překročení těchto hodnot může být snížení využitelné kapacity a zkrácení životnosti, v případě hermetických akumulátorů i poškození nádoby akumulátoru.

2.2.3 Nabíjecí proud

Nabíjecí proud může nabývat hodnot buď konstantních, nebo proměnných v průběhu jednoho nabíjecího nebo vybíjecího cyklu. Z uvedeného důvodu je zaveden pojem střední hodnota nabíjecího proudu.

- **střední hodnota** nabíjecího proudu slouží ke správnému určení náboje dodaného akumulátoru v průběhu nabíjení. K jeho měření, zvláště při použití pulsního průběhu nabíjecího proudu je potřeba použít měřicích přístrojů pro měření střední hodnoty. V opačném případě jsou hodnoty měření nesprávné a neodpovídající skutečnosti. K vyjádření velikosti nabíjecího proudu se v daných souvislostech používá buď absolutních hodnot udávaných v ampérech (A), nebo vyjádření podílu jmenovité kapacity C_{jm}/I_{nab} , kde C_{jm} je jmenovitá kapacita AKU a I_{nab} je velikost nabíjecího proudu,
- **konečný nabíjecí proud** je proud, při kterém je nabíjení akumulátoru po dosažení konstantního maximálního nabíjecího napětí ukončeno. Používá se pouze u některých typů akumulátorů (RAM, Li-xxx, ...).

2.2.4 Vybíjecí proud

Vybíjecí proud může nabývat hodnot jak konstantních, tak časově proměnných. Důležitým omezujícím parametrem je maximální a špičkový vybíjecí proud.

- **maximální vybíjecí proud** je trvalý vybíjecí proud stanovený výrobcem, který nesmí být za žádných okolností překročen,
- **špičkový vybíjecí proud** je proud, jehož velikost je přípustná pouze po výrobcem stanovenou maximální dobu (např. po dobu 0,5 s).

2.2.5 Nabíjecí a vybíjecí křivky (charakteristiky)

Nabíjecí a vybíjecí křivky vyjadřují obecně časovou závislost napětí na svorkách akumulátoru v průběhu nabíjení a v průběhu vybíjení, nebo lépe v závislosti na množství dodaného nebo odebraného náboje za určitý čas. Na jejich tvar má vliv především velikost nabíjecího nebo vybíjecího proudu a teplota článků.

2.2.6 Vnitřní odpor

Vnitřní odpor v technické praxi vyjadřuje komplexní vnitřní impedanci akumulátoru. Jeho velikost je závislá na stupni nabití a na vlivech zmíněných v článku 2.2. Lze jej měřit pomocí střídavého nebo stejnosměrného proudu. Způsob měření je uveden v literatuře [3].

Některé základní parametry vybraných typů alkalických akumulátorů jsou uvedeny v tabulce Tab. 2-1.

Akumulátor	Jmenovité napětí [V] (1 člának)	Hustota energie		Samovybíjení [%Cjm/den]
		Wh/kg	Wh/l	
Alkalický				
Ni - Cd	1,2	45	150	0,6
Ni - MH	1,2	80	230	0,8
Ni - MH - Enelopop	1,2	60	210	0,03
RAM	1,5	75	220	0,05
Li - Ion	3,5	120	225	0,3
Li - Pol	2 - 3,5	150	250	0,6
Li - Metal	3	140	300	0,03
Olověný	2	85	40	0,56

Tab. 2-1 Základní parametry nejběžnějších typů akumulátorů

2.3 Vybrané typy alkalických akumulátorů

2.3.1 Nikl – kadmium (Ni-Cd)

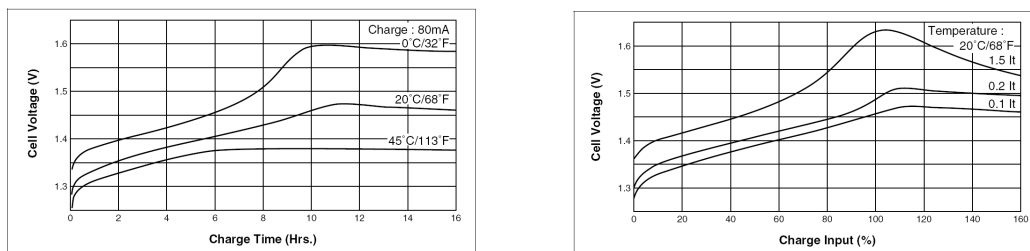
Ni-Cd akumulátor používá jako aktivní materiál pro kladnou desku hydroxid nikelnatý a pro zápornou desku hydroxid kademnatý. Elektrolytem je vodný roztok hydroxidu draselného obsahující malé množství hydroxidu lithného pro zlepšení životnosti během cyklu a pro zlepšení funkce při vysokých teplotách. Nabíjecí/vybíjecí reakce Ni-Cd akumulátoru je následující:



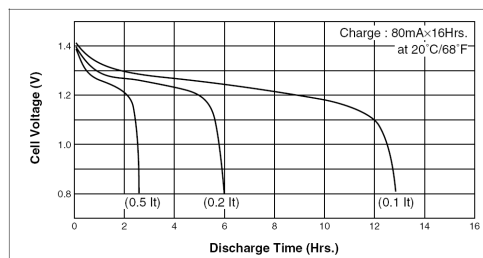
Během nabíjení a vybíjení dochází k minimální změně hustoty elektrolytu. To umožňuje používat značnou rezervu elektrolytu bez ovlivnění elektrochemických procesů mezi deskami.

2.3.1.1 Charakteristiky Ni-Cd AKU

Pro ověření tvaru charakteristik Ni-Cd akumulátoru byl zvolen typ firmy SANYO KR800AAE se jmenovitou kapacitou $C_{jm} = 800 \text{ mAh}$. Na Obr. 2.1 a Obr. 2.2 jsou zobrazeny závislosti nabíjecí charakteristiky na teplotě akumulátorů při konstantní hodnotě nabíjecího proudu, tvar nabíjecí charakteristiky při rozdílných nabíjecích proudech a tvar vybíjecí charakteristiky při rozdílných proudech vybíjecích [39].



Obr. 2.1 Závislost tvaru nabíjecí charakteristiky na teplotě a velikosti nabíjecího proudu (SANYO KR800AAE) [39]



Obr. 2.2 Závislost napětí a tvaru vybíjecí charakteristiky na vybíjecím proudu (SANYO KR800AAE) [39]

V příloze 1-1 jsou zobrazeny prakticky naměřené charakteristiky pro různé nabíjecí proudy při pokojové teplotě (cca 22 °C). Při měření byly použity akumulátory stejného typu, stáří a výrobní série. Z tvaru charakteristik vyplývá jako dominantní známka ukončeného nabíjení vzestup a následný pokles napětí akumulátorů při všech nabíjecích proudech. Po překročení napěťového vrcholu jsou akumulátory nabity, veškerá dodaná energie se poté mění na teplo. Z uvedeného důvodu se začaly akumulátory ve všech případech zahřívat a to úměrně velikosti nabíjecího proudu. Zvýšení teploty akumulátoru lze také teoreticky použít jako kritéria pro ukončení nabíjení, využívá se však pouze jako doplňkový způsob k jiným metodám.

Při vybíjení je jediným a dostatečným identifikátorem vybití velikost konečného vybíjecího napětí akumulátoru. Při měření vybíjecích charakteristik (příloha 1-2) byly použity stejné akumulátory z předchozího měření. Akumulátory byly vybíjeny stejným vybíjecím proudem $I_{vyb} = 0,4$ A. Při měření byly zjištěny rozdíly způsobené s největší pravděpodobností rozdílnou velikostí nabíjecích proudů z předchozího měření (při jinak stejných podmínkách měření) a zřejmě také rozdílností parametrů danými výrobou.

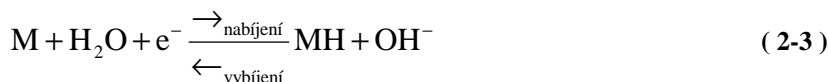
2.3.2 Nikl – metalhydrid (Ni-MH)

Základní rozdíl oproti Ni-Cd článkům spočívá v použití kovové slitiny absorbující vodík (místo kadmia) na vytvoření záporné elektrody. Základem této slitiny je lanthanum-nikl (pro dosažení větší životnosti článků je lanthan nahrazován směsí titanu, vanadu a zirkonu,

nikl zase nahrazuje směs niklu s kobaltem, hliníkem nebo manganem). Nabíjecí/vybíjecí reakce Ni-MH akumulátoru je následující. Lze ji popsat samostatně pro kladnou

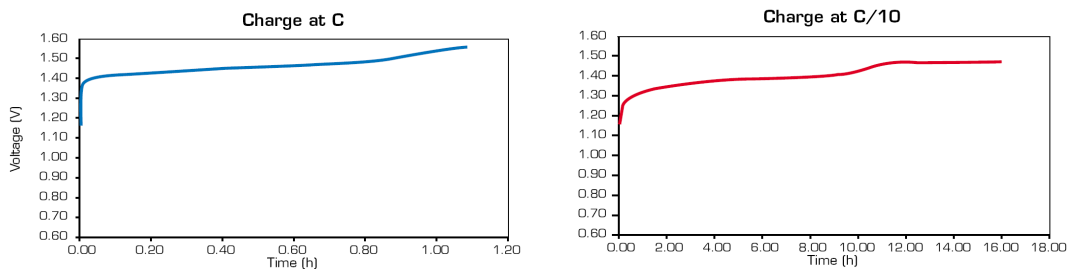


a zápornou elektrodu

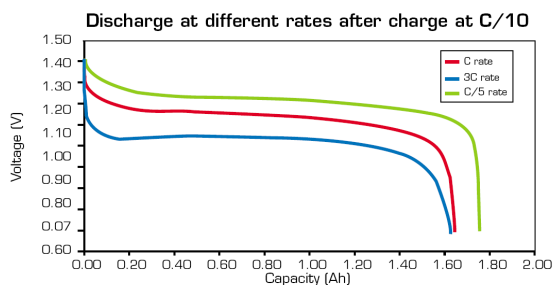


2.3.2.1 Charakteristiky Ni-MH AKU

Pro ověření tvaru charakteristik Ni-MH akumulátoru byl zvolen typ firmy SAFT VH AAL 1700 se jmenovitou kapacitou $C_{jm}=1700$ mAh. Na Obr. 2.3 a Obr. 2.4 jsou zobrazeny závislosti nabíjecí charakteristiky na hodnotě nabíjecího proudu a tvar vybíjecích charakteristik při rozdílných vybíjecích proudech [40].



Obr. 2.3 Katalogové nabíjecí charakteristiky Ni-MH akumulátorů SAFT VH AAL 1700 [40]



Obr. 2.4 Katalogové vybíjecí charakteristiky Ni-MH akumulátorů SAFT VH AAL 1700 [40]

V příloze 2-1 jsou zobrazeny prakticky naměřené charakteristiky pro různé nabíjecí proudy při pokojové teplotě (cca 22 °C). Při měření byly opět použity akumulátory stejného typu, stáří a výrobní série. Na rozdíl od akumulátorů Ni-Cd z tvaru charakteristik vyplývá jako dominantní známka ukončeného nabíjení vzestup a následný pokles napětí akumulátorů pouze při větších nabíjecích proudech. Při klesajícím proudu je jev velmi nevýrazný a

z praktického hlediska také nepoužitelný. Po dosažení konečné dosažitelné kapacity při daných podmínkách se akumulátory chovají podobně jako Ni-Cd akumulátory.

Vybíjecí charakteristiky (příloha 2-2) jsou obdobou charakteristik Ni-Cd akumulátorů a nepřinášejí z hlediska tvaru nic nového.

V příloze 3-1 jsou zobrazeny charakteristiky šesti kusů článků uvedeného typu uspořádané do baterie. Při nabíjení proudem 0,85 A (0,5C) se baterie chová stejně jako jeden článek i se všemi důsledky pro nabíjení a vybíjení.

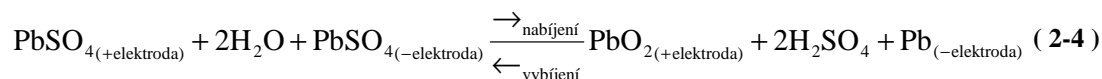
2.4 Olověné (kyselé) akumulátory

2.4.1 Základní parametry olověných akumulátorů

K popisu vlastností olověných akumulátorů je možno tak, jako v případě akumulátorů alkalických využít parametry zmíněné v kapitole 2.2.

2.4.2 Popis olověného akumulátoru

Olověné akumulátory jsou doposud nejpoužívanějším elektrochemickým zdrojem proudu. Jsou vyráběny v kapacitách řádově 1 až 10 000 Ah. Výrobci nabízejí celou řadu typů a konstrukcí se specifickým použitím. Popis některých typů bude proveden v dalších kapitolách. Zjednodušená nabíjecí/vybíjecí reakce olověného akumulátoru je následující:



Základní vlastnosti 1 článku olověného akumulátoru jsou:

- jmenovité napětí jednoho článku 2 V,
- objemová účinnost až 40 Wh/dm³ dle konstrukce a typu,
- energetická hustota až 85 Wh/kg dle konstrukce typu,
- samovybíjení nejvýše 17 % z celkové kapacity za měsíc,
- hustota elektrolytu akumulátoru přímo úměrná prošlému náboji,
- velmi nízký vnitřní odpor.

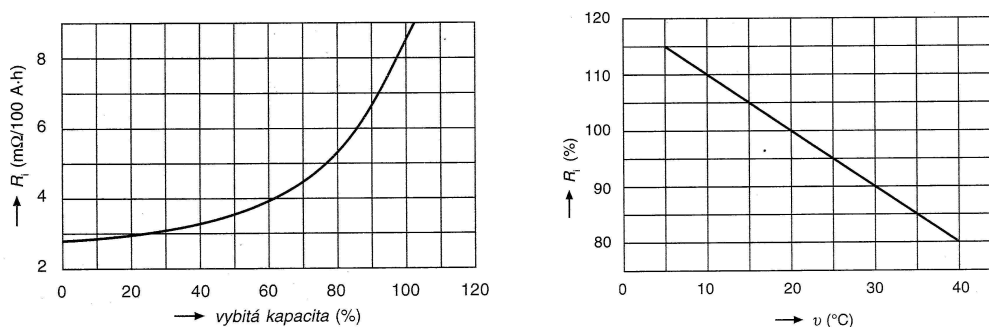
2.4.3 Proces nabíjení a vybíjení

Charakteristickou vlastností olověných akumulátorů je kromě změn množství akumulovaného náboje v průběhu nabíjení a vybíjení především změna velikosti napětí a změna hustoty elektrolytu, které jsou přímo úměrné množství zbytkového (dodaného) náboje.

Změna velikosti napětí zatíženého akumulátoru a hustoty elektrolytu je spolehlivým ukazatelem změny stavu nabití akumulátoru. Z analýzy hustoty lze určit nejen konečné stavy nabití a vybití, ale také množství zbytkového náboje olověného akumulátoru.

Pomocným ukazatelem stavu nabití je tzv. plynování elektrod. Dochází k němu po dosažení tzv. plynovacího napětí. Jedná se o doprovodný jev k ukončení rozkladu síranu olovnatého PbSO_4 na elektrodách a započetí rozkladu vody H_2O na kyslík O_2 a vodík H . Uvedený jev je možné využívat u akumulátorů s nehermetickými nádobami, které umožňují únik uvolňovaných plynů. Akumulátory označované jako hermetické je možné nabíjet pouze k hranici plynování. V opačném případě hrozí nebezpečí poškození nádoby akumulátoru, případně nebezpečí exploze.

Dalším doprovodným jevem je změna vnitřního odporu R_i nepřímo úměrná stavu nabití. Závislost velikosti vnitřního odporu na velikosti zbytkové kapacity a teplotě akumulátoru je zobrazena na Obr. 2.5 [7].



Obr. 2.5 Závislost vnitřního odporu olověného akumulátoru na stavu nabití a na teplotě [7]

2.4.3.1 Nabíjení

Při nabíjení, kromě **růstu napětí** na elektrodách (svorkách) akumulátoru, dochází dle rovnice (2-4) k tvorbě kyseliny sírové H_2SO_4 a **elektrolyt houstne**. Po ukončení nabíjení je na kladné elektrodě oxid olovičitý PbO_2 a na elektrodě záporné rozptýlené tmavošedé olovo.

- **Znaky plného nabití (startovací akumulátor):**

- hustota elektrolytu $1,28 \text{ g/cm}^3$,
- napětí na elektrodách $2,5$ až $2,8 \text{ V}$ při nabíjecím proudu $0,06$ až $0,1\text{Cjm}$ (jmenovitá kapacita akumulátoru). Znakem plného nabití u hermetických akumulátorů je hranice přibližně $2,3 \text{ V}$ při definovaném nabíjecím proudu,
- nejmenší vnitřní odpor, řádově setiny až tisícinu ohmu.

2.4.3.2 Vybíjení

Při vybíjení dochází k poklesu napětí na elektrodách akumulátoru, chemický proces je opačný. Elektrolyt řídne, kyselina sírová H_2SO_4 se spotřebovává, na elektrodách se tvoří síran olovnatý $PbSO_4$.

- **Znaky plného vybití (startovací akumulátor):**
 - hustota elektrolytu $0,95 \text{ g/cm}^3$, v případě hlubokého vybití nižší,
 - napětí na elektrodách $1,95$ až $2,03 \text{ V}$ bez proudového odběru, v případě hlubokého vybití nižší,
 - největší vnitřní odpor.

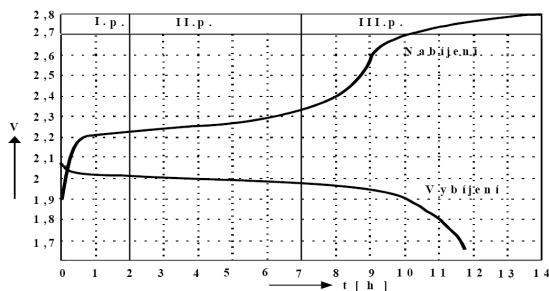
2.4.4 Nabíjecí a vybíjecí charakteristiky

Obecný tvar nabíjecí a vybíjecí charakteristiky oloveného akumulátoru je zobrazena na Obr. 2.6. Stoupající křivka zobrazuje charakteristiku nabíjecí, klesající křivka vybíjecí. Rozdíl v počátečních hodnotách napětí křivek je dán opačnými směry úbytků napětí na vnitřním odporu R_i při nabíjení a vybíjení. Z charakteristik jsou patrné mezní hodnoty napětí pro obě křivky.

2.4.4.1 Rozbor průběhu nabíjení

Podrobnější rozbor průběhu nabíjení lze provést pomocí nabíjecí křivky na Obr. 2.6 [8] při nabíjení konstantním proudem o velikosti $0,1C_{jm}$. Křivka napětí prochází třemi pásmy v závislosti na průběhu chemických změn v elektrolytu.

- **Pásmo I.** Po připojení zcela vybitého akumulátoru ke zdroji nabíjecího proudu dochází ke zvyšování napětí na elektrodách v souvislosti s tvorbou kyseliny sírové v pórech olovených elektrod. Jedná se o oblast napětí $1,75$ až $2,2 \text{ V}$ s hustotou elektrolytu $0,95$ až $1,15 \text{ g/cm}^3$.
- **Pásmo II** je pásmem přeměn síranu olovnatého $PbSO_4$. Mezním napětím pásma je hodnota $2,45 \text{ V}$, kdy je veškerý síran olovnatý $PbSO_4$ spotřebován a akumulátor začíná plynovat. Hustota elektrolytu postupně stoupá až na hodnotu $2,5 \text{ g/cm}^3$.
- **Pásmo III** je charakteristické intenzivním plynováním akumulátoru. Při překročení napětí $2,45 \text{ V}$ je postupně po rozložení veškerých zbytků síranu olovnatého veškerá energie spotřebovávána na rozklad vody na kyslík a vodík. Napětí vzroste na hodnotu $2,7$ až $2,8 \text{ V}$ a dále se nezvyšuje, akumulátor je nabit.

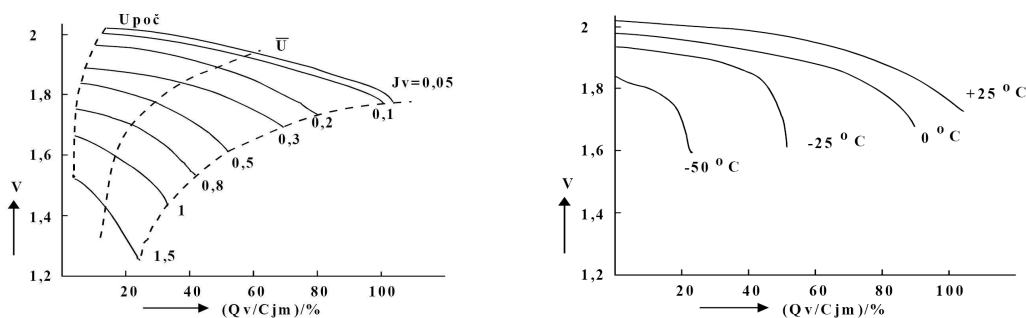


Obr. 2.6 Tvar nabíjecí a vybíjecí charakteristiky olověného akumulátoru s vyznačenými pásmy nabíjení [8]

2.4.4.2 Rozbor průběhu vybíjení

Podrobnější rozbor průběhu vybíjení konstantním vybíjecím proudem lze provést pomocí vybíjecí křivky na Obr. 2.7 [8]. Chemické změny odpovídají popisu průběhu nabíjení v opačném pořadí. Vybíjení je ukončeno po dosažení konečného vybíjecího napětí definovaného pro daný typ akumulátoru.

Závislosti velikosti napětí na svorkách akumulátoru pro různé velikosti vybíjecích proudů jsou zobrazeny na Obr. 2.7 vlevo.



Obr. 2.7 Vybíjecí charakteristiky olověného akumulátoru, závislost na velikosti vybíjecího proudu a teplotě [8]

Závislosti velikosti napětí na svorkách akumulátoru pro různé teploty akumulátoru pro jednu hodnotu vybíjecího proudu jsou zobrazeny na Obr. 2.7 vpravo.

2.4.4.3 Praktická měření olověných akumulátorů

V příloze 3-2 je znázorněn průběh nabíjení hermetického olověného akumulátoru nabíjeného zdrojem konstantního proudu. Z charakteristiky je patrný nutný zásah obsluhy, případně automatického odpojovače po dosažení maximální hodnoty 13,8 V. Pokud by nebyl akumulátor v daném případě včas odpojen, napětí by velmi rychle překročilo hranici plynovacího napětí a hrozilo by nebezpečí poškození akumulátoru.

Tvar naměřené charakteristiky odpovídá „pásmu I“ a „pásmu II“ průběhu nabíjení.

V příloze 4-1 je znázorněn průběh nabíjení hermetického olověného akumulátoru nabíjeného zdrojem konstantního napětí s omezením nabíjecího proudu. Měřítkem nabití akumulátoru je dosažení maximálního nabíjecího napětí a pokles nabíjecího proudu na hodnotu danou výrobcem pro daný typ akumulátoru.

V příloze 4-2 je znázorněn průběh vybíjecí charakteristiky hermetického olověného akumulátoru vybíjeného konstantním proudem.

2.4.4.4 Chování sériově zapojených akumulátorů

V příloze 5-1 jsou znázorněny nabíjecí charakteristiky tří sériově zapojených hermetických akumulátorů. Pro měření byly použity akumulátory stejné výrobní série se shodným počtem nabíjecích cyklů. Před započítáním měření byly akumulátory vybity na přibližně shodnou úroveň zbytkového náboje.

V první fázi nabíjení byly akumulátory nabíjeny ze zdroje konstantního proudu až do hodnot odpovídajících stavu nabití (13,6-13,8 V na jednom AKU). První fáze nabíjení odpovídala „pásmu I“ a „pásma II“ průběhu nabíjení. Po většinu doby jsou charakteristiky téměř shodné. V poslední části této fáze měření došlo k výraznějšímu nárůstu napětí na akumulátoru Pb-2 signalizující téměř úplné nabití a přechod do „pásma III“ charakteristického plynováním akumulátoru. Protože je toto pásmo nabíjení pro uvedený typ akumulátoru nepřijatelné, bylo provedeno napěťové omezení na bezpečnou hodnotu 41 V (13,7 V na jeden AKU). Tato hodnota byla následně ještě jednou snížena na hodnotu 40 V (13,33 V na jeden AKU) a to z důvodu nekontrolovatelného nárůstu napětí na akumulátoru Pb-1. Oblast nabíjení zdrojem konstantního napětí s hodnotami napětí v oblasti úplného nabití a s proudovým omezením je v daném případě charakteristická klesajícím nabíjecím proudem.

Jak je vidět z uvedených charakteristik, oblast nabíjení zdrojem konstantního napětí s omezením nabíjecího proudu až k hranici „pásma III“ v daném zapojení není zřejmě pro uvedené typy akumulátorů (a zřejmě nejen pro ně) nejvhodnější. Řešením by bylo nabíjení na poněkud nižší úroveň napětí, kdy se akumulátory chovaly téměř shodně. Tomu také odpovídá chování akumulátorů po druhém snížení napětí, kdy směrnice napětí na jednotlivých akumulátorech směřují téměř do jednoho bodu.

Pokus s měřením vybíjecích charakteristik ve stejném uspořádání vzhledem k časové náročnosti měření prováděny nebyly, dá se však předpokládat obdobné (téměř shodné) chování průběhů klesajícího napětí až do okamžiku blížícímu se stavu úplného vybití, kdy se nebudou okamžiky úplného vybití shodovat a charakteristiky se budou rozcházet. Na hranici konečného vybíjecího napětí by hrozilo nebezpečí hlubokého vybití některého z akumulátorů.

Z uvedených výsledků měření vyplývá, že při sériovém zapojení není vhodné uvedené akumulátory provozovat v mezních podmínkách stavu nabití a vybití.

2.4.4.5 Reálná nabíjecí charakteristika olověného startovacího akumulátoru

V příloze 5-2 je znázorněna nabíjecí charakteristika olověného startovacího akumulátoru. Akumulátor byl před zahájením nabíjení vybit na teoreticky nulovou hodnotu zbytkového náboje. Na tvaru charakteristiky jsou naznačena všechna tři pásma nabíjení popsána v kapitole 2.4.4.1. Nabíjení bylo provedeno zdrojem konstantního proudu 5 A bez jakýchkoliv omezení nabíjecího napětí. Ke konci nabíjení došlo k intenzivnímu plynování akumulátoru a částečnému poklesu konečného nabíjecího napětí. Dá se předpokládat, že pokles napětí způsobilo ohřátí elektrolytu z počáteční hodnoty cca 10 °C na konečných cca 35 °C. Po ukončení nabíjení je patrný, stejně jako u jiných akumulátorů, postupný pokles napětí až na hodnotu odpovídající nabitému akumulátoru.

V příloze 6-1 je znázorněna vybíjecí charakteristiku zmíněného akumulátoru při teplotě pod bodem mrazu. Akumulátor byl vybíjen střední hodnotou proudu cca 6,5 A. Tomu by odpovídalo množství odebraného náboje $C = I_{\text{vyb}} \cdot t_{\text{vyb}} = 6,5 \cdot 1,5 = 9,75 \text{ Ah}$. Tato hodnota teoretického zbytkového náboje je však vzhledem k plné funkčnosti akumulátoru nereálná.

Protože uvedená měření neodpovídají žádným metodikám a charakteristiky není možno porovnat s žádnými konkrétními charakteristikami výrobce, navíc byla měření prováděna za atypických až extrémních⁶ podmínek, jsou výsledky pouze ukázkou možného způsobu měření a ověření obecných nabíjecích a vybíjecích charakteristik.

2.4.4.6 Vyhodnocení výsledků měření

Z výsledků měření při porovnání s parametry uváděnými výrobcem vyplývá nutnost přesné definice podmínek, za jakých se měření a následné vyhodnocení parametrů provádí. Prakticky byl ověřen vliv teploty a stáří na výsledky měření. Rozptyl parametrů pro možné posuzování je natolik velký, že popis možných metod přesahuje rozsah této práce. Orientační posouzení stavu lze bezpochyby provést měřením napětí na svorkách při zatížení vhodným vybíjecím proudem po určitou dobu. Seriózní posouzení je však nutno provést seriózními metodami za přesně definovaných podmínek.

⁶ Akumulátor byl vyjmut z vozidla parkovaného venku v zimním období při teplotě pod bodem mrazu.

3 ROZBOR METOD ZJIŠŤOVÁNÍ STAVU NABITÍ AKUMULÁTORŮ

V této kapitole budou popsány metody zjišťování stavu nabití vybraných typů akumulátorů. Na základě rozboru charakteristik akumulátorů a metod zjišťování nabití budou vybrány typy akumulátorů vhodné pro druhy provozu s balancérem.

Výsledky rozboru budou v dalších kapitolách sloužit jako podklad pro stanovení základní koncepce a parametry balancéru.

3.1 Způsoby určení nabití a ukončení nabíjení alkalických akumulátorů NiCd a NiMH

3.1.1 Proudové ukončení nabíjení

Nabíjení je prováděno zdrojem konstantního proudu. Po dosažení definované velikosti napětí přejde nabíjení do režimu nabíjení konstantním napětím. Nabíjení je ukončeno po nárůstu proudu v průběhu nabíjení. Nárůst proudu je způsoben poklesem napětí po dosažení maximální kapacity (vyplývá z tvaru nabíjecích charakteristik, např. příloha 1-1).

3.1.2 Časové ukončení nabíjení

Nabíjení je prováděno zdrojem konstantního proudu. Nabíjení je ukončeno po předem definovaném čase. Nevýhodou uvedené metody je nutnost znát zbytkovou kapacitu akumulátorů, nebo nutnost zcela vybit akumulátory před započítáním nabíjení.

3.1.3 Napět'ové ukončení nabíjení

- **Metoda „Vco“.** Jedná se o metodu ukončení nabíjení po dosažení předem stanoveného napětí. Napětí se stanovuje podle katalogových nabíjecích křivek pro konkrétní akumulátor. Nevýhodou uvedené metody je, že se velikost napětí výrazně mění v závislosti na teplotě, nabíjecím proudu, stáří, způsobu skladování a podobně. Z uvedeného důvodu se uvedená metoda používá pouze jako doplňková.
- **Metoda „PVK“.** Jedná se o metodu ukončení nabíjení po dosažení vrcholu napětí označovaného „PVK“. Nabíjení je ukončeno v momentě dosažení nejvyššího napětí. Metoda je vhodná především pro větší nabíjecí proudy. Při menších nabíjecích proudcích nemusí napět'ový vrchol „PVK“ vůbec existovat což je patrné jak z katalogových, tak naměřených nabíjecích charakteristik. **Metoda není vhodná, jak vyplývá z nabíjecích charakteristik pro Ni-MH akumulátory.**
- **Metoda „- ΔV“.** Metoda je založena na indikaci poklesu napětí na konci procesu nabíjení. O metodě platí podobně jako u metody „PVK“, že je vhodná především pro větší nabíjecí

proudy. Při menších nabíjecích proudech nemusí vůbec dojít k poklesu napětí na konci nabíjení. **Metoda není vhodná, jak vyplývá z nabíjecích charakteristik pro Ni-MH akumulátory.**

- **Metoda „ d^2V/dt^2 “** – metoda umožňuje sledování druhé derivace napěťové špičky v čase. Uvedenou metodou nelze dosáhnout plného nabití akumulátorů. Proto dochází po dosažení derivační špičky k přepnutí na nabíjení dovoleným trvalým nabíjecím proudem. Uvedenou metodou nedochází k přebíjení akumulátorů.

3.1.4 Teplotní ukončení nabíjení

- **Teplotní ukončení „ $\Delta T/\Delta t$ “** - touto metodou je ukončeno nabíjení po dosažení určité strmosti nárůstu teploty akumulátoru v čase. Metodu lze použít pouze v určitém rozsahu teplot okolí.
- **Teplotní ukončení „TCO“** - k ukončení nabíjení dochází po dosažení definované teploty akumulátoru. Metodu lze tak jako v předchozím případě použít pouze v určitém rozsahu teplot okolí.

3.2 Olověné (kyselé) akumulátory

Stav nabití lze určit u olověných akumulátorů spolehlivě dvěma způsoby.

První způsob je založen na měření hustoty elektrolytu při stanovených podmínkách. Hustota elektrolytu je ovlivněna především teplotou elektrolytu, se kterou se musí při měření hustoty počítat. Měřením hustoty elektrolytu lze dosáhnout nejobjektivnější výsledky vypovídající o velikosti kapacity akumulátoru. Uvedeným způsobem vyhodnocení stavu nabití se dále nebude zabývat z důvodu její nevhodnosti pro provozní zjišťování stavu bez zásahu obsluhy.

Druhý způsob je založen na měření napětí na svorkách akumulátoru opět při stanovených podmínkách. Rozhodující vliv na velikost měření má teplota akumulátoru a velikost nabíjecího proudu. Pomocí měření napětí lze relativně spolehlivě stanovit i pásmo nabíjení (I, II nebo III), ve kterém se v průběhu nabíjení pohybujeme a včas omezit nabíjecí proud tak, aby nedošlo k poškození akumulátoru.

3.3 Rozbor metod zjišťování stavu nabití

3.3.1 Alkalické akumulátory NiCd a NiMH

Tvar nabíjecích charakteristik NiCd a NiMH akumulátorů (příloha 1-1, 2-1) vykazuje velkou závislost na velikosti nabíjecího proudu. Při velkých nabíjecích proudech je možno ukončovat nabíjení některou z metod založenou na vyhodnocení poklesu napětí na konci procesu nabíjení (proudové a napěťové ukončení nabíjení). Při malých nabíjecích proudech se jeví jako nejvhodnější metoda časového nabíjení, při které je však potřebná znalost zbytkového náboje akumulátoru, nebo jeho úplné vybití a následné odvození parametrů nabíjení (doba nabíjení a nabíjecí proud) od parametrů akumulátoru.

Odvození stavu nabití od velikosti napětí na svorkách akumulátoru při různých nabíjecích proudech je zřejmě u uvedených typů akumulátorů téměř nemožné. Z naměřených charakteristik vyplývá, kromě již zmíněných vlivů, velká závislost napětí na svorkách akumulátorů a tvaru nabíjecích charakteristik na velikosti nabíjecího proudu. Právě výrazně rozdílné tvary nabíjecích charakteristik uvedený způsob vyhodnocení stavu nabití pro NiCd a NiMH akumulátory zcela vylučují.

3.3.2 Olověné (kyselé) akumulátory

Tvar nabíjecích charakteristik olověných akumulátorů umožňuje nejjednodušším možným způsobem, pouhým odvozením od velikosti napětí na akumulátoru vyhodnocovat stav nabití. I při rozdílných nabíjecích, případně vybíjecích proudech se tvar charakteristik nemění, mění se pouze jejich strmost. Uvedené tvrzení se opírá nejen o údaje získané z dostupné literatury [7], [8], ale i o praktická měření nabíjecích a vybíjecích charakteristik.

3.4 Stanovení základního způsobu činnosti „Akumulátorového balancéru“

Pro stanovení základního způsobu činnosti je zapotřebí vycházet ze základních požadavků na činnost balancéru uvedených v kapitole 1. Pro připomenutí pouze zopakují, že základním požadavkem nezávislým na způsobu činnosti je vyrovnání kapacity nebo její udržení na srovnatelné úrovni u dvou sériově zapojených.

V předchozích odstavcích bylo popsáno chování různých typů alkalických a olověných (kyselých) akumulátorů při různých provozních podmínkách a různých úrovních nabití a naznačen možný způsob porovnání jejich kapacit odvozený od velikosti napětí na svorkách akumulátorů.

3.4.1 Způsob činnosti s akumulátory NiCd a NiMH

V případě alkalických NiCd a NiMH akumulátorů by bylo zřejmě nutno použít, vzhledem k tvaru nabíjecích charakteristik, velmi sofistikovaný způsob porovnávání kapacity, který by v sobě zřejmě musel zahrnovat sledování režimů provozu akumulátorů, sledování množství odebraného a dodaného náboje, a jeho sumaci pro vzájemné porovnání.

Porovnání kapacity odvozené od rozdílu napětí na akumulátorech by bylo možné pouze v případě, pokud bychom akumulátory bezpečně provozovali před hranicí „napětového vrcholu“. Protože se dá předpokládat dosažení „napětového vrcholu“ v různých okamžicích, mohlo by v průběhu vyrovnávání kapacity mezi akumulátory v okamžiku, kdy na jednom z akumulátorů dojde v důsledku nabití k poklesu napětí dojde k paradoxní situaci, kdy bude přelévána energie z ještě nenabitého akumulátoru do akumulátoru, který je již nabit na 100 % své kapacity. Tento způsob porovnávání kapacity by byl pro NiCd a NiMH akumulátory použitelný v případě nabíjení velmi malým proudem, kdy se „napětový vrchol“ nevytvoří. To by znamenalo omezení pro velmi malou „nesymetrickou zátěž“⁷ a nabíjení a vyrovnávání kapacity pouze velmi malým nabíjecím a vyrovnávacím proudem do 1/10C.

Otázkou pak samozřejmě při daných omezeních zůstává smysl balancéru pro uvedené typy akumulátorů při ještě přijatelné složitosti balancéru.

3.4.2 Způsob činnosti s olověnými (kyselými) akumulátory

Z tvaru nabíjecích a vybíjecích charakteristik dostupných z literatury a ověřených měření lze jednoznačně konstatovat, že velikost napětí na svorkách olověných akumulátorů je přímo úměrná úrovni nabití (velikosti dodaného náboje). Závislost sice není lineární, ale tvar je v různých fázích nabíjení při stejných podmínkách provozu téměř shodný. Z uvedeného lze jednoznačně konstatovat, že porovnání úrovně nabití lze u olověných akumulátorů odvodit od rozdílu napětí na svorkách sériově zapojených akumulátorů v celém intervalu 0 – 100 % nabití.

Omezujícím činitelem pro běžný nehermetický, např. startovací akumulátor je konečné nabíjecí napětí. To je však zpravidla sledováno nabíječem, kterým jsou akumulátory nabíjeny. U nehermetických akumulátorů však není ani hranice konečného nabíjecího napětí nijak kritická, navíc je výrazně závislá na velikosti nabíjecího proudu.

Významným omezujícím činitelem pro hermetický, například gelový akumulátor, je dosažení úrovně plynovacího napětí. K plynování nesmí u uvedeného typu akumulátoru vůbec dojít.

⁷ Pojmem „nesymetrická zátěž“ je myšlen rozdílný proudový odběr z jednoho, nebo druhého akumulátoru

3.5 Závěr rozboru

Z popisu a porovnání akumulátorů a vyhodnocení jejich nabíjecích a vybíjecích charakteristik jednoznačně vyplývá, že nejvhodnějším typem akumulátorů pro režim provozu s „Akumulátorovým balancérem“ je akumulátor olověný nehermetický a s určitými omezeními i olověný akumulátor hermetický. Porovnání úrovně nabití lze provádět pro olověné akumulátory pouhým porovnáním velikosti napětí na svorkách akumulátoru za jinak stejných provozních podmínek (teplota). Z uvedeného důvodu bude „Akumulátorový balancér,“ navržen pro olověný akumulátor. Základní veličinou použitou pro porovnání kapacit bude rozdílové napětí $\Delta U = |U_{AKU-A} - U_{AKU-B}|$ dvou sériově zapojených akumulátorů.

4 NÁVRH BALANCÉRU

V následující kapitole bude popsán návrh „Akumulátorového balancéru“. Cílem bude navrhnout takové řešení, které:

- bude vyrovnávat kapacitu akumulátorů,
- bude vyhovovat režimům provozu vyjmenovaným v kapitole 2,
- bude respektovat chování olověných akumulátorů, pro které bude navržen,
- bude po odpovídajících úpravách přenositelné na jiné typy (výrobce, kapacita) akumulátorů,
- po připojení k akumulátorům nebude jeho činnost vyžadovat žádnou obsluhu.

Návrh balancéru bude proveden i vzhledem k předpokládanému nejběžnějšímu způsobu použití pro dva sériově zapojené dvanáctivoltové akumulátory. Vzhledem k omezeným laboratorním možnostem budou pro návrh a ověření funkce použity běžně dostupné gelové hermetické akumulátory PANASONIC LC-R127R2P s kapacitou 7,2 Ah.

Z katalogových listů [41] vyplývá, že uvedené akumulátory mohou být nabíjeny buď stejnosměrným nepulsujícím proudem $\leq 1,08$ A, nebo pulsujícím proudem $\leq 2,88$ A. Z uvedených parametrů bude odvozena i velikost nabíjecího (balančního) proudu. Jistým omezením pro uvedený typ akumulátorů je hranice dosažení plynovacího napětí při nabíjení a s tím související nebezpečí poškození. Chování sériově zapojených hermetických olověných akumulátorů bylo vyhodnoceno na základě praktických měření v kapitole 2.4.4.4. Omezení maximálního nabíjecího napětí nebude záležitostí balancéru, ale bude předpoklad použití nabíječe s již uvedeným omezeným nabíjecím napětím. Z uvedeného důvodu nebude součástí řešení.

Pro porovnání kapacit akumulátorů a odvození základní funkce bude použito, jak již bylo zmíněno v kapitole 3.5 rozdílové napětí ΔU . Z uvedeného důvodu bude v následujícím textu namísto správnějšího výrazu „porovnávání kapacity“ používáno výrazu „porovnávání napětí“ a s tím souvisejícího „rozdílového napětí“.

4.1 Stanovení základních parametrů

4.1.1 Pracovní napětí balancéru

Pracovní napětí bude odpovídat rozsahu napětí nehermetických akumulátorů:

- Napětí 2 x 12 V
 - rozsah napětí akumulátorů 2 x 10,4 V až 2 x 16,8 V (20,8 až 33,6 V)

- **maximální požadovaný rozsah** **2 x 8 V až 2 x 17 V (16 až 34 V)**
- Dodávaný nabíjecí (balanční) proud
 - pro uvedený typ akumulátorů 1,08 A_{ss} (stejnoseměrný), 2,88 A_p (pulsní)
 - **minimální požadovaný** **2 A**

Návrh balancéru bude proveden tak, aby bylo dosaženo požadované velikosti nabíjecího (balančního) proudu. Pokud nevznikne bezprostřední nebezpečí poškození akumulátorů při dosažení vyšší hodnoty nabíjecího proudu, nebude brán ohled na případné zkrácení jejich životnosti. Z uvedeného důvodu nebude maximální hodnota záměrně uměle snižována.

- Rozdíl napětí na akumulátorech bez „nesymetrické zátěže“
 - **Menší než** **0,25 V** – střední hodnota
- Rozdíl napětí na akumulátorech při „nesymetrické zátěži“
 - **Menší než** **0,5 V** – střední hodnota

Pro zlepšení užitečných vlastností bude snaha navrhnout balancér pro větší rozsah napětí akumulátorů tak, aby jeho funkce vyhovovala i pro 2 sériově zapojené šestivoltové akumulátory bez jakýchkoliv změn v obvodovém řešení a v hodnotách použitých součástek.

- Tomu odpovídá:
 - Rozsah napětí akumulátorů 2 x 5,2 V až 2 x 8,4 V (10,4 až 16,8 V)
- Pro akumulátory 2 x 12 V a 2 x 6 V
 - Celkový rozsah napětí min. 2 x 5,2 V až 2 x 14,8 V (10,4 až 33,6 V)
 - **Celkový požadovaný rozsah napětí min. 2 x 5 V až 2 x 17 V (10 až 34 V)**

4.2 Koncepce

Při návrhu bude vycházeno ze všech již zmíněných poznatků. Na jejich základě bude proveden návrh koncepce a popsána činnost balancéru.

Na Obr. 4.1 jsou naznačeny některé základní způsoby provozu, a to především kdy:

- jeden z akumulátorů (v uvedeném případě spodní AKU 12 V – 2(B)) je zatížen proudem I_{12V}, který napájí spotřebiče s napájecím napětím 12 V,
- je připojen akumulátorový balancér, jehož úkolem je vyrovnat napětí na akumulátorech,
- jsou zatíženy oba akumulátory proudem I_{24V}, který napájí spotřebiče s napájecím napětím 24 V (Spotřebiče 24 V).

Uvedený popis vyjadřuje zřejmě nejběžnější způsob použití balancéru.

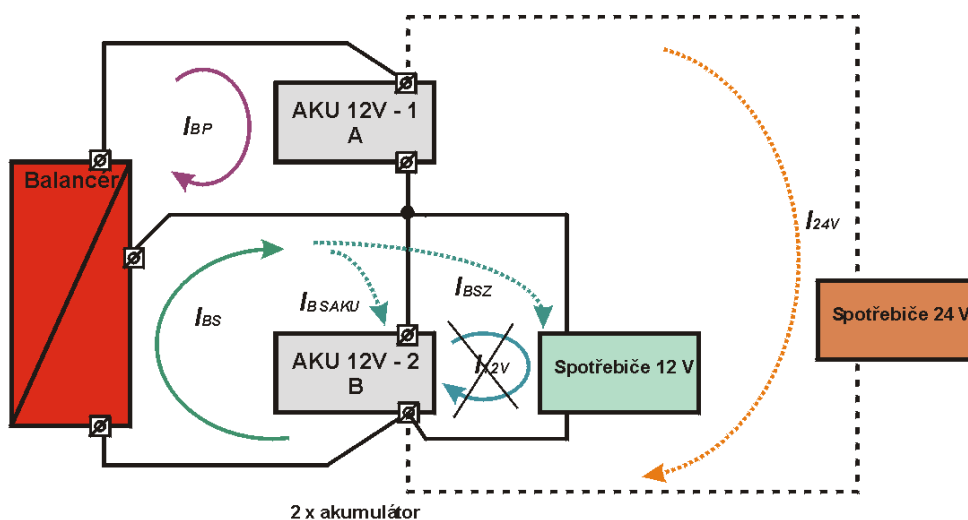
Při uvedeném způsobu provozu dochází k vybíjení jednoho akumulátoru AKU 12V–2(B) větším proudem. Důsledkem je větší pokles napětí na svorkách oproti akumulátoru druhému AKU 12V–1(A). To vede ke vzniku rozdílu napětí na svorkách akumulátorů a vzniku již zmíněného „rozdílového napětí“.

Úkolem balancéru bude následně vyrovnat (zvýšit) napětí na svorkách více zatíženého akumulátoru. Ve své podstatě to znamená odebrat energii – proud I_{BP} (primární proud balancéru) z akumulátoru méně zatíženého a dodat energii - proud I_{BS} (sekundární proud balancéru) do akumulátoru zatíženého více. Z uvedeného vyplývá, že maximální proud tekoucí do zátěže se bude rovnat maximální velikosti proudu, který bude schopen dodat do více zatíženého akumulátoru (zátěže) balancér. Protože velikost proudu do zátěže nebude pro účel řízení velikosti proudu balancéru snímána, bude se maximální (celkový) proud balancéru I_{BS} (sekundární proud balancéru) dělit mezi proud zátěží I_{BSZ} a proud nabíjecí, tekoucí do více zatíženého akumulátoru I_{BSAKU} . Proud bude následně omezen a přerušen po dosažení shody napětí na akumulátorech, prakticky v okamžiku, kdy bude rozdílové napětí ΔU v požadovaných mezích. Dá se předpokládat, že v uvedeném případě budou až do okamžiku vyrovnání napětí na akumulátorech spotřebiče napájené ze sekundárního proudu balancéru I_{BS} , nikoli z akumulátoru.

V okamžiku, kdy dojde ke shodě napětí na akumulátorech a přestane být dodáván sekundární proud balancéru I_{BS} , budou spotřebiče 12 V napájeny opět z příslušného akumulátoru až do okamžiku, kdy dojde k poklesu napětí na více zatíženém akumulátoru a ke vzniku rozdílového napětí.

Obvody vyhodnocující rozdílové napětí budou mít z důvodu zlepšení stability určitou hysterezi. Proto se bude rozdílové napětí mezi akumulátory pohybovat v určitých minimálních mezích (viz. základní parametry, kapitola 4.1).

Funkce balancéru bude zachována i v případě připojení zátěže ke druhému akumulátoru nebo při kombinaci zátěží (to je ovšem jen málo pravděpodobné). Pokud budou oba akumulátory zatíženy pouze společnou zátěží spotřebiči 24 V, bude jeho funkce omezena pouze na vyrovnávání napětí na akumulátorech při vzniku jeho rozdílu.



Obr. 4.1 Způsoby provozu

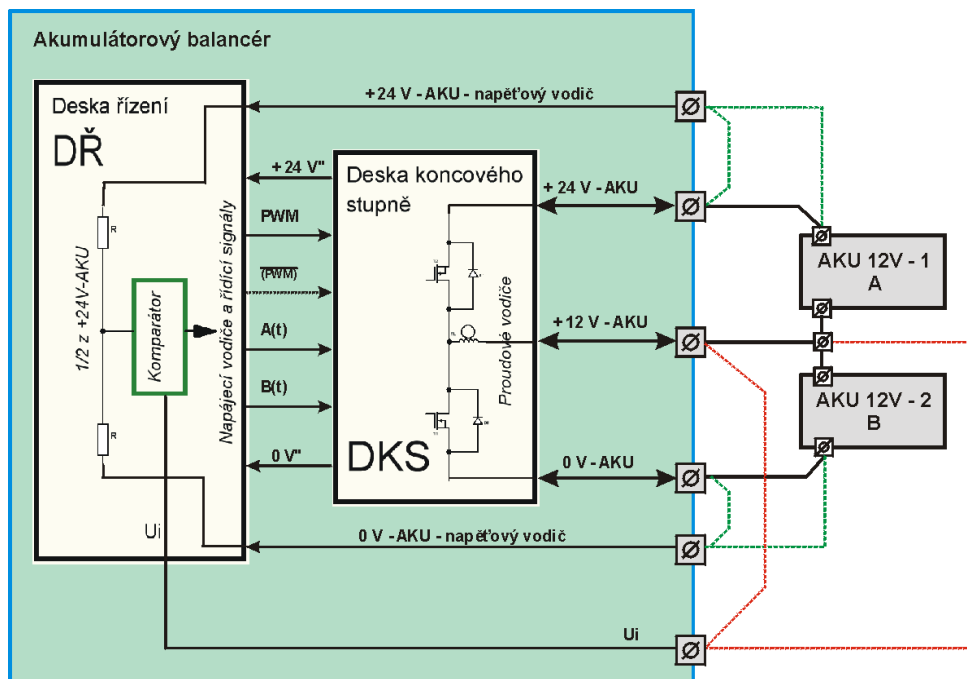
4.3 Blokové schéma, Obr. 4.2

Z důvodu vývoje balancéru bude návrh řešen samostatně pro část řídicí, která bude dále v textu nazývána „Deska řízení“ – DŘ a část výkonovou, která bude nazývána „Deska koncového stupně“ – DKS. Návrh bude proveden tak, aby obě části spolupracovaly a zároveň byla umožněna alternativa jiných řešení DŘ i DKS při zachování vzájemné kompatibility. Mezi oběma částmi bude provedeno propojení pomocí vodičů zajišťujících napájení a vodičů přenášejících řídicí signály.

Samostatně budou vedeny z DŘ vodiče (napěťové vodiče) pro snímání napětí z akumulátorů a to tak, aby byl co nejvíce omezen vliv proudů protékajících proudovými vodiči a svorkami do DKS. Zapojení bude umožňovat alternativu připojení napěťových vodičů buď ke svorkám balancéru nebo méně praktické, ale správnější připojení přímo ke svorkám akumulátorů.

Zároveň bude zapojení umožňovat funkčnost celého balancéru po připojení pouze proudových vodičů. Pro správné vyhodnocení rozdílů napětí však bude vždy nutno připojit i vodiče napěťové, a to některým z již zmíněných způsobů. Pokud budou nejprve připojeny vodiče napěťové, bude zajištěno pouze napájení DŘ.

Rozdílové napětí jako základní veličina pro řízení činnosti balancéru bude odvozeno od rozdílu napětí mezi napětím U_i snímaným ze společného „středu“ akumulátorů a uměle vytvořenou polovinou napětí z +24V-AKU.

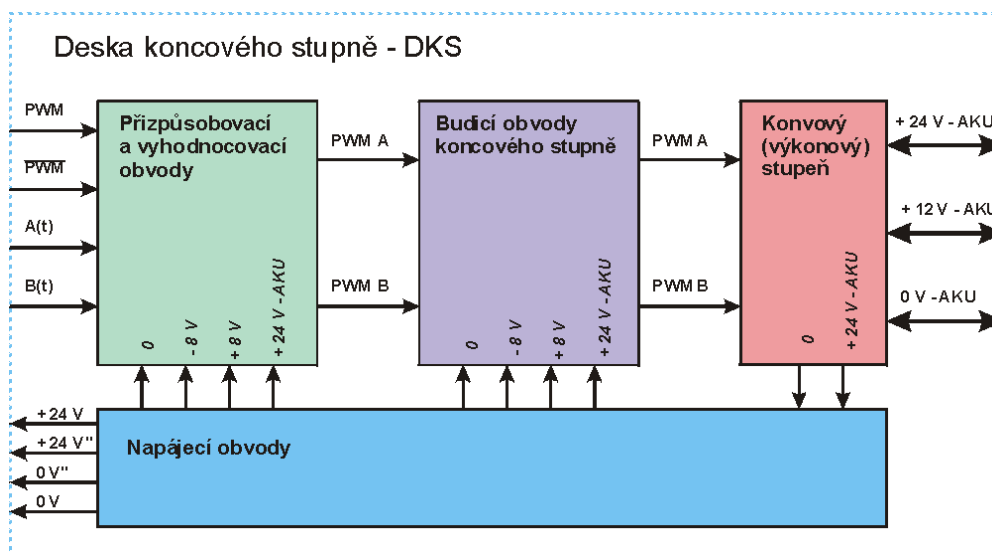


Obr. 4.2 Blokové schéma balancéru

4.4 Deska koncového (výkonového) stupně (DKS), Obr. 4.3

Schéma koncového stupně je rozděleno z hlediska funkce do tří základních částí. Ty jsou tvořeny:

- přizpůsobovacími a vyhodnocovacími obvody,
- budíciemi obvody koncového stupně,
- výkonovým stupněm,
- napájecími obvody.



Obr. 4.3 Blokové schéma DKS

4.4.1 Výkonový stupeň

Schéma zapojení výkonového stupně je vyobrazeno spolu s budícími obvody na Obr. 4.8. Nejdůležitější a z hlediska návrhu také nejproblematičtější částí návrhu DKS je návrh výkonové části. Základ výkonové části je tvořen dvojicí tranzistoru T1 (N-Mos) a T2 (P-Mos), dvěma nulovacími Schottkyho diodami D7, D8 a akumulací tlumivkou TL. Tranzistory jsou spínány v závislosti na vyhodnocení rozdílového napětí akumulátorů. Kmitočet spínání T1, případně T2 je konstantní. Střída odpovídá PWM modulaci dle aktuálních potřeb akumulátorů.

Činnost výkonové části vyplývá z náhradního schématu uvedeného na Obr. 4.4 a Obr. 4.6. Ve své podstatě se jedná z hlediska funkce o **zvyšující invertující přepínaný spínaný zdroj**. Pro maximální zjednodušení jsou v náhradním schématu nahrazeny spínací tranzistory ideálními spínači, Schottkyho diody se chovají jako ideální ventil. Popis činnosti bude na náhradním schématu popsán pouze pro případ, kdy jsou vyrovnávána napětí na akumulátorech.

Na Obr. 4.4 je uveden případ, kdy se energie přelévá z AKU-A do AKU-B. Spínač S1 je spínán v rytmu PWM signálu o šířce periody T.

- Činnost obvodu po sepnutí spínače S1 v časovém intervalu τ_1 :
 - proud i_{AKU-A} protéká tlumivkou TL a spínačem S1,
 - velikost proudu i_{AKU-A} není konstantní, v čase až do okamžiku t_1 narůstá,
 - velikost proudu i_{AKU-A} v daném časovém intervalu lze odvodit ze vztahu

$$U_{AKU-A} = U_{TL} = L \cdot di_{AKU-A} / d\tau_1, \quad (4-1)$$

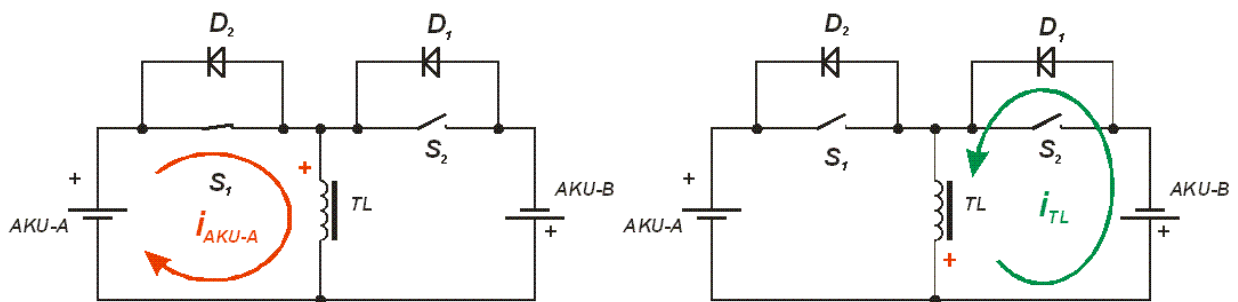
$$\text{z toho } di_{AKU-A} = U_{AKU-A} \cdot d\tau_1 / L. \quad (4-2)$$

- Činnost obvodu po rozepnutí spínače S1 v časovém intervalu τ_2 :
 - energie naakumulovaná v tlumivce TL v okamžiku t_1 způsobí, že po rozepnutí spínače S1 bude cívka působit jako zdroj energie. Na cívce se objeví indukované napětí opačného směru $U_{TL} = L \cdot di_2 / d\tau_2$, cívka se stane zdrojem časově proměnného proudu stejného směru. V okamžiku, kdy napětí na cívce překoná napětí na AKU-B, začne proud akumulátor nabíjet. Velikost proudu i_{TL} bude v čase klesat dle vztahu, $di_{TL} = (U_{AKU-2} - U_{TL}) \cdot d\tau_2 / L$, kde rozdíl napětí je prakticky způsoben úbytky na přívodních vodičích, vinutí cívky a vnitřním odporu AKU-B. Teoreticky může dosáhnout hodnoty 0 V. V tom případě by proud tlumivkou TL klesal lineárně,

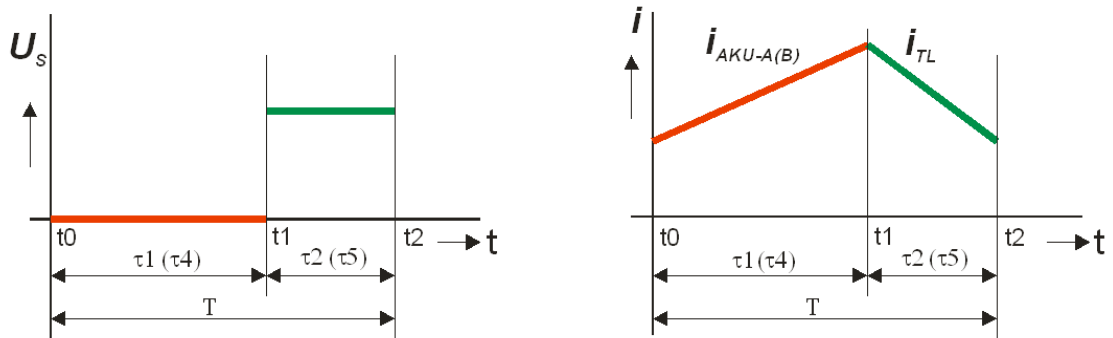
- proud i_{TL} poteče z cívky stejným směrem, obvod se bude uzavírat přes diodu D1 a AKU-B, který jím bude nabíjen.
- Vyhodnocení činnosti:
 - v okamžiku t_1 platí rovnost $i_{AKU-A} = i_{TL}$. Po dosazení za i_{AKU-A} a i_{TL} dostaneme $U_{AKU-A} \cdot \tau_1/L = (U_{AKU-B} - U_{TL}) \cdot \tau_2/L$, kde v daném okamžiku platí, že $U_{AKU-A} = U_{TL}$. Po dosazení a úpravě $U_{AKU-B} = U_{AKU-A} \cdot (\tau_1 + \tau_2)/\tau_2$, kde $(\tau_1 + \tau_2)/\tau_2$ je větší než 1. To potvrzuje tvrzení, že $U_{AKU-B} > U_{AKU-A}$ a měnič může pracovat jako zvyšující,
 - přibližné průběhy proudů i_{AKU-A} , i_{TL} , a napětí na spínacím prvku U_S jsou znázorněny graficky na Obr. 4.5.

Na Obr. 4.6 je uveden případ, kdy se energie přelévá z AKU-B do AKU-A. Spínač S2 je spínán v rytmu PWM signálu o šířce periody T. Činnost obvodu je analogická s činností v předchozím případě.

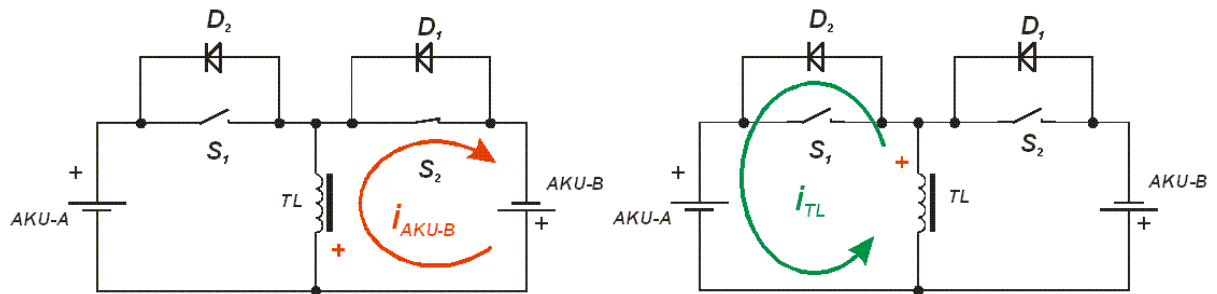
- Činnost obvodu po sepnutí spínače S2 v časovém intervalu τ_4 :
 - proud i_{AKU-B} protéká tlumivkou TL a spínačem S2.
- Činnost obvodu po rozepnutí spínače S2 v časovém intervalu τ_5 :
 - proud i_{TL} poteče z cívky stejným směrem, obvod se bude uzavírat přes diodu D2, a AKU-B, který jím bude nabíjen.



Obr. 4.4 Náhradní schéma výkonové části DKS. Proudů a napětí v případě, kdy $U_{AKU-A} > U_{AKU-B}$



Obr. 4.5 Přibližné průběhy proudů a napětí, $U_{AKU-A} > (<) U_{AKU-B}$



Obr. 4.6 Náhradní schéma výkonové části DKS. Proudů a napětí v případě, kdy $U_{AKU-A} < U_{AKU-B}$

4.4.2 Simulace a návrh koncového stupně

Pro simulaci obvodu bylo použito schéma pro simulaci Obr. 4.7. Pro obvodové prvky byly použity hodnoty vycházející z návrhu a katalogových údajů nebo hodnoty prakticky naměřené:

- tlumivka TL $L = 100 \mu\text{H}$, $R_{TL} = 0,01 \Omega$,
- akumulátory A, B 12 V, vnitřní odpory R_{AKU-A} , $R_{AKU-B} = 0,05 \Omega$,
- zatěžovací odpor R_Z $R_Z = 5 \Omega$. Tomu odpovídá proud zátěží

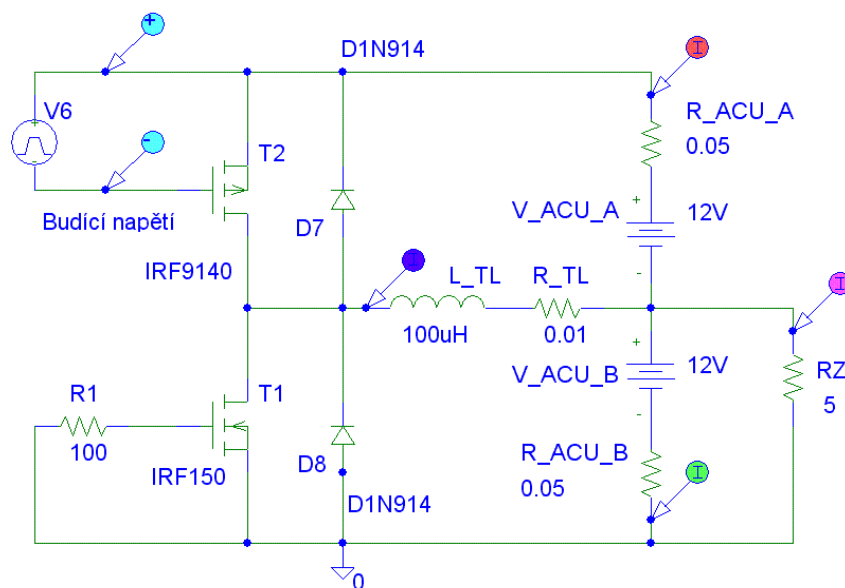
$$I_{RZ} = U_{AKU} / R_Z = 12 / 5 = 2,4 \text{ A}$$
- tranzistory N a P-MOS jsou vybrané typy z knihoven programu⁸ s ohledem na co nejmenší odpor v sepnutém stavu,
- diody Schotkyho s malým úbytkem napětí v propustném směru jsou vybrané typy z knihoven programu,

⁸ V knihovnách programu jsou pro potřeby simulace funkce celého obvodu uloženy potřebné údaje o obvodovém prvku

- zdroj pravoúhlého signálu s napětím špička-špička $U_{\text{ss}} = 8\text{V}$, střída 50 %, frekvence $f = 6\text{ kHz}$.

Číslování obvodových prvků je v souladu se zapojením koncového (výkonového) stupně. Na následujících grafech jsou zobrazeny průběhy:

- průběh budicího napětí zdroje signálu (světle modrá značka ve schématu a průběh), příloha 7-1,
- průběh proudu tlumivkou TL (tmavě modrá značka ve schématu a průběh), příloha 7-2,
- průběh proudu akumulátorem AKU-A (červená značka ve schématu a průběh), příloha 7-3,
- průběh proudu akumulátorem AKU-B (zelená značka ve schématu a průběh) a zatěžovacím odporem RZ (růžová značka ve schématu a průběh). Zde je patrný vliv zatěžovacího rezistoru RZ. Proud se v závislosti na průběhu periody dělí mezi akumulátor AKU-B a RZ, příloha 8-1,
- průběhy proudu akumulátorem AKU-A, AKU-B a tlumivkou TL (odpovídající barvy). Zde jsou patrné průběhy proudů akumulátory, které přesně kopírují proud tlumivkou s opačnou polaritou. Ke konci každé periody je patrná plochá část, která naznačuje, že veškerá energie akumulovaná v tlumivce (proud dodávaný tlumivkou) byla vyčerpána a ke konci periody již není dodávána, příloha 8-2.



Obr. 4.7 Schéma výkonové části koncového stupně pro simulaci

4.4.3 Popis činnosti navrženého výkonového stupně, Obr. 4.8:

Pokud řídicí obvody na DŘ vyhodnotí, že je napětí na obou akumulátorech AKU-A i AKU-B shodné, koncový stupeň je vyřazen z činnosti, neteče žádný proud.

Řídicí obvod na DŘ vyhodnotí, že napětí na AKU-A připojeného mezi svorkami +24 V-AKU a +12 V-AKU je větší, než napětí větší na AKU-B připojeného ke svorkám +12 V-AKU a 0 V-AKU. V tomto případě spíná v rytmu PWM – A signálu tranzistor T2. Po dobu τ_1 periody T (Obr. 4.5) je otevřen tranzistor T2. Proud tranzistorem T2 teče do akumulací tlumivky TL. Po dobu τ_2 periody T je tranzistor T2 uzavřen. Tlumivka se v této době chová jako zdroj proudu, to znamená, že na ní vzroste napětí tak, aby mohl proud odtéci ve stejném směru obvodem uzavřeným přes akumulátor AKU-B, pojistku Po2, a nulovací diodu D8.

Z uvedeného popisu vyplývá, že v daném případě se činností výkonové části DKS zúčastňuje pouze tranzistor T2, nulovací dioda D8 a akumulací tlumivka TL. Činnost tranzistoru T1 je blokována po celou dobu činnosti. Pokud by tomu tak nebylo, a došlo by k otevření tranzistorů T1 i T2 současně, protekl by tranzistory zkratový proud, který by byl omezen do okamžiku vybavení pojistek Po1 a Po2 pouze impedancí přírodních vodičů a odporem tranzistorů v sepnutém stavu (desítky mΩ). Důsledkem by bylo v lepším případě pouze zničení tranzistorů, v horším zničení plošného spoje.

Řídicí obvod na DŘ vyhodnotí, že napětí na AKU-B připojeného mezi svorkami +12 V-AKU a 0 V-AKU je větší než napětí větší na AKU-A připojeného ke svorkám +24 V-AKU a +12 V-AKU. V tomto případě je funkce obvodu obdobná s tím rozdílem, že v rytmu PWM –B signálu spíná tranzistor T1. Po dobu τ_4 periody T je otevřen tranzistor T1. Proud tranzistorem T1 teče do akumulací tlumivky TL. Po dobu τ_5 periody T je tranzistor T1 uzavřen. Tlumivka se v této době chová jako zdroj proudu, to znamená, že na ní vzroste napětí tak, aby mohl proud odtéci ve stejném směru obvodem uzavřeným přes akumulátor AKU-A, pojistku Po1, a nulovací diodu D7. Z uvedeného popisu vyplývá, že v daném případě se činností výkonové části DKS zúčastňuje pouze tranzistor T1, nulovací dioda D7 a akumulací tlumivka TL. Činnost tranzistoru T2 je blokována po celou dobu činnosti.

4.4.4 Návrh tlumivky TL

Při návrhu tlumivky TL lze zřejmě vyjít ze vztahu $U_{AKU-A} = U_{TL} = L \cdot di_{AKU-A} / dt_1$ (4-1), kde $L = U_{AKU} \cdot di_{AKU} / dt$. Pro výpočet indukčnosti jsou použity následující hodnoty:

- $di_{AKU} = 9,5$ A. Velikost je odečtená z průběhu proudu tlumivkou příloha 7-2. dt_1 lze spočítat z navrženého kmitočtu 6 kHz a střídavy 50 % po dosažení do vztahu

$$d\tau_1 = 1/2 \cdot 1/f = 1/2 \cdot 1/6000 = 83 \mu\text{s} . \quad (4-3)$$

- U_{AKU} se pohybuje v teoretickém rozmezí 10,4 až 16.8 V. Pro výpočet budeme uvažovat rozmezí 10 až 17 V.

Pro minimální napětí akumulátoru 10 V bude velikost indukčnosti po dosazení do odvozeného vztahu $L = U_{AKU-MIN} \cdot d\tau/di_{AKU} = 10 \cdot 0,000083/9,5 = 88 \mu\text{H}$. Pro maximální napětí akumulátoru 17 V bude velikost indukčnosti po dosazení do odvozeného vztahu $L = U_{AKU-MAX} \cdot d\tau/di_{AKU} = 17 \cdot 0,000083/9,5 = 149 \mu\text{H}$.

Protože simulace byla provedena pro velikost zatěžovacího proudu 2 A ($R_Z = 5 \Omega$) při indukčnosti 100 μH , dá se považovat vypočtená hodnota za potvrzení hodnoty použité při simulaci.

Při návrhu budeme uvažovat s hodnotou indukčnosti větší (větší počet závitů). V případě potřeby bude potřebný počet závitů odmotán. Proto volíme pro další výpočet $L_{TL} = 150 \mu\text{H}$.

Pro další návrh byla z důvodu dostupnosti pro požadovaný přenesený výkon $P = U \cdot I = 15 \cdot 2 = 30 \text{ W}$ použita a odzkoušena železoprachová jádra s obchodním označením 157-26 (hmota 26) a 130-3 (hmota 3) [19]. Uvedená železoprachová jádra vyhovují jak z hlediska použitého kmitočtu, tak z hlediska přeneseného výkonu. Dále umožňují velké sycení stejnosměrným proudem (vzduchová mezera je rozprostřena v celém objemu jádra). Veškeré dále uvedené údaje pro výpočet počtu závitů vycházejí z katalogových listů jader.

Počet závitů při použití jádra 157-26 [19] lze při hodnotě činitele indukčnosti $A_L = 970 \mu\text{H}/100$ z požadované indukčnosti $L_{TL} = 150 \mu\text{H}$ vypočítat po dosazení do vztahu

$$N = 100 \cdot \sqrt{L/A_L} = 100 \cdot \sqrt{150/970} = 39 \text{ závitů} \text{ (hodnoty jsou zadávány v } \mu\text{H)}. \quad (4-4)$$

Počet závitů při použití jádra 130-3 [19] je při hodnotě činitele indukčnosti $A_L = 350 \mu\text{H}/100$ z požadované indukčnosti $L_{TL} = 150 \mu\text{H}$ $N = 100 \cdot \sqrt{130/350} = 65 \text{ závitů}$.

4.4.5 Budící obvody koncového stupně

Budící obvody Obr. 4.8 byly navrženy ve dvou verzích. Pro buzení první verze byl navržen samostatný, napěťově řízený zdroj PWM signálu, který je součástí desky řízení. Druhá verze využívá k buzení výkonových tranzistorů PWM signálem hotový zakoupený obvod. Jeho součástí je i zdroj PWM signálu.

Verze 1:

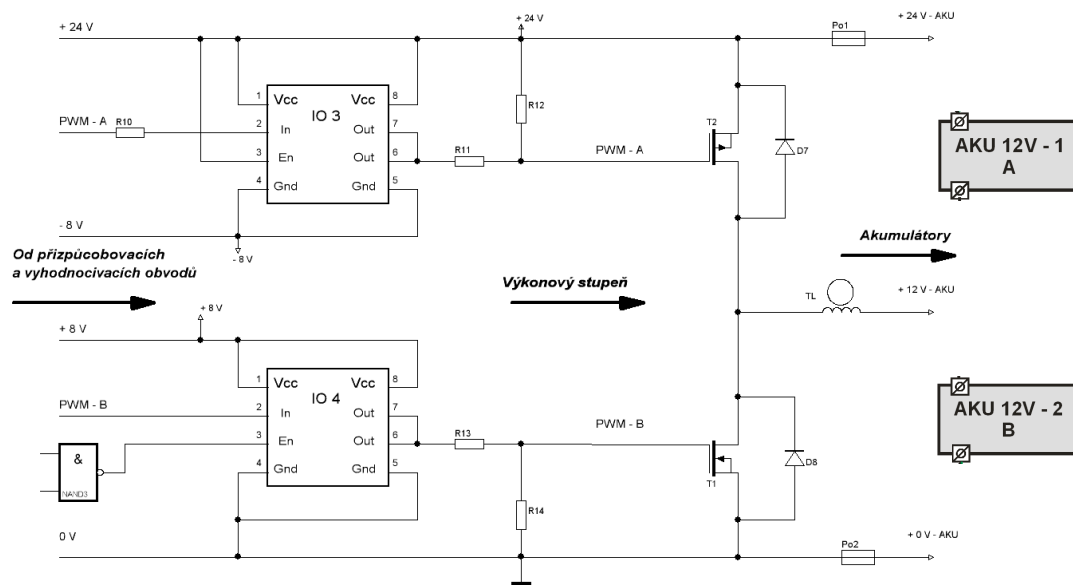
K buzení tranzistorů T1 a T2 jsou ve verzi 1 použity speciální integrované obvody (IO3, IO4) určené ke spínání unipolárních tranzistorů. Jedná se o obvody vyráběné firmou IXYS. Použitý typ IXDD 409SI [23] je vzhledem k dostupnosti v pouzdře SOP8. Ty zaručují velmi rychlé otvírání a zavírání tranzistorů. Kapacita řídicích elektrod uvedených N a P-MOS tranzistorů dosahuje hodnot cca 2 nF. Uvedené obvody umožňují spínat tranzistory typicky za 15 ns při kapacitě přechodu 2,5 nF a napětí řídicí elektrody 18 V. To je umožněno díky dvojici spínacích N a P-MOS tranzistorů na výstupu obvodu s malým odporem v sepnutém stavu (cca 20 mΩ). Vstupy In (vstup signálu) a En (blokování výstupu) obvodu jsou přizpůsobeny pro řízení pomocí CMOS nebo TTL logických obvodů.

Obvod IO4 je napájen (Obr. 4.10) běžným způsobem napětím + 8 V. Napájení obvodu IO3 (Obr. 4.10) je vzhledem k atypickému způsobu řízení vztaženo ke kladnému napájecímu napětí + 24 V, je tedy vzhledem k napětí + 24 V menší o 8 V. Pro odlišení je uvedené napětí označeno v souladu s výstupním napětím použitého stabilizátoru – 8 V.

Výstupy (Out) obou obvodů jsou spojeny s řídicími elektrodami G (Gate) tranzistorů T1 a T2 přes rezistory R11 a R13 o velikosti jednotek Ω. Ty omezují velikost nabíjecího vybíjecího proudu řídicích elektrod tranzistorů. Odpory R11 a R14 zajišťují připojení řídicích elektrod k příslušným potenciálům při nedefinovaných stavech na výstupech IO3 a IO4 tak, aby tranzistory zůstaly uzavřeny.

Vstup En obvodu IO3 není využit k blokování výstupu (Out) a je trvale připojen ke kladnému napájecímu napětí. Pro řízení blokování je použita část řídicích a vyhodnocovacích obvodů DKS. U obvodu IO4 je vstup En využit k blokování výstupu (Out). Správnou polaritu zajišťují opět řídicí a vyhodnocovací obvody DKS.

Ve verzi 2 je pro buzení tranzistorů T1 a T2 použit speciální integrovaný obvod TL494. Popis zapojení a funkce bude proveden v kapitole popisující PWM a její řízení v kapitole 4.5.3.



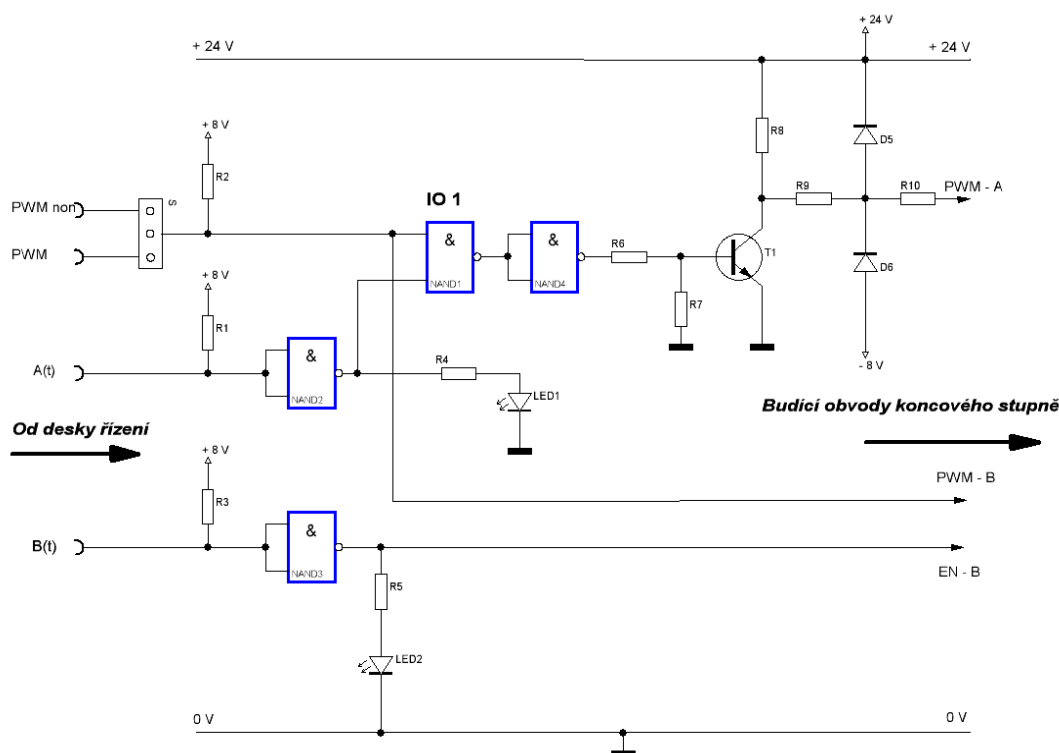
Obr. 4.8 Schéma výkonové části DKS

4.4.6 Přizpůsobovací a vyhodnocovací obvody DKS

Přizpůsobovací a vyhodnocovací obvody Obr. 4.9 jsou tvořeny hradly NAND [29] a jsou navrženy tak, aby dokázaly vyhodnotit logické úrovně signálu na vstupech při napájecím napětí obvodů desky řízení napětím + 8 V. Pokud není DŘ připojena, jsou všechny vstupy připojeny přes odpory 100 k Ω ke kladnému napájecímu napětí a je na nich logická úroveň Log1. Vstupy A(t) a B(t) při Log1 blokují činnost budičů IO3, IO4, takže pokud není DKS připojena k DŘ, je automaticky omezena možnost otevření koncových tranzistorů T1, T2.

Pokud je některý ze vstupů v Log0 (povoleno), rozsvítí se indikační LED1 nebo LED2. Ty jsou do obvodu vloženy pouze z důvodu kontroly stavů při vývoji a z hlediska funkce ani obsluhy nemají žádný význam. Z důvodu minimalizace zatížení jak akumulátorů tak logických výstupů hradel, ze kterých jsou napájeny, jsou použity nízkopříkonové diody. Ty dosahují katalogové svítivosti při proudu v propustném směru 2 mA, prakticky však svítí již při proudu několik set μ A. Pro indikaci budeme počítat s maximálním proudem diodami 1 až 1,5 mA při teoretickém maximálním výstupním napětí hradel 8 V. Při úbytku napětí na LED cca 2 V je úbytek napětí na R4 a R5 cca 6 V. Velikost odporů pak je v rozmezí $R = U/I = 6/0,001 = 6000 \Omega$ až $R = U/I = 6/0,0015 = 4000 \Omega$. Úbytky napětí na výstupech hradel zanedbáváme. Prakticky byl použit a odzkoušen pro R4 a R5 odpor z řady E24 o velikosti 4,7 k Ω .

Obvod hradel je navržen dále tak, aby přiváděl PWM signál ze vstupu PWM ke koncovým tranzistorům ve správné polaritě.



Obr. 4.9 Schéma přizpůsobovacích a vyhodnocovacích obvodů DKS

Tranzistor T1 spolu s odpory diodami R8, R9, R10, D5 a D6 obrací a napětově přizpůsobuje PWM signál z hradla NAND4 k budiči IO3. Odpory R6, R7 tvoří dělič napětí (nastavují pracovní bod) pro otvírání a zavírání tranzistoru T1 logickými úrovněmi hradla NAND4. Ten musí zajistit funkci (otvírání a zavírání) T1 v celém rozsahu napětí logických úrovní obvodu CMOS.

Pro úroveň Log1 a $U_{cc} = 8V$ je rozsah napětí $(0,7-1)U_{cc} = (0,7-1)8 = (5,6-8) V$ [5].


Pro Log0 je rozsah napětí $(0-0,3)U_{cc} = (0-0,3)8 = (0-2,4) V$ [5]. To znamená, že tranzistor musí být s dostatečnou rezervou otvíráván při Log1 napětím 5,6 V a musí být dostatečnou rezervou zavřen při Log0 a napětí 2,4 V. Pro otevření křemíkového tranzistoru by mělo být napětí na přechodu B-E alespoň 0,7 V, pro potřeby výpočtu volíme 0,8 V. Pro jeho spolehlivé uzavření by mělo být napětí menší než zvolené 0,4 V.

Z uvedených hodnot lze spočítat dělicí poměr pro Log1 $U_{R7} = U_{Log1} \cdot R_7 / (R_6 + R_7)$ a z toho $U_{R7} / U_{Log1} = R_7 / (R_6 + R_7) = 0,8 / 5,6 = 1/7$. Z vypočítaného poměru 1/7 lze spočítat napětí na přechodu B-E při Log0 (napětí 2,4 V), $U_{R7} = U_{BE} = U_{Log0} \cdot 1/7 = 2,4 \cdot 1/7 = 0,35 V$. Vypočítané hodnoty dále slouží k výpočtu velikosti odporů pro konkrétní velikost proudu děličem. Jako tranzistor volíme jeden z nejběžnějších typů BC547A [20]. Pro výpočet

významný parametr proudového zesilovacího činitele v zapojení SE $H_{21E} = 120$ až 220 . Pokud zvolíme velikost kolektorového odporu $R_c = R_8 = 10 \text{ k}\Omega$, bude velikost kolektorového proudu I_C při napětí na akumulátorech 24 V $I_C = U_{+24V}/R_8 = 24/10000 = 0,0008 \text{ A}$. Z uvedeného lze dále spočítat pro nejnižší velikost H_{21E} minimální potřebnou velikost proudu báze $I_B = I_C/H_{21E} = 0,0008/120 = 7 \mu\text{A}$. Pro praktický návrh volíme velikost proudu děliče minimálně $10 \times$ větší než je velikost proudu báze I_B . Proud děličem volíme $20 \cdot I_B = 20 \cdot 7 \cdot 10^{-6} = 140 \mu\text{A}$. Zvolená velikost proudu děličem zaručuje, že bude dělič dodávat spolehlivě proud do báze tranzistoru a nebude dělič nijak významně omezovat. Z uvedeného proudu děličem spočítáme velikost odporů R_6 a R_7 . Celkový odpor $R_6 + R_7 = U_{\text{Log1}}/I_{R_6+R_7} = 5,6/0,00014 = 40000 \Omega$ a velikost R_7 vypočítaná z odvozeného vztahu je $R_7 = (U_{R_7}/U_{\text{Log1}}) \cdot (R_6 + R_7) = (0,8/5,6) \cdot 40000 \cong 5,7 \text{ k}\Omega$. Odpor R_6 se pak spočítá například z rozdílu odporů $R_6 = (R_6 + R_7) - R_7 = 40000 - 5700 \cong 34 \text{ k}\Omega$. Pro praktickou realizaci použijeme hodnoty odporů nejbližší z řady E24, to znamená $R_7 = 5,6 \text{ k}\Omega$ a $R_6 = 33 \text{ k}\Omega$.

Odporů R_9 , R_{10} a dioda D_6 tvoří spolu s diodami ve struktuře budiče IO2 ochranu vstupu In proti zápornějšímu napájecímu napětí oproti napětí -8 V , které je na kolektoru $T1$ při jeho otevření. Dioda D_5 tvoří naopak ochranu pro případ, kdyby se před vstupem In objevilo napětí vyšší, než napájecí. Protože vstup In zatěžuje kolektor $T1$ pouze minimálně proudem cca $10 \mu\text{A}$, je velikost odporů R_9 a R_{10} zvolena $10 \text{ k}\Omega$ a prakticky ověřena (úbytek napětí na R_9 , R_{10} je $U_{R_9+R_{10}} = I_{In} \cdot (R_9 + R_{10}) = 10^{-5} \cdot 20000 = 0,2 \text{ V}$, což je hodnota v daném případě zanedbatelná).

Činnost celé DKS je popsána pomocí tabulky Tab. 4-1.

Vstupy			Výstupy	
A(t)	B(t)	PWM	PWM-A	PWM-B
1	1		1	0
1	0		T2 zavřen	T1 zavřen
0	1		T2 zavřen	T1 spíná v rytmu PWM
0	0		T2 spíná v rytmu PWM	T1 zavřen
0	0		0	1
Zakázaný stav, T1 a T2 spínají současně v rytmu PWM				

Tab. 4-1 Logické stavy na vstupech a výstupech DKS

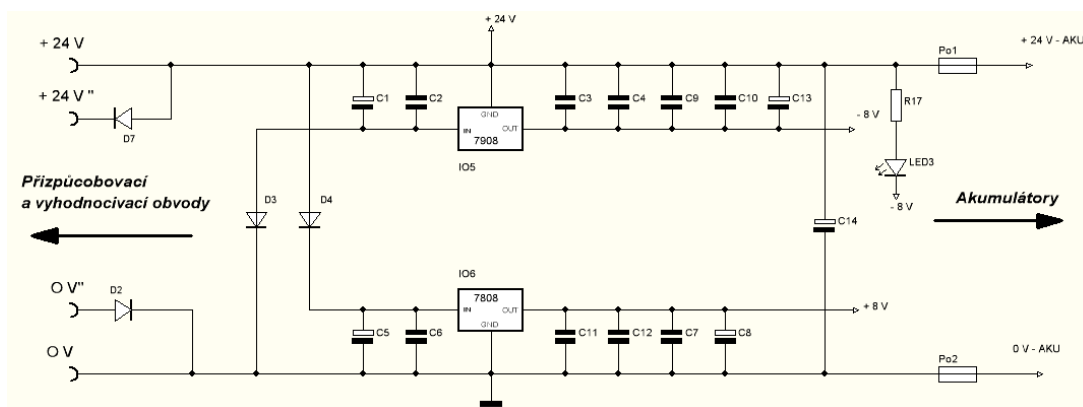
4.4.7 Napájecí obvody, Obr. 4.10

Napájecí obvody DKS jsou tvořeny dvěma běžnými integrovanými stabilizátory kladného +8 V (7808) [36] a záporného -8 V (7908) [37] napětí s výstupním proudem 1 A. Vstupy (In) a výstupy (Out) stabilizátorů jsou v souladu s doporučením výrobce blokovány kondenzátory příslušných velikostí co nejbližší u pouzder. Pro zamezení šíření poruchových signálů po napájecích spojích jsou dále tyto spoje blokovány dalšími kondenzátory. Diody D3 a D4 omezují činnost stabilizátorů a ostatních obvodů při připojení k akumulátorům v opačné polaritě.

Svítilná dioda LED3 spolu se sériovým odporem R17 tvoří předzátěž pro záporný stabilizátor napětí 7908. Pokud je funkce budiče IO2, jako jediného spotřebiče tvořícího zátěž stabilizátoru, blokována, je jeho proudová spotřeba velmi malá (desítky μA). Pro správnou funkci záporného stabilizátoru však musí být spotřeba minimálně 5 mA. Velikost proudu předzátěží je navržena na cca 8 mA. Při úbytku napětí na Led cca 2 V a výstupním napětí stabilizátoru cca 8 V je úbytek napětí na R17 cca 6 V. Velikost odporu pak je $R = U/I = 6/0,008 = 750 \Omega$. Jedná se o hodnotu vyráběnou v řadě E24.

Funkce diod D2 a D7 je trojí:

- při připojování k akumulátorům zajistí napájení DŘ při připojení proudových vodičů,
- po připojení napěťových vodičů vyloučí uzavření obvodů pro vyhodnocení rozdílu napětí přes DKS,
- zamezují napájení DŘ při přepólování napájecího napětí.



Obr. 4.10 Napájecí obvody DKS

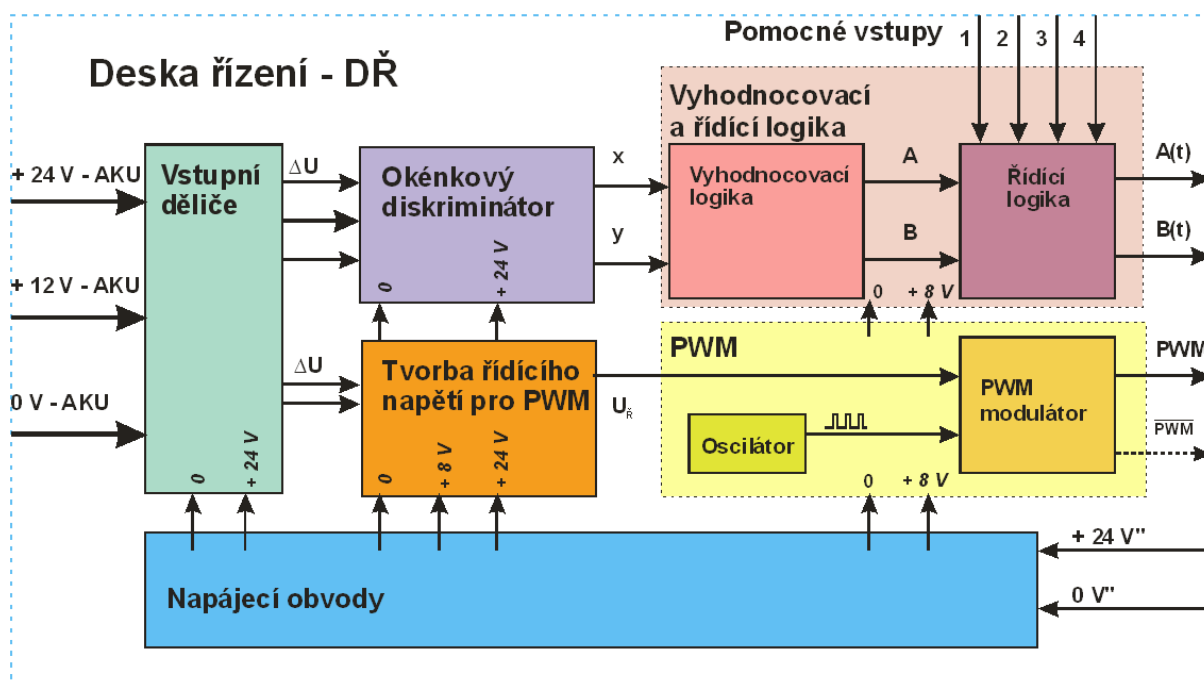
4.5 Deska řízení DŘ (řídící obvody)

Blokové schéma desky řízení DŘ je u vedeno na Obr. 4.11. Řídící obvody soustředěné na desce řízení DŘ lze rozdělit do několika funkčně samostatných, více či méně provázaných

částí. Z hlediska vnějšího funkčního pohledu je DŘ koncipována tak, aby svými výstupy byla kompatibilní s DKS popsanou v předchozí kapitole případně jejími vývojovými variantami.

Základní funkční části jsou:

- Okénkový diskriminátor a vstupní dělič
- Vyhodnocovací a řídicí logika záměrně z pohledu funkce a popisu rozdělaná na:
 - přizpůsobovací obvody
 - vyhodnocovací logiku
 - řídicí logiku
- Obvody PWM tvoří:
 - obvod tvorby řídicího napětí pro PWM
 - generátor pravoúhlého průběhu
 - PWM modulátor
- Napájecí obvody



Obr. 4.11 Blokové schéma desky řízení DŘ

4.5.1 Okénkový diskriminátor a vstupní dělič

Zapojení okénkového diskriminátoru je tvořeno dvěma invertujícími komparátory Obr. 4.12 [4]. Umožňuje rozlišovat úrovně napětí na vstupech komparátorů pomocí kombinace logických úrovní na jejich výstupech. Komparátory jsou tvořeny operačními zesilovači OZ1A a OZ1B (jedno pouzdro). Odporů R6, R7 a R8 tvoří svým dělicím poměrem

zdroj referenčních napětí U_A a U_B komparátorů. Vstupní napětí přivedené na vstup U_i je odvozeno od poloviny napětí akumulátorů +12 V-AKU a přes odpor R_1 přivedeno na invertující vstupy OZ1A a OZ1B. Indikace stavů komparátoru je provedena pomocí LED1, LED2 a LED3. Z hlediska funkce nemá indikace žádný význam. V zapojení je však určena jako informace uživateli o stavu akumulátorů, případně o funkci balancéru.

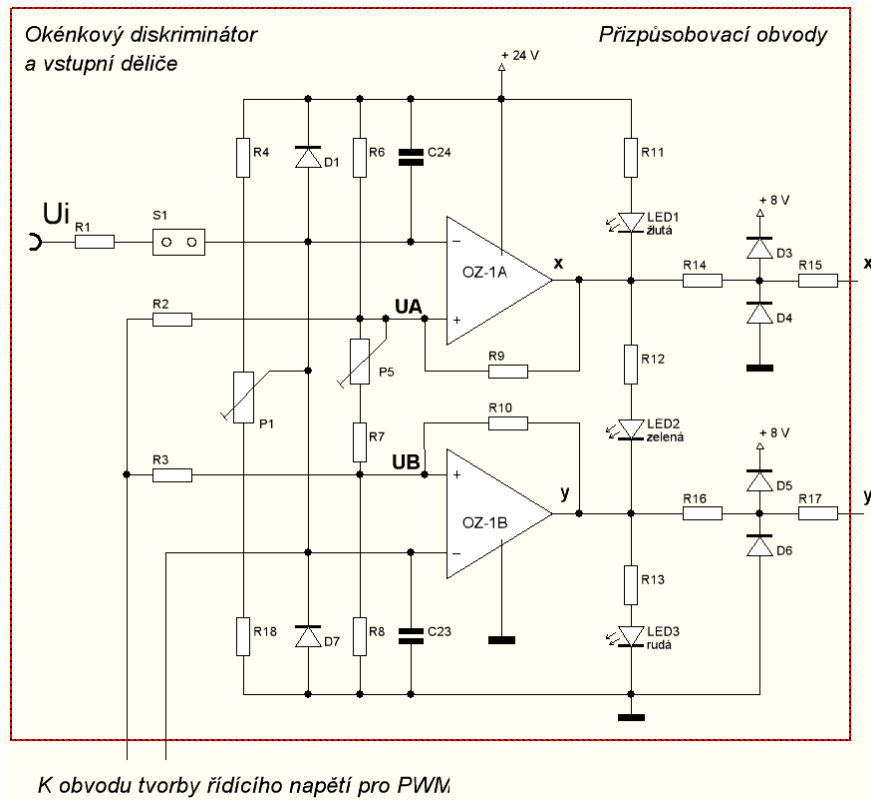
K neinvertujícím vstupům je dále připojen dělič napětí R_4 , R_5 s trimrem P_1 . Obvod je určen jako pomocný pro oživení vzorku a zkoušení napěťových úrovní, při kterých komparátory přecházejí z jedné úrovně do druhé bez připojených akumulátorů. Pokud jsou připojeny akumulátory, vliv děliče se působením velmi tvrdého zdroje napětí (akumulátor) neuplatní. Pro zavedení mírné hystereze je zavedena kladná zpětná vazba tvořená odpory R_9 , R_{10} . Prakticky byla odzkoušena a použita hodnota 4,7 M Ω .

Vyhodnocovací úrovně napětí pro funkci diskriminátoru jsou odvozeny od požadavku na rozdíl napětí na akumulátorech $\Delta U_{AKU} < 0,5$ V. Od uvedené hodnoty vychází výpočet referenčních úrovní napětí a hodnot odporů R_6 , R_7 a R_8 . Z uvedeného zapojení a z požadavku na souhlas napětí na akumulátorech lze bez dalších výpočtů napsat, že hodnoty odporů R_6 a R_8 budou shodné. Jejich velikosti můžeme opět bez dalších výpočtů zvolit tak, aby pokud možno nezatěžovali akumulátory a zároveň svedly případné poruchové proudy ze vstupů komparátorů. Volíme $R_6 = R_8 = 10$ k Ω . Pokud by byl $R_7 = 0$ Ω , pak by sériová kombinace R_6 , R_8 zatěžovala akumulátory při maximálním teoretickém napětí 32 V proudem $I = U_{24AKU} / (R_6 + R_8) = 32 / (10000 + 10000) = 1,6$ mA. Ztrátový výkon by byl $P = U_{24AKU} \cdot 0,0016 = 32 \cdot 0,0016 = 0,512$ W na obou odporech.

Pro výpočet velikosti odporu R_7 a potvrzení velikosti R_8 (respektive shody R_6 , R_8) lze následně použít vztahy uvedené v literatuře [4]. Pro výpočet hodnoty R_7 a potvrzení shody odporů R_6 a R_8 provedeme rekapitulaci požadavků a následující úvahy:

- jmenovité napětí dvou sériově zapojených akumulátorů $U_{24-AKU} = 24$ V
- rozdíl napětí na akumulátorech $\Delta U_{AKU} < 0,5$ V
- rozhodovací úroveň U_A pro řízení A (jeden akumulátor) 11,75 V
- rozhodovací úroveň U_B pro řízení B (druhý akumulátor) 12,25 V
- volíme prozatím pouze $R_6 = 10$ k Ω , výpočtem potvrdíme hodnotu $R_8 = 10$ k Ω
- vypočteme velikost R_7 pro rozdíl napětí $\Delta U_{AKU} = 0,5$ V
- vypočteme velikost R_7 pro jiné rozdíly napětí, např. $\Delta U_{AKU} = 0,1$ V

- výpočty ověříme měřením
- pro identifikaci zavedeme napětí U_A a U_B na neinvertujících vstupech OZ1A a OZ1B jako hodnoty komparačního napětí (viz. Obr. 4.12)



Obr. 4.12 Schéma okénkového diskriminátoru, vstupních děličů a přizpůsobovacích obvodů

Pro výpočet budou použity následující dva převzaté vztahy [4] s indexy které odpovídají schématu Obr. 4.12,

$$\text{pro } U_i < U_B < U_A \text{ je } U_B = U_{24AKU} \cdot R_8 / (R_6 + R_7 + R_8), \quad (4-5)$$

$$\text{pro } U_B < U_i < U_A \text{ je } U_A = U_{24AKU} \cdot (R_7 + R_8) / (R_6 + R_7 + R_8), \quad (4-6)$$

Řešíme soustavu rovnic:

$$U_B \cdot R_6 + U_B \cdot R_7 + U_B \cdot R_8 = U_{24AKU} \cdot R_8$$

$$U_A \cdot R_6 + U_A \cdot R_7 + U_A \cdot R_8 = U_{24AKU} \cdot R_7 + U_{24AKU} \cdot R_8$$

Po dosazení pro rozdíl napětí $\Delta U_{AKU} = 0,5 \text{ V}$

$$11,75 \cdot 10000 + 11,75 \cdot R_7 + 11,75 \cdot R_8 = 24 \cdot R_8$$

$$12,25 \cdot 10000 + 12,25 \cdot R_7 + 12,25 \cdot R_8 = 24 \cdot R_7 + 24 \cdot R_8$$

Řešením soustavy dostaneme výslednou velikost $R8 = 10 \text{ k}\Omega$, to potvrzuje úvahu o shodě $R6$ a $R8$ a hodnotu $R7 = 425,5 \Omega$. Pro splnění podmínky pro rozdíl napětí $\Delta U_{AKU} < 0,5 \text{ V}$ musí být hodnota odporu $R7$ menší, než hodnota vypočtená. Pro správnou funkci je nezbytně nutné, aby rozdíl ve velikosti hodnot odporů $R6$ a $R8$ byl co nejmenší. Při napětí středu akumulátorů $+12 \text{ V}$ - AKU přesně 12 V bude při odchylce v hodnotách $0,2 \%$ odchylka napětí $12 \cdot 0,2/100 = 0,024 \text{ V}$. Tuto hodnotu lze považovat pro daný účel za přijatelnou.

Přepočtem podmínky pro rozdíl napětí $\Delta U_{AKU} = 0,1 \text{ V}$ je hodnota $R7 = 83 \Omega$. Pro potřeby zkoušení funkčnosti bude namísto odporu $R7$ použita sériová kombinace odporu a trimru o celkové hodnotě cca 500Ω . V Tab. 4-2 jsou uvedeny stavy výstupů OZ1A, OZ1B a LED1 až LED3 v závislosti na velikosti vstupního napětí U_i . Z tabulky je patrné, že svícení jednotlivých LED odpovídá stavu napětí na akumulátorech.

Vstupy		Výstupy				
Napětí na AKU	Napětí na konparátorech	OZ1A	OZ1B	LED1 žlutá	LED2 zelená	LED3 rudá
$U_{AKU2} > U_{AKU1}$	$U_i > U_A > U_B$	0	0	svítí	x	x
$U_{AKU2} = U_{AKU1}$	$U_A > U_i > U_B$	1	0	x	svítí	x
$U_{AKU2} < U_{AKU1}$	$U_A > U_B > U_i$	1	1	x	x	svítí

Tab. 4-2 Logické stavy na výstupu okénkového diskriminátoru

4.5.2 Vyhodnocovací a řídicí logika

Obvody vyhodnocovací a řídicí logiky plní několik funkcí.

4.5.2.1 Přizpůsobovací obvody, Obr. 4.12

Přizpůsobovací obvody přizpůsobují napěťové úrovně výstupních napětí OZ1A (výstup x) a OZ1B (výstup y) k logickým úrovním obvodů hradel NAND v provedení CMOS napájených napětím 8 V . Pro přizpůsobení je určena vždy kombinace $R14, D3, D4, R15$ a $R16, D5, D6, R17$. Jejich funkce je obdobná jako v případě přizpůsobovacích obvodů DKS.

Popis funkce pro výstup OZ1A.

Výstup x OZ1A = Log0. Log0 se přenese z výstupu OZ1A přes odpory $R14, R15$ na vstupy hradel NAND.

Výstup x OZ1A = Log1, tomu odpovídá přibližně napětí obou akumulátorů $+24 \text{ V}$ - AKU. Pokud bychom uvedené napětí přivedli přímo na vstupy hradel NAND napájených napětím $+8 \text{ V}$, tekl by do vstupů proud odpovídající velikosti výstupního odporu OZ1A.

Proud by se uzavíral přes diodu ve struktuře vstupu hradla NAND k napětí +8 V. To by vedlo k poškození diody a vstupu. Při použití kombinace R14, D3, D4, R15 je proud dodávaný výstupem omezen odporem R14 a před diodu D3 přiveden na napětí +8 V. To způsobí, že napětí na vstupech hradel NAND bude oproti napájecímu napětí větší pouze o úbytek napětí na D3 v propustném směru, to je o cca 0,7 V. Toto je již napětí, které lze bez obav na vstupy hradel přivést. Odpor R15 spolu s diodou ve struktuře vstupu hradla NAND orientovanou stejně jako D3 dále omezuje velikost proudu a napětí na vstupu hradel NAND a tvoří druhý a funkčně shodný obvod jako R14, D3.

Dioda D4 tvoří ochranu pro případ, kdyby z nějakého důvodu, např. při přechodovém ději při zapnutí nebo vypnutí bylo napětí na výstupu OZ1A menší, než napětí odpovídající $\text{Log}0$ na vstupech hradel (v podstatě záporné).

Funkce přizpůsobovacího obvodu na výstupu y OZ1B s kombinací R16, D5, D6, R17 je naprosto shodná s řešením výstupu x (Obr. 4.13).

4.5.2.2 Vyhodnocovací logika, Obr. 4.13

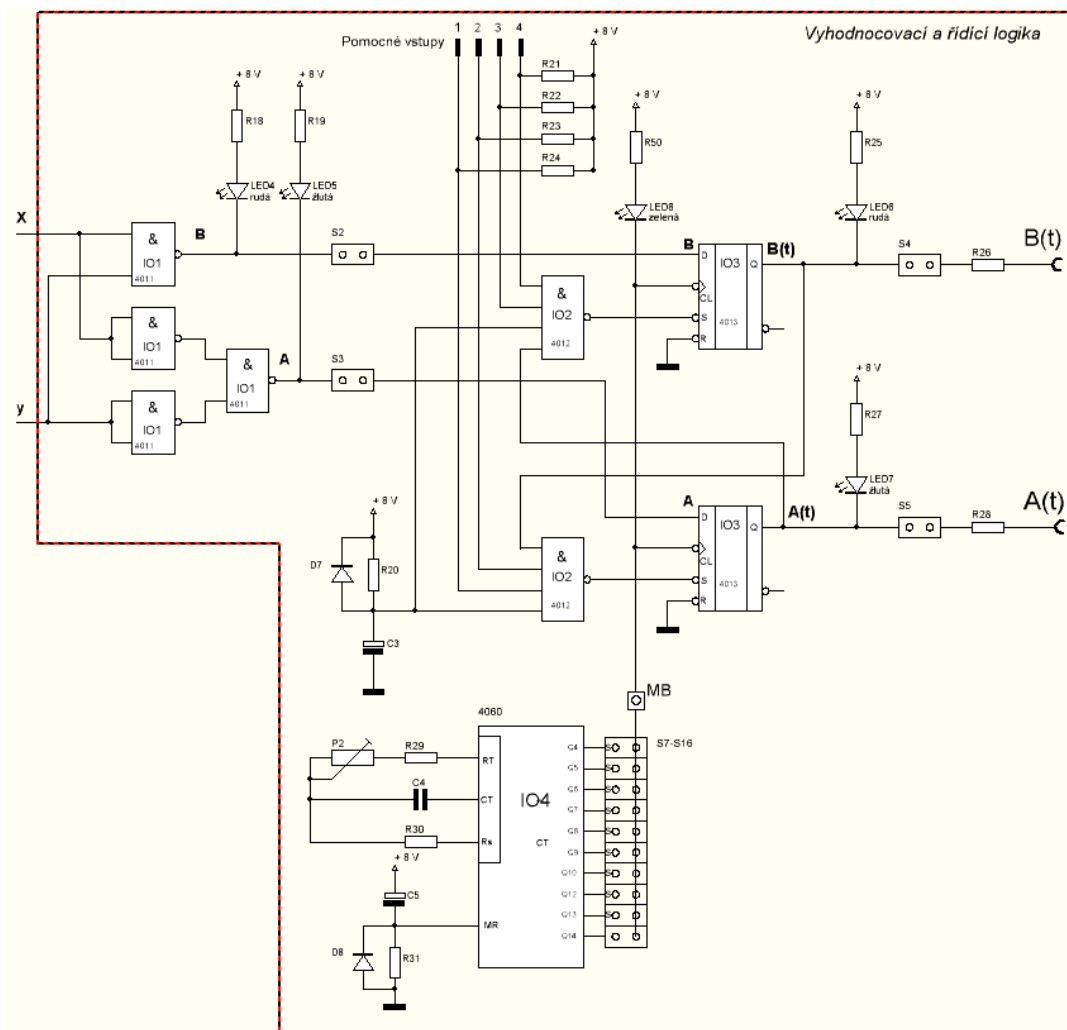
Obvod vyhodnocovací logiky upravuje kombinace logických úrovní z výstupů x a y komparátorů OZ1A a OZ1B na kombinaci na výstupech označenou A a B vhodnou pro řízení spínání tranzistorů výkonového stupně na DKS. Obvod je tvořen čtveřicí hradel NAND [29], [5]. Na výstupech A a B jsou pro indikaci stavů při vývoji zapojeny nízkopříkonové diody LED4 a LED5. Pro výpočet sériových odporů R18 a R19 platí stejná pravidla jako v případě R4 a R5 pro LED1 a LED2 na DKS. Protože je použito stejné napájecí napětí, jsou i zde použity stejné hodnoty odporů 4,7 k Ω .

Operace s hodnotami x a y lze vyjádřit pomocí Tab. 4-3 a zapsat pomocí Booleovi algebry ve tvaru $A = \overline{x \cdot y}$ a $B = \overline{\overline{x \cdot y}}$.

Vstupy		Výstupy			
x	y	$A = \overline{x \cdot y}$	$B = \overline{\overline{x \cdot y}}$	LED4 rudá	LED5 žlutá
0	0	1	0	svítí	x
0	1	1	1	x	x
1	0	1	1	x	x
1	1	0	1	x	svítí

Tab. 4-3 Logické stavy vstupů a výstupů obvodů vyhodnocovací logiky

Obvod vyhodnocovací logiky lze z důvodu oživení oddělit od obvodu řídicí logiky pomocí propojek S2, S3.



Obr. 4.13 Schéma obvodů vyhodnocovací a řídicí logiky

4.5.2.3 Řídicí logika

Obvody řídicí logiky zlepšují vlastnosti a umožňují sledování chování celého balancéru jak při vývoji, tak při praktickém použití. Funkce obvodu je následující:

- přenos logických úrovní A a B na výstup DŘ v diskretních okamžicích - A(t), B(t),
- možnost změny doby trvání úrovní A(t) a B(t) na výstupu DŘ,
- vyloučení zakázaného stavu – viz. Tab. 4-1, kdy je na výstupu A(t) = 0 a současně na výstupu B(t) = 0,
- vložení časové mezery při přechodu řízení výkonového stupně na DKS z jednoho výkonového tranzistoru na druhý, např. z T1 na T2,
- reset obvodů při zapnutí,
- vytvoření podmínek pro připojení vnějších vyhodnocovacích obvodů, například elektronické proudové a tepelné ochrany.






Funkce obvodu D (CMOS4013) [31], [5]

Přenosu logických úrovní A a B na výstup DŘ v diskretních okamžicích - A(t), B(t) je prováděn synchronně pomocí klopných obvodů D (4013). Znamená to, že změna logických úrovní A, B se na výstupy Q přepíše vždy s náběžnou hranou zdroje hodinových impulsů na vstupu CL obvodů D (4013) generovaných hodinovým obvodem CMOS4060.

Nastavovací vstup S (Set) obvodu 4013 logickou úrovní Log1 nastavuje na výstupech Q logickou úroveň Log1, která blokuje činnost tranzistorů T1 a T2 výkonové části na DKS. K nastavení Log1 dochází:

- Při zapnutí na obou výstupech Q (A(t), B(t)) – ochrana proti otevření obou tranzistorů T1 a T2 výkonové části na DKS vlivem přechodového jevu.
- Při přechodu jednoho z výstupů Q (A(t), B(t)) do Log0 - po celou dobu trvání Log0 na jednom z výstupů Q drží na druhém výstupu Q úroveň Log1 a tím blokuje činnost druhého z tranzistorů T1 nebo T2 výkonové části na DKS (zamezuje vzniku zakázaného stavu – viz. Tab. 4-1).
- Při příchodu Log0 na jeden z pomocných vstupů pro připojení vnějších vyhodnocovacích obvodů 1, 2 nebo 3, 4 pro jeden nebo druhý obvod D (4013).

Vstup nulování R (Reset) obvodu D (4013) je trvale připojen na Log0 a pro činnost obvodu není využit. Využívané logické stavy a přechody obvodů D (4013) jsou zobrazeny v Tab. 4-4.

D	Vstupy			Výstup Q	
	CL	S	R	Q _{n-1}	Q _n
1		0	0	0	1
1		0	0	1	1
0		0	0	0	0
0		0	0	1	0
x		0	0	x	Q _{n-1} (zůstává)
x	x	1	0	0	1
x	x	1	0	1	1

Tab. 4-4 Funkce obvodu CMOS4013

Na výstupech Q jsou opět připojeny kontrolní nízkopříkonové diody LED6, LED7. Pro výpočet předřadných odporů R25, R27 platí stejná pravidla jako ve všech předchozích případech. Proto R25 = R27 = 4,7 kΩ.

Pro omezení vlivu rozdílu napětí +8 V na DR̄ a +8 V na DKS jsou vloženy do výstupů odpory R26, R28. Pokud by byly použity společné napájecí obvody +8 V, odpory by neplnily žádnou funkci a na jejich místě by byly osazeny propojky.

Funkce čtyřvstupových hradel NAND (CMOS4012) [30], [5]

Dvě čtyřvstupová hradla NAND (4012) vyhodnocují vstupní logické úrovně pro nastavovací vstupy S. Na vstupy S přivedou úroveň Log0, pokud jsou na všech čtyřech vstupech úrovně Log1. Ve všech jiných případech se na výstupu a příslušném vstupu S objeví úroveň Log1 – výstup Q příslušného obvodu D je potom trvale v Log1 a činnost příslušného tranzistoru T1 nebo T2 výkonové části na DKS je blokována.

Dva ze vstupů obvodů NAND (4012) jsou připojeny přes odpor 100 kΩ ke kladnému napájecímu napětí a jsou trvale ve stavu Log1.

Jeden ze vstupů hradel je vždy připojen k resetovacímu obvodu tvořenému kombinací R20, C3, D7. Kondenzátor C3 drží přibližně po dobu τ po zapnutí (připojení k akumulátorům) na jednom vstupu hradel úroveň Log0. Po tuto dobu jsou na výstupech Q (A(t), B(t)) obvodů D úrovně Log1, které blokují činnost tranzistorů T1 a T2 výkonové části na DKS. Dioda D7 vybíjí kondenzátor C3 po odpojení od akumulátorů. Tím chrání vstupy hradel proti poškození při vybíjení C3 přes diodu ve struktuře vstupu.

Pro výpočet kombinace R20, C3 volíme:

- $\tau = 1 \text{ s}$, $R20 = 100 \text{ k}\Omega$
- ze vztahu $\tau = R \cdot C$ (4-7)

vypočteme velikost C3, $C3 = \tau/R20 = 1/100000 = 10 \mu\text{F}$.

Jako diodu D7 volíme jeden z nejběžnějších typů např. 1N4148. Dioda vyhoví napěťově i proudově. Využívané logické stavy hradel NAND (4012) jsou zobrazeny v Tab. 4-5. Logické stavy odpovídají Booleovskému výrazu $y = \overline{a \cdot b \cdot c \cdot d}$ kde a, b, c, d jsou jednotlivé vstupy a y je výstup.

Vstupy				Výstup	Popis činnosti
Pomocné vstupy	Blokování	reset	(vstup S 4013)		
0	0	0	0	1	Zakazuje činnost obvodu D
0	0	0	1	1	
0	0	1	0	1	
0	0	1	1	1	
0	1	0	0	1	
0	1	0	1	1	
0	1	1	0	1	
0	1	1	1	1	
1	0	0	0	1	
1	0	0	1	1	
1	0	1	0	1	
1	0	1	1	1	
1	1	0	0	1	
1	1	0	1	1	
1	1	1	0	1	
1	1	1	1	0	Povoluje činnost obvodu D

Tab. 4-5 Funkce obvodu CMOS4012

Funkce zdroje hodinového signálu (CMOS4060) [32], [5]



Obvod 4060 na svých výstupech Q3 až Q13 vytváří hodinové impulsy. Jejich kmitočet je odvozen od kmitočtu oscilátoru tvořeného kombinací R29, R30, P2, C4. Kmitočet na výstupech Q3 až Q13 je podílem kmitočtu oscilátoru 2^4 až 2^{14} . Jeden z nich je vždy přiváděn na vstupy CL obvodů D. Pro potřeby vývoje jsou k dispozici všechny výstupy. Jejich přepínání se provádí pomocí „Jumperu“. Po připojení k napájecímu napětí je zajištěn reset obvodu kombinací R31, C5, D8. Po připojení k napájecímu napětí drží kondenzátor C3 přibližně po dobu τ na vstupu MR úroveň log1. To způsobí, že na všech výstupech Q3 až Q13 bude po dobu τ úroveň log0 bez ohledu na funkci oscilátoru. Zároveň je po dobu τ opět blokována funkce obvodů D. Logické stavy obvodu 4060 jsou zobrazeny v Tab. 4-6.

Výpočet R31, C5 se provede stejným způsobem jako u obvodu reset hradel NAND (R20, C3). Protože je zvolena stejná časová konstanta $\tau = 1$ s a velikost R31 = 100 k Ω , bude i velikost C5 = 10 μ F.

Výpočet kombinace R29, R30, P2, C4 oscilátoru:

Kmitočet oscilátoru f_{osc} odvodíme od maximálního kmitočtu hodinových impulsů, který volíme $f_{CLmax} = f_{Qmax} = f_{Q3} = 25$ Hz. Tomu odpovídá podle vztahu $T = 1/f$ minimální délka periody $T_{CLmin} = T_{Qmin} = T_{Q3} = 0,04$ s. Pro výstup Q3 je dělicí poměr $n_3 = 2^4$, takže $f_{osc} = f_{Qmax} \cdot n_3 = 25 \cdot 2^4 = 400$ Hz. Minimální kmitočet na výstupu Q13 s dělicím poměrem $n_{13} = 2^{14}$, pak bude $f_{CLmin} = f_{Qmin} = f_{Q13} = f_{osc} / n_{13} = 400 / 2^{14} \cong 0,0244$ Hz. Tomu odpovídá

délka periody $T_{CLmax} = T_{Qmax} = T_{Q13} = 40,96$ s. Na výstupech budou k dispozici kmitočty (periody) uvedené v Tab. 4-7.

Vstupy		Výstupy
RS	MR	Q_n
	0	beze změny
	0	čítá
x	1	0

Tab. 4-6 Funkce hodinového obvodu CMOS4060

Výstup	Výstupy časovače 4060 při $f_{osc} = 400$ Hz										
		Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	Q_7	Q_8	Q_9	Q_{10}	Q_{12}	Q_{13}
Dělicí poměr	n	2^4	2^5	2^6	2^7	2^8	2^9	2^{10}	2^{11}	2^{13}	2^{14}
Kmotočet	f[Hz]	25	12,5	6,25	3,125	1,563	0,781	0,390	0,195	0,0488	0,0244
Perioda	T[s]	0,04	0,08	0,16	0,32	0,64	1,28	2,56	5,12	20,48	40,96

Tab. 4-7 Dostupné kmitočty (časy) na výstupech obvodu CMOS4060

Volíme velikost kondenzátoru $C4 = CT = 10$ nF. Velikost sériové kombinace $P2 + R29 = RT$ vypočítáme ze vztahu převzatého z literatury [5] pro

$$f_{osc} = 1/(2,3 \cdot R_T \cdot C_T). \quad (4-8)$$

Dosadíme do odvozeného vztahu

$$R_T = 1/(2,3 \cdot f_{osc} \cdot C_T) = 1/(2,3 \cdot 400 \cdot 10^{-8}) \cong 109 \text{ k}\Omega = P_2 + R_{29}.$$

Z vypočítané sériové kombinace volíme hodnotu odporu $R29 = 47 \text{ k}\Omega$ a trimru $P2 = 100 \text{ k}\Omega$. Z uvedené volby vyplývá rozsah nastavení velikosti odporu 91 až 124 k Ω . Uvedený rozsah umožňuje nastavení kmitočtu oscilátoru 400 Hz. Kmotočet však není pro funkci obvodu nijak kritický, bylo by možno vybrat místo sériové kombinace $P2, R29$ libovolnou nejbližší hodnotu z řady E24, např. 110 k Ω . Výsledná přesnost kmitočtu by pak byla dána přesností hodnot použitého odporu a kondenzátoru $C4$. Na místě $C4$ bude použit kondenzátor s větší teplotní stabilitou, např. fóliový.

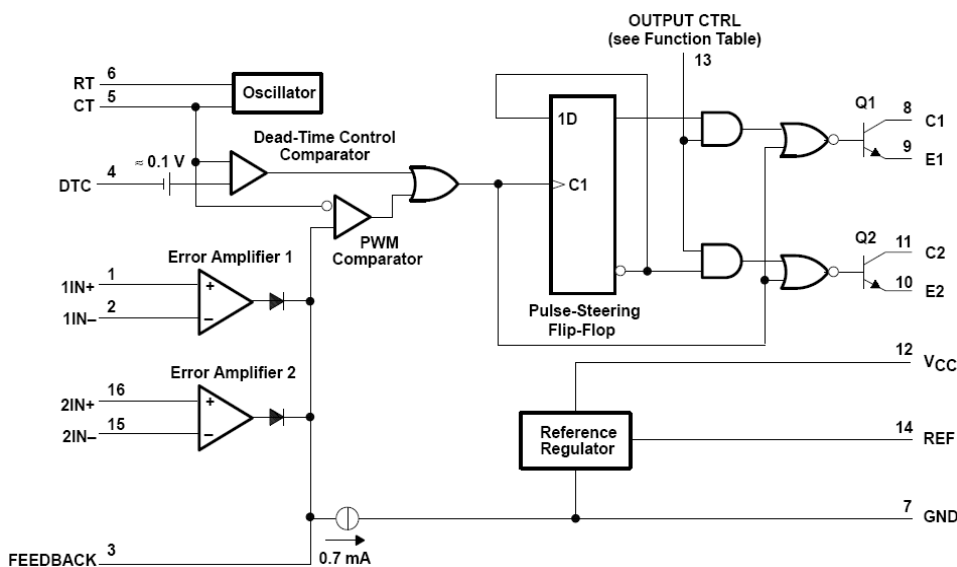
Provedeme porovnání vypočítaných hodnot s katalogovými údaji doporučenými výrobcem obvodu 4060. Vypočítané hodnoty $10 \text{ k}\Omega < P2 + R29 = RT < 1 \text{ M}\Omega$ i kondenzátoru $CT = C4 > 100 \text{ pF}$ spadají do intervalů doporučených výrobcem. Odpor $R30$ omezuje vliv kapacity vstupu RS . Velikost odporu musí splňovat podmínku $R30 \gg P2 + R29 = RT$. Na základě uvedené podmínky volíme hodnotu $R30 = 470 \text{ k}\Omega$.

Velikost P2 + R29, C4 a R30 musí být ověřena především z pohledu spolehlivého „nasazování“ oscilací oscilátoru.

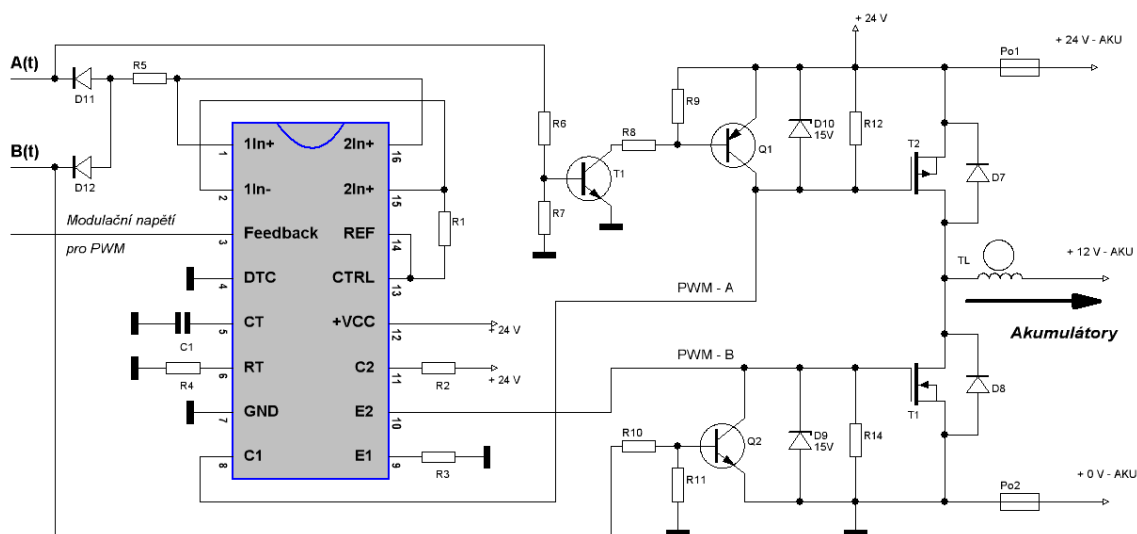
4.5.3 Obvody PWM

PWM obvody slouží k řízení velikosti dodávaného proudu pomocí pulsně šířkové modulace (Pulse-Width Modulation). Pro různé aplikace zdrojů je komerčně vyráběna celá řada speciálních integrovaných obvodů. Pro potřeby balancéru byly prováděny experimenty s některými z nich, např. s obvodem TL494 [27] běžně používaným v napájecích zdrojích osobních počítačů (PC). Výsledky však vedly k poznání, že pro uvedenou aplikaci bude vhodnější navrhnout PWM obvod přímo pro potřeby balancéru.

Obvod TL494 byl experimentálně použit v atypickém zapojení uvedeném na Obr. 4.15. Obr. 4.14 zobrazuje vnitřní blokové schéma obvodu. Výstupní tranzistory obvodu TL494 byly ve vzorku použity k buzení tranzistorů T1 a T2 (DKS). Jejich činnost byla blokována pomocí výstupů A(t), B(t), takže svoji funkci plnil vždy právě jeden z nich. Pro řízení PWM byl použit k plné spokojenosti vstup Feedback. Obvod obsahuje vlastní oscilátor. Přes jinak dobré výsledky s obvodem TL494 je hlavním důvodem nevhodnosti možnost řízení PWM v rozmezí pouze 0 až 50 %. Pro potřeby balancéru je však potřeba pro zvýšení účinnosti řídit PWM v rozmezí větším, alespoň 0 až 60 %.



Obr. 4.14 Vnitřní zapojení obvodu TL494



Obr. 4.15 Schéma DKS s obvodem TL494

Funkce obvodů PWM spočívá v řízení (omezování) dodávaného proudu v případě, kdy se rozdílové napětí akumulátorů blíží hodnotě, která je považována za nulovou, to znamená, že ještě není v rozmezí napětí okénkového diskriminátoru (např. $\Delta U_{AKU} < 0,5 \text{ V}$), který vyhodnotí jejich shodu a blokuje činnost T1 i T2 na DKS. Teoreticky by bylo možno uvedené řízení zcela vypustit a dodávat proud po celou dobu v maximální výši při použití impulsů s maximální použitelnou střídou, např. 60 %, při experimentech se však projevila určitá setrvačnost, která způsobovala překmitávání napětí na akumulátorech a to především při shodném odběru z obou akumulátorů.

Z výše uvedených důvodů byl navržen vlastní obvod pro řízení PWM. Ten se skládá ze základních funkčních celků:

- PWM modulátoru,
- generátoru pravoúhlého průběhu,
- obvodu tvorby řídicího napětí pro PWM.

4.5.3.1 PWM modulátor

Pro realizaci byl použit běžně dostupný časovač 555 [26] zapojený v souladu s katalogovými údaji jako PWM modulátor. Pro jeho realizaci bylo použito zapojení s externím zdrojem konstantního kmitočtu pravoúhlého průběhu uvedené na Obr. 4.16 včetně teoretických průběhů výstupních napětí. Jedinými obvodovými součástkami uvedeného zapojení je odpor R_{43} (R_A) a kondenzátor C_{22} (C). Jejich velikosti budou navrženy v závislosti

na velikosti zvoleného kmitočtu a budou odpovídat hodnotám vypočítaným v následujícím odstavci pro $R = R_A + R_B$, kde $R_B = 0 \Omega$ a zvolený C .

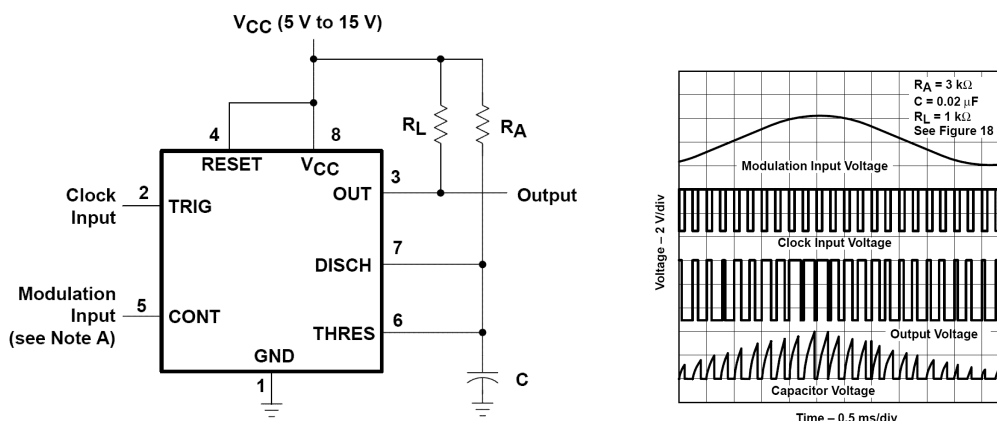
Pro rozsah řízení PWM je důležitá střída zdroje konstantního pravoúhlého průběhu napětí přiváděného na vstup TRIG a rozsah stejnosměrného napětí přiváděného na vstup CTRL.

Střída zdroje konstantního pravoúhlého průběhu na vstupu TRIG je rovna maximální střídě dosažitelné na výstupu PWM modulátoru a zároveň její mezí při řízení. Pro správnou funkci byla pro výpočet zvolena střída 60 %.

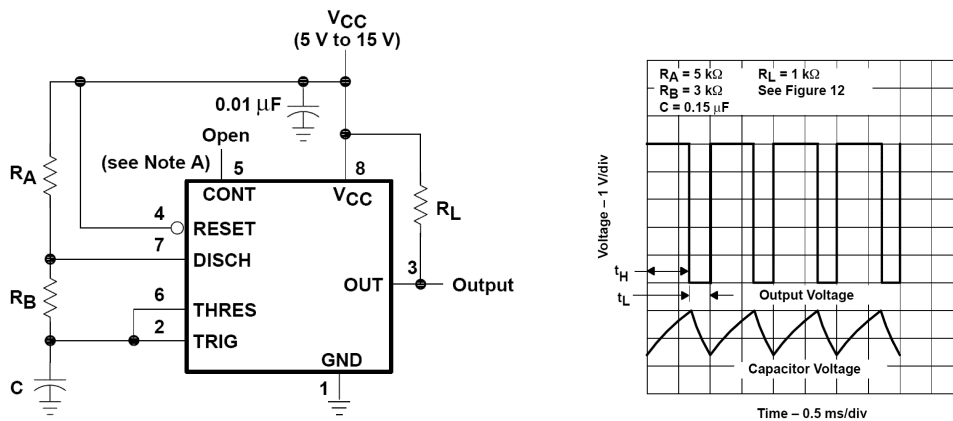
Stejnoseměrné napětí přiváděné na vstup CTRL umožňuje řízení PWM v rozsahu od 0 % do maxima (60 %) zdroje konstantního pravoúhlého průběhu přiváděného na vstupu TRIG. Pokud je velikost modulačního napětí na vstupu CONT 0 V, je na výstupu modulátoru průběh s maximální střídou (60 %). Při napětí, které odpovídá maximální rozhodovací úrovni (2/3 napájecího napětí) vstupů THRES modulátoru, se střída blíží 0 % (prakticky cca 4 %).

4.5.3.2 Generátor pravoúhlého průběhu

Jako zdroj hodinové frekvence byl opět použit časovač 555 [26], tentokrát v zapojení astabilního klopného obvodu. Doporučené zapojení a průběhy na výstupu obvodu Obr. 4.17 jsou opět převzaty z katalogu výrobce.



Obr. 4.16 Doporučené zapojení PWM modulátoru s obvodem 555 a teoretické průběhy napětí na jeho výstupu [26]



Obr. 4.17 Doporučené zapojení generátoru konstantního kmitočtu pro PWM modulátor průběhu napětí na jeho výstupech [26]

Pro výpočet výstupního kmitočtu a střidy výstupního signálu byly použity následující vztahy [26]:

- Výpočet R_A a R_B pro střidu výstupního signálu 60 % (60 % ~ 0,6 a 40 % ~ 0,4). Zvolená frekvence oscilátoru $f = 6 \text{ kHz}$ a kapacita kondenzátoru $C_{21} = C = 22 \text{ nF}$. Při výpočtu vyjdeme ze vztahů pro výpočet t_H a t_L .

$$t_H = 0,693 \cdot (R_A + R_B) \cdot C \quad (4-9)$$

$$t_L = 0,693 \cdot R_B \cdot C, \text{ kde} \quad (4-10)$$

$$R_{41} \cong R_B = t_L / 0,693 \cdot C \text{ a} \quad (4-11)$$

$$R_{40} \cong R_A = t_H / (0,693 \cdot C) - R_B \quad (4-12)$$

Z kmitočtu f celkové doby periody

$$T = 1/f, \quad (4-13)$$

$$\text{kde } T = t_A + t_B \quad (4-14)$$

vypočteme časy t_L a t_H

$$T = 1/f = 1/6000 = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ s},$$

$$t_H = 0,6 \cdot T = 0,6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-4} = 10^{-4} \text{ s},$$

$$t_L = 0,4 \cdot T = 0,4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-4} = 6,6 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

Po dosazení

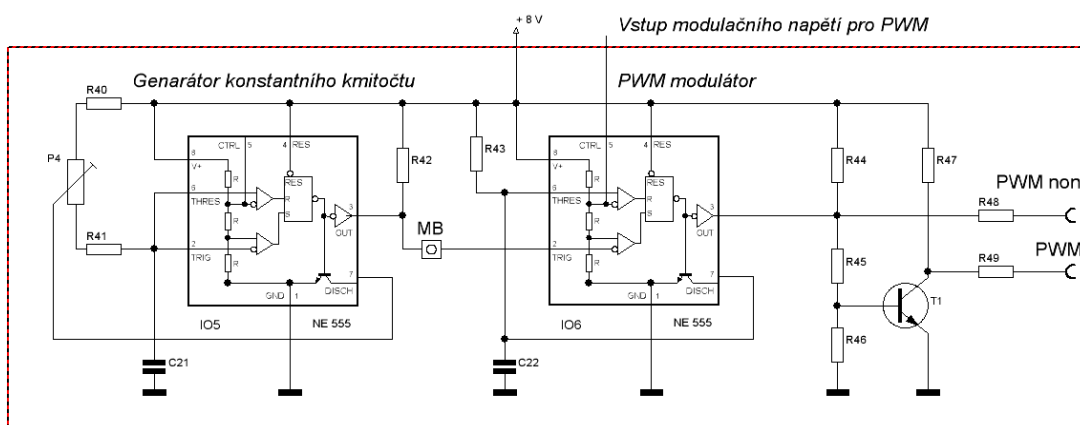
$$R_{41} \cong R_B = t_L / 0,693 \cdot C = 6,6 \cdot 10^{-5} / 0,693 \cdot 22 \cdot 10^{-9} = 4327 \Omega$$

$$R_{40} \cong R_A = t_H / (0,693 \cdot C) - R_B = 10^{-4} / (0,693 \cdot 22 \cdot 10^{-9}) - 4327 = 2256 \Omega$$

- Kontrola správnosti výpočtu ze vztahu pro výpočet frekvence f :

$$f \cong 1,44 / ((R_A + 2 \cdot R_B) \cdot C) = 1,44 / ((2256 + 2 \cdot 4327) \cdot 22 \cdot 10^{-9}) = 6000 \text{ Hz} \quad (4-15)$$

V reálném zapojení Obr. 4.18 je pro možnost nastavení střídy výstupního signálu zapojen mezi odpory R_{40} a R_{41} trimr P_4 . Hodnoty obou odporů a trimru volíme tak, aby se hodnota součtu odporů $R_{40} + R_{41} + P_4 \cong 6583 \Omega$ změnila pouze minimálně. Tomu odpovídají hodnoty z řady E24 $R_{40} = 1,2 \text{ k}\Omega$, $R_{41} = 3,3 \text{ k}\Omega$ a $P_4 = 2 \text{ k}\Omega$. Tomu odpovídá součet $R_{40} + R_{41} + P_4 \cong 6,5 \text{ k}\Omega$. Protože sledovanou veličinou z hlediska funkce je střída, nikoli kmitočet, nebude mít případná změna kmitočtu způsobená změnou velikostí odporů vliv na funkčnost. V případě potřeby bude možno provést změnu úpravou hodnot některého z odporů R_{40} a R_{41} .



Obr. 4.18 Schéma obvodů PWM modulace a generátoru konstantního kmitočtu

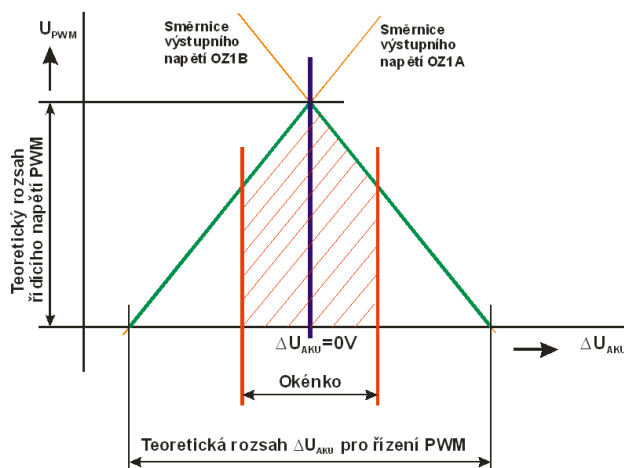
4.5.3.3 Obvod tvorby řídicího napětí pro PWM, Obr. 4.20

Úkolem „Obvodu tvorby řídicího napětí pro PWM“ je na svém výstupu vytvořit stejnosměrné napětí pro PWM modulaci. Z funkce PWM modulátoru vyplývá potřeba velikosti výstupního napětí nepřímo úměrná velikosti odchylky napětí na akumulátorech. To znamená, že při minimální odchylce napětí akumulátorů bude napětí maximální a opačně, při odchylce maximální se modulační napětí bude blížit nule. Teoretický průběh napětí je uveden na Obr. 4.19. Zeleně je zobrazen průběh napětí na výstupu obvodu tvorby řídicího napětí pro PWM. Červeně (šrafovaně) je vyznačen rozsah – „okénko“ odpovídající rozsahu ΔU_{AKU} . V tomto intervalu, kdy je rozdíl napětí na akumulátorech v požadovaných mezích, balancér přestane dodávat po příchodu hodinového impulsu na vstupy CL obvodů D (4013) proud. Modrou čarou je vyznačena teoretická absolutní shoda napětí na akumulátorech ($\Delta U_{AKU} = 0 \text{ V}$). Oba výkonové tranzistory DKS T1 i T2 jsou zavřeny.

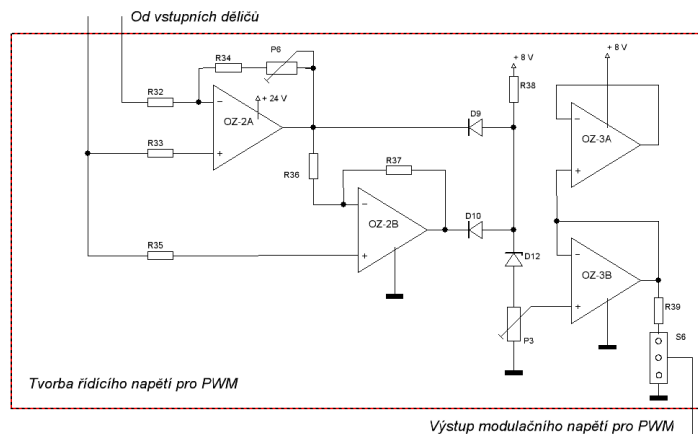
Z hlediska funkce by bylo zřejmě nepraktické řídit PWM modulaci v příliš širokém rozmezí. Při vyrovnání (shodě) velikosti proudu do zátěže a proudu dodávaného balancérem by mohlo dojít k rovnovážné poloze při odchylce napětí větší než je odchylka požadovaná. V tom případě by nebylo možno splnit požadavek na minimální požadované rozdílové napětí. Obvod plní svoji funkci při nejmenších odchylkách rozdílů napětí na akumulátorech, kdy by mohlo dojít vlivem diskretizace v obvodech D (4013) k překmitávání napětí na akumulátorech do opačných hodnot rozdílů v okamžicích, kdy je napětí vyhodnoceno jako shodné, ale působením stavu v obvodu D dojde ke zpoždění při vypnutí. Uvedený jev by se mohl vyskytovat především při vyrovnávání kapacit jinak shodně zatížených akumulátorů nebo při velmi malém odběru z jednoho akumulátoru.

Napětí pro „Obvod tvorby řídicího napětí pro PWM“ je odvozeno od děliče R6, R7 + P5 a R8, kde je pomocí odporů R2 a R3, kde $R_2 = R_3$, vytvořena polovina napětí akumulátorů. Uvedený způsob realizace zaručuje, že okénkový diskriminátor i obvod tvorby řídicího napětí pro PWM budou pracovat v téměř ideálním souběhu.

Pro tvorbu řídicího napětí pro PWM byl navržen obvod tvořený jedním invertujícím zesilovačem OZ2A [4] a invertujícím opakovačem OZ2B [4] se zesílením 1. Na jejich výstupu je vytvořen pomocí diod D9, D10, D12 odporu R38 a trimru P3 součtový obvod. Ten vytváří v závislosti na velikosti vstupního rozdílového napětí na výstupu symetrické stejnosměrné napětí, které dosahuje při nulovém rozdílovém napětí maxima a při určité kladné nebo záporné odchylce minima (nuly). Trimrem P3 lze nastavit rozsah hodnot modulačního napětí pro PWM. Pro zajištění definovaných poměrů vstupu CTRL PWM modulatoru IO6 je provedeno oddělení pomocí neinvertujícího opakovače OZ3B (velký vstupní a malý výstupní odpor, zesílení 1).



Obr. 4.19 Teoretický průběh napětí na výstupu obvodu tvorby řídicího napětí pro PWM



Obr. 4.20 Schéma obvodů řídicího napětí pro PWM

Citlivost celého obvodu je určena zeslením A invertujícího zesilovače OZ2A. Při nulové odchylce napětí na vstupu je výstupní napětí OZ2A rovno polovině napětí na akumulátorech. Při vzniku rozdílového napětí na vstupu je výstupní napětí lineární funkcí vstupního rozdílového napětí U_i se zápornou směrnicí. Strmost odpovídá velikosti zeslení A. Na výstupu invertujícího opakováče OZ2B je napětí se stejnou strmostí jako v případě invertujícího zesilovače OZ2A, ale s opačnou směrnicí.

Obě výstupní napětí jsou přes diody D9 a D10 spojena se společným bodem. Předpětí společného bodu je odvozeno od napětí +8 V spolu s vytvořenou sériovou kombinací R38, D12 a P3. Napětí +8 V omezuje maximální hodnotu napětí pro další obvody, které jsou jím napájeny. Přes diody D9 a D10 kopíruje napětí ve společném bodě hodnotu menšího výstupního napětí výstupů zesilovače OZ2A a opakováče OZ2B zvýšené o velikost napětí na přechodu diody (cca 0,7 V). Velikost napětí lze na vstupu (respektive výstupu) neinvertujícího opakováče OZ3B⁹ nastavit trimrem P3.

Při výpočtu zeslení invertujícího zesilovače OZ2A lze vyjít z požadavku na řízení PWM od hodnoty rozdílového napětí menšího než $\pm 0,5$ V, volíme hodnotu $\pm 0,3$ V. To znamená, že výstupy zesilovače OZ2A a opakováče OZ2B budou při rozdílovém napětí větším v saturaci, na výstupu bude nejnižší napětí, modulační signál bude mít maximální střidu. Pro rozdílové napětí menší budeme požadovat změnu řídicího napětí. Tomu odpovídá zeslení dané poměrem [4]

$$A = -U_{OUT}/U_{IN} = -13/0,3 = -39, \quad (4-16)$$

⁹ Obvod OZ3A není v zapojení využit

kde U_{IN} je vstupní rozdílové napětí a U_{OUT} je výstupní napětí odvozené od poloviny napětí akumulátorů zesilovače OZ-2A. Pro výpočet ze vztahu $A = -R_{34}/R_{32}$ volíme $R_{32} = 1 \text{ k}\Omega$, z odvozeného vztahu vypočítáme $R_{34} = |-A \cdot R_{32}| = 39 \cdot 1000 = 39 \text{ k}\Omega$. Pro možnost nastavení zesílení je do série s R_{34} vložen trimr P6. Velikosti R_{36} , R_{37} opakovače OZ2B jsou pro zesílení $A = 1$ shodné, volíme $R_{36} = R_{37} = 10 \text{ k}\Omega$. Velikost odporů R_{33} , R_{35} nemá z hlediska funkce žádný vliv, pouze omezují velikost vyrovnávacích a poruchových proudů. Proto volíme $R_{33} = R_{34} = 10 \text{ k}\Omega$.

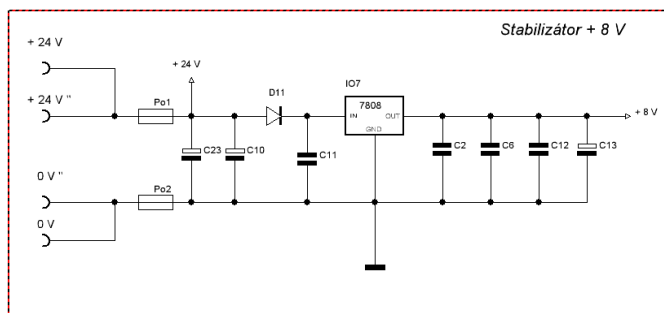
Hodnota odporů R_2 a R_3 musí být shodná (vytvoření středu rozdílového napětí). Zároveň musí být podstatně větší, než hodnota $R_7 + P_5$, tak, aby co nejméně ovlivňovala napěťové okénko vytvořené sériovou kombinací R_6 , $R_7 + P_5$ a R_8 . Volíme $R_2 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$.

Hodnoty R_{38} , P_3 a Zenerovo napětí D_{12} budou odvozeny od skutečných potřeb PWM modulátoru.

4.5.3.4 Napájecí obvody DŘ, Obr. 4.21

Pro napájení části obvodů na DŘ je použito napětí akumulátorů $+24 \text{ V}$, část je napájena kladným napájecím napětím stejné velikosti jako na DKS $+8 \text{ V}$ ze stabilizátoru 7808 [36] blokovaným proti zakmitávání kondenzátory v souladu s doporučením výrobce. Pro zajištění filtrace jsou po celé desce rovnoměrně rozloženy filtrační kondenzátory z části keramické, z části tantalové.

Dioda D_{11} zabraňuje poškození obvodů napájených ze stabilizátoru 7808 v případě přepólování. Proti případným nadproudům je celý obvod chráněn dvěma pojistkami $Po1$ a $Po2$ o velikosti vybavovacího proudu 200 mA . Pojistky jsou v obvodu umístěny symetricky. Na pojistkách vzniká při průchodu proudu teoreticky stejný úbytek napětí, takže nedochází k „posouvání“ odvozeného napětí pro komparátory a vzniku nesymetrického rozdílového napětí.



Obr. 4.21 Schéma napájecích obvodů DŘ

5 REALIZACE BALANCÉRU

Pro potřeby ověření funkčnosti jednotlivých navržených dílčích obvodů i celků popsanych v kapitole 4 byly obvody postupně osazeny na nepájivém kontaktním poli. Koncový stupeň výkonové části, tranzistory T1, T2, diody D7, D8 a tlumivka TL byly osazeny na universálním cuprexitivovém plošném spoji.

Při rozmístování jednotlivých obvodů byl kladen důraz na přehlednost, dostatečné prostorové oddělení a omezení induktivních a kapacitních vazeb z důvodu vzájemného ovlivnění. Z důvodu zamezení přenosu poruchových signálů mezi jednotlivými obvody byly napájecí obvody v dostatečné míře blokovány elektrolytickými a keramickými kondenzátory.

Pro potřeby odzkoušení funkce budičů IO2 a IO3 (XIDD4098SI) v pouzdře SMD byly vyrobeny redukce na rozměry pouzdra DIP.

Přestože byla věnována maximální péče zapojování obvodů, potvrdila se nevhodnost uvedeného způsobu z pohledu snížené spolehlivosti při prováděných zkouškách a měřeních a náchylnost k chybám, které v některých případech vedly ke zničení části obvodů, především tranzistorů koncového výkonového stupně.

Způsob zapojení částí obvodů při ověřování funkčnosti je zobrazen v příloze 14-1. Celé měřicí pracoviště ukazuje příloha 14-2.

Po ověření funkčnosti bylo z již zmíněných důvodů přistoupeno k návrhu dvou plošných spojů. Pro řídicí obvody byla navržena deska řízení DŘ, pro obvody výkonového stupně a jejich buzení byla navržena deska koncového stupně DKS. Základní obvodová koncepce obou desek byla popsána již v kapitole 4.

Návrh byl z důvodu jednoduchosti výroby vzorků proveden na jednostranné desky plošných spojů bez návrhu a realizace nepájivé masky. Při návrhu koncepce desek byl kladen důraz na vzájemnou mechanickou kompatibilitu a co nejjednodušší vzájemné elektrické propojení připouštějící určitou míru variability. Rozměr obou desek plošných spojů (160 x 60 mm) a upevňovacích bodů je shodný. Uvedené provedení umožňuje vzájemné mechanické propojení.

Pro vzájemné propojení napájecími a signálovými vodiči není použit mimo jiné i z důvodu spolehlivosti při pokusech žádný vícepinový konektor. Propojení je provedeno samostatnými vodiči. V pájecích bodech pro jednotlivé vodiče byly nalisovány „pájecí špičky“. Ty umožňují mnohonásobné opakované pájení bez poškození plošného spoje. Kromě pájecích bodů pro vodiče byly na plošných spojích navrženy a nalisovány „pájecí špičky“

v místech předpokládaného připojení propojovacích vodičů k měřicím přístrojům s označením MB (měřicí body).

V přílohách 15-1, 16-1, 17-1, 15-2, 16-2, 17-2 a 15-3, 16-3, 17-3 jsou vyobrazeny navržené plošné spoje, osazovací plány a fotografie osazených desek plošných spojů DKS, DŘ a desky proudových ochran DPO, která byla realizována až po dokončení celého návrhu (viz. kapitola 7). V příloze 18-1 je fotografie sestaveného balancéru včetně DPO.

V příloze 18-2 je fotografie zátěže pro zkoušení a měření balancéru realizovaná až deseti paralelně zapojenými odpory $33 \Omega/10 \text{ W}$ s chlazením zajištěným pomocí ventilátoru.

V přílohách 25, 26 a 27 jsou vyobrazena celková schémata, přílohy 19 až 24 obsahují rozpisky materiálu DKS, DŘ a DPO.

Pro ověření hodnot některých součástek byly na jejich místě osazeny kontakty z rozebraných precizních patic určených původně pro integrované obvody v pouzdrech DIP. Jedná se o kondenzátor C22 a odpor R43 v obvodu PWM modulátoru. Dále o Zenerovu diodu D12 a odpor R38 v obvodu tvorby řídicího napětí pro PWM.

Na uvedených pozicích byly ověřeny hodnoty:

- C22 = 22 nF
- R43 = 6,8 k Ω
- D12 = ZD 4,7 V
- R38 = 1 k Ω

6 MĚŘENÍ PARAMETRŮ

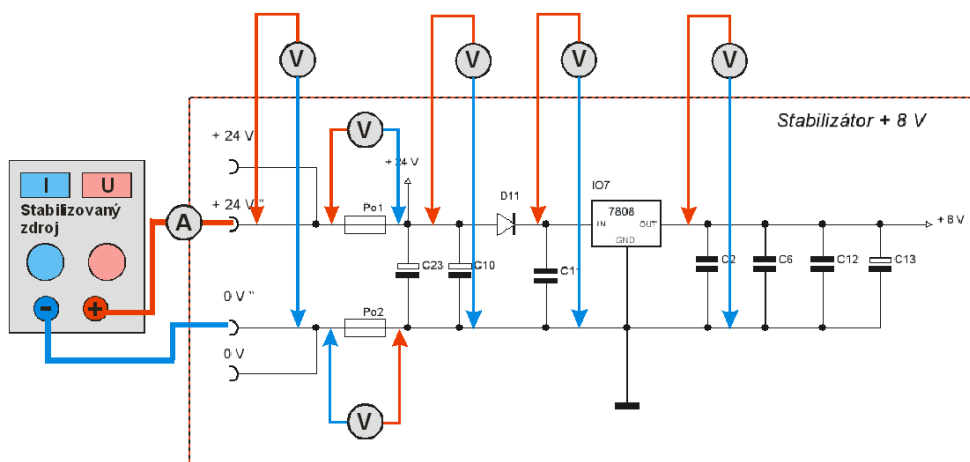
Pro ověření parametrů balancéru byla provedena řada měření. Měření byla prováděna postupně tak, aby byly nejdříve ověřeny parametry dílčích obvodů a rozsahy nastavovacích prvků a nakonec nastaveny konečné parametry. Na závěr byla ověřena funkčnost a změřeny parametry celku.

6.1 Deska řízení DŘ

Na desce řízení bylo provedeno měření napájecích napětí, kontrola funkčnosti okénkového diskriminátoru, kontrola vstupních děličů, kontrola funkce obvodů vyhodnocovací a řídicí logiky a obvodů tvorby PWM.

6.1.1 Napájecí napětí

Před kontrolou napájecích napětí byla osazená DŘ připojena ke zdroji napětí o velikosti 24 V s proudovým omezením nastaveným na hodnotu cca 200 mA. Body, ve kterých bylo prováděno měření jsou, vyznačeny na schématu Obr. 6.1.



Obr. 6.1 Měření napájecích napětí

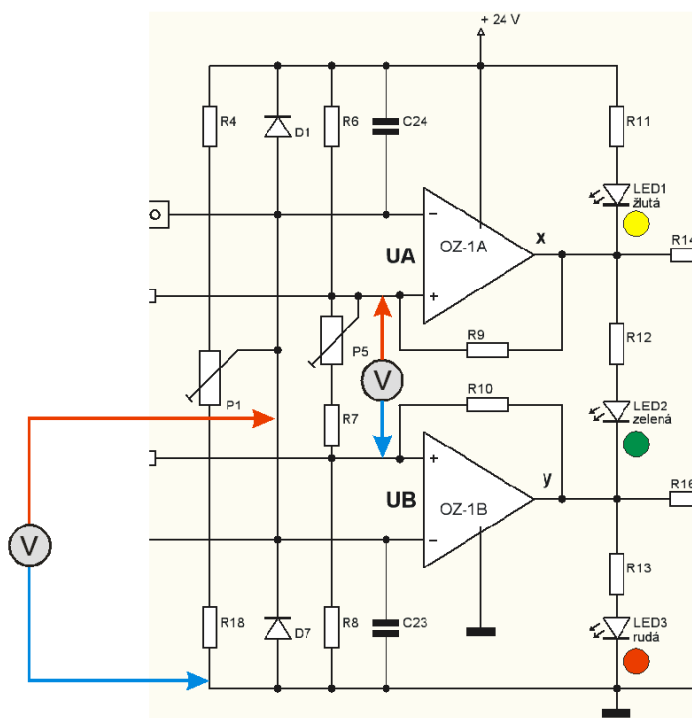
Výsledky měření jsou shrnuty v tabulce Tab. 6-1. Naměřené hodnoty vyjadřují úbytky napětí na obvodových prvcích (Po1, Po2 a D11). Přibližná shoda úbytku napětí na Po1 a Po2 je důležitá z důvodu symetrie činnosti okénkového diskriminátoru. Odběr proudu ze zdroje je závislý nejvíce na stavu výstupů okénkového diskriminátoru OZ1A a OZ1B.

	Napětí na svorkách 0V - 24 V [V]	Napětí na C23 [V]	Napětí na vstupu IN stabilizátoru 7808 [V]	Napětí na výstupu OUT stabilizátoru 7808 [V]	Úbytek na Po1 [mV]	Úbytek na Po2 [mV]	Odběr proudu [mA]
Požadované hodnoty	24 ±0,5	24 ±0,5	24 (+0,5; -1)	8 ±0,25	co nejmenší, pokud možno shodný		< 50
Naměřené hodnoty	24	23,9	23,3	7,93	21,3	22	39 nebo 32 dle stavu OZ-1

Tab. 6-1 Požadované a naměřené hodnoty napájecích napětí

6.1.2 Okénkový diskriminátor a vstupní děliče (OZ1)

Před vlastním měřením bylo zkontrolováno napájecí napětí 24 V. Při měření byly zkontrolovány rozsahy napětí v závislosti na krajních polohách běžců trimrů P1 a P5. Body měření jsou vyznačeny na Obr. 6.2. Poloha běžce trimru P1 simuluje rozsah rozdílového napětí ΔU_{AKU} na akumulátorech. Polohou běžce trimru P5 se nastavuje rozsah regulace okénkového diskriminátoru. Dále byla provedena kontrola rozsahu reakce (překlápění) okénkového diskriminátoru v závislosti na napětí na běžci trimru P1 a v závislosti na krajních polohách běžce trimru P5. Při měření rozsahu reakce okénkového diskriminátoru byla pozorována nepatrná hystereze způsobená zavedením kladné zpětné vazby (R9, R10). Hystereze byla zavedena z důvodu zlepšení překlápění komparátorů OZ1A a OZ1B.



Obr. 6.2 Měření okénkového diskriminátoru

Výsledky měření jsou shrnuty v tabulce Tab. 6-2.

	Rozsahy napětí		Rozsahy svícení LED 1, 2, 3 v závislosti na napětí na běžci P1						Hystereze
	Trimr P1 [V]	Trimr P5 [mV]	Rozsah svícení LED2 (zelená)		Rozsah svícení LED1 (žlutá)		Rozsah svícení LED3 (rudá)		
			P5 = min R	P5 = max R	P5 = min R	P5 = max R	P5 = min R	P5 = max R	
Požadované hodnoty	větší než 11 - 13	větší než 100 - 500	menší než 11,95 - 12,05	větší než 11,75 - 12,25	Odvozeno od LED2		Odvozeno od LED2		cca 10mV
Naměřené hodnoty	10,87 - 13,11	57 - 630	11,98 - 12,02	11,69 - 12,31	12,02	12,31	11,98	11,69	ve všech případech cca 10 mV
Nastavená hodnota	12	250	11,88 - 12,11		12,11		11,88		

Tab. 6-2 Požadované, naměřené a nastavené hodnoty okénkového diskriminátoru

6.1.3 Vyhodnocovací a řídicí logika

Činnost logických stavů výstupů A a B hradel NAND (4011 - IO1) odpovídá vstupním logickým stavům x a y odvozeným z činnosti okénkového diskriminátoru. Závislosti jsou popsány v kapitole 4, tabulka 4-2 a 4-3. Činnost je kontrolována opticky stavy kontrolních diod LED4 a LED5. Kontrolní diody LED6 a LED7 indikují přepisování logických stavů ze vstupů obvodů D (4013 – IO3) na výstupy Q v závislosti na rytmu zvoleného hodinového kmitočtu přítomného na vstupech CL (hodiny), Obr. 6.3.

Po přivedení logické úrovně Log0 (propojení vstupu se společnou zemí) na pomocný vstup 1 nebo 2 je blokována přes čtyřvstupová hradla NAND (4012 - IO2) činnost klopného obvodu D (4013 – IO3) pro řídicí signál A. Po přivedení logické úrovně Log0 na pomocný vstup 3 nebo 4 je blokována činnost klopného obvodu D pro řídicí signál B.

Zelená kontrolní dioda LED8 bliká v rytmu zvoleného hodinového kmitočtu.

Výsledky kontroly činnosti hodinového obvodu (4060 - IO4) jsou vyjádřeny v Tab. 6-3. Průběh napětí na vývodu CT včetně naměřených parametrů je uveden na Obr. 6.4.

	Kmitočet hodinového obvodu [Hz], $f_{0x}=f_{CT}2^N$ [Hz]											
	Vývod CT	Vývod N	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q ₉	Q ₁₀	Q ₁₂	Q ₁₃
Požadované hodnoty	400 ±100		2 ⁴	2 ⁵	2 ⁶	2 ⁷	2 ⁸	2 ⁹	2 ¹⁰	2 ¹¹	2 ¹³	2 ¹⁴
Naměřené hodnoty v rozsahu nastavení trimrem P2	257 - 800		16,06 - 50	Rozsah odpovídá dělicímu poměru N								
Nastavená hodnota	400		25	12,5	6,25	3,125	1,563	0,781	0,390	0,195	0,0488	0,0244

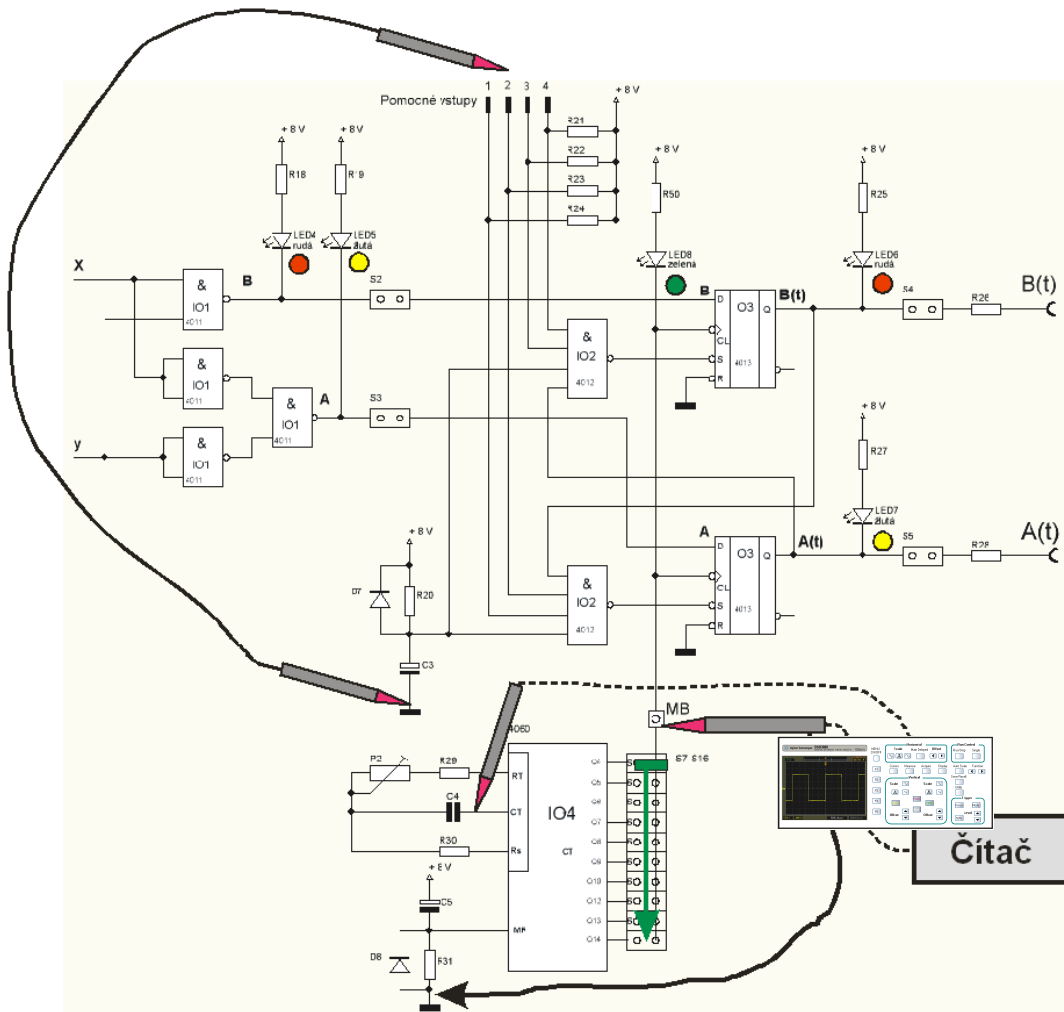
Tab. 6-3 Požadované, naměřené a nastavené hodnoty vyhodnocovací a řídicí logiky

Měření pomocí osciloskopu potvrzuje nastavení kmitočtu oscilátoru 400 Hz (perioda 2,5 ms). Amplituda signálu 7,96 V odpovídá velikosti napájecího napětí 8 V.

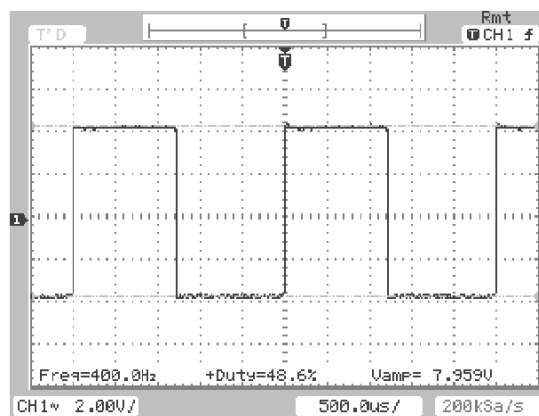
6.1.4 Obvod tvorby řídicího napětí (OZ2, OZ3)

Řízení PWM probíhá v poměrně úzkém rozmezí v nejbližším okolí činnosti okénkového diskriminátoru. Měřicí body jsou zobrazeny na Obr. 6.5. Minimální a maximální naměřené hodnoty nastavitelné citlivosti (strmosti) uvedené v Tab. 6-4 odpovídají zhruba hodnotám rozsahu nastavení okénkového diskriminátoru. Pro ověření funkce byl nastaven rozsah ΔU pro řízení PWM přibližně ±125 mV.

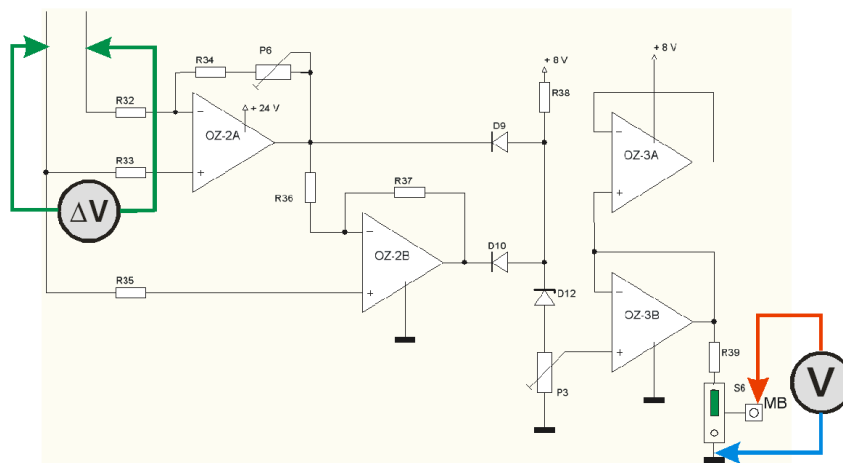
Změna rozdílového napětí ΔU byla prováděna pomocí trimru P1 diskriminátoru.



Obr. 6.3 Měření vyhodnocovací a řídicí logiky



Obr. 6.4 Průběh napětí hodinového obvodu na vývodu CT



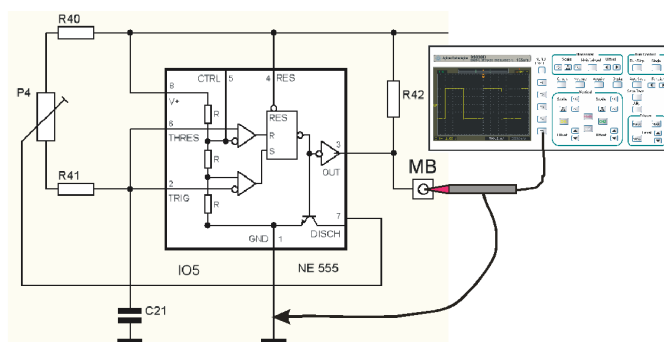
Obr. 6.5 Měření napětí pro řízení PWM v závislosti na velikosti ΔU

	Rozdílové napětí ΔU mezi měřicími body [mV]		
	min ΔU	0 ΔU	max ΔU
Trimr P6 - min. hodnota i zisk	-270	0	+267
Trimr P6 - max. hodnota i zisk	-65	0	+63
Nastavená hodnota	cca -125	0	cca + 125
Napětí v MB - výstup OZ-3B [V]	2,18	5,17	2,18

Tab. 6-4 Naměřené hodnoty napětí pro řízení PWM v závislosti na velikosti ΔU

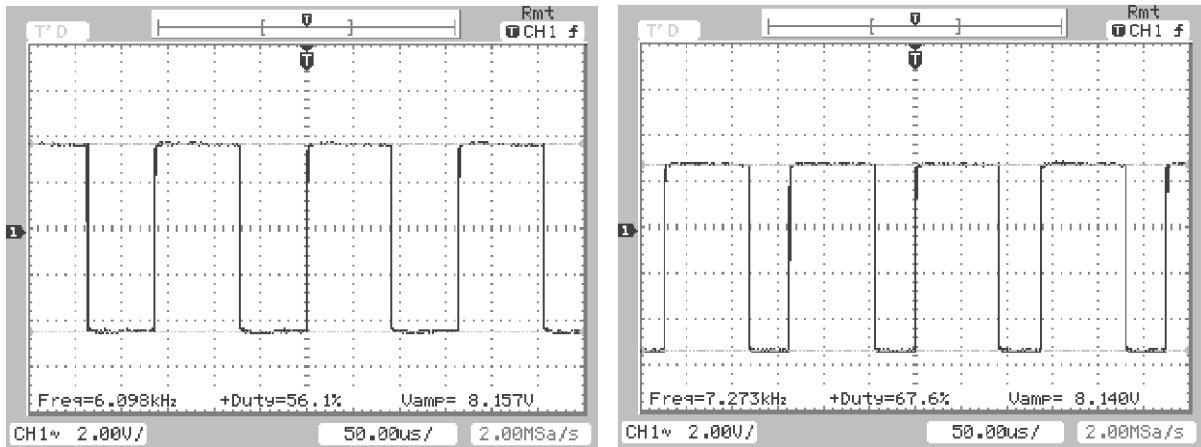
6.1.5 Obvody PWM

Jako zdroj konstantního kmitočtu s proměnnou periodou je použit obvod uvedený v kapitole 4.5.3.2. Měřicí bod výstupního průběhu napětí je zobrazen na Obr. 6.6. Naměřené průběhy jsou zobrazeny na Obr. 6.7.



Obr. 6.6 Měření výstupního průběhu napětí zdroje konstantního kmitočtu pro PWM

Možnost nastavení střídy vyjadřuje požadované potřeby. Odchylka kmitočtu není na závadu funkčnosti balancéru a bude ponechána.

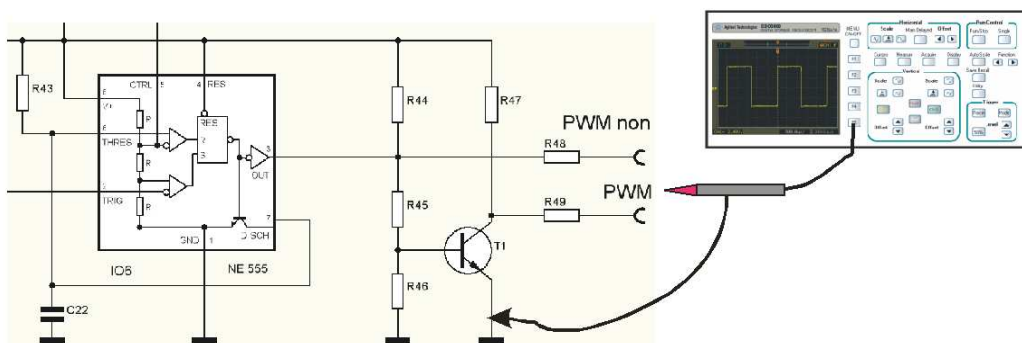


Obr. 6.7 Průběh napětí zdroje konstantního kmitočtu pro PWM

	Výstup OUT obvodu 555 (IO5)	
	Kmitočet [kHz]	Střída [%]
Požadovaná hodnota	6 ±1	60 ±5
Trimr P4 - min.	6,098	56,1
Trimr P4 - max.	7,273	67,6
Nastavená hodnota	6,2	57,5

Tab. 6-5 Naměřené hodnoty zdroje konstantního kmitočtu pro PWM

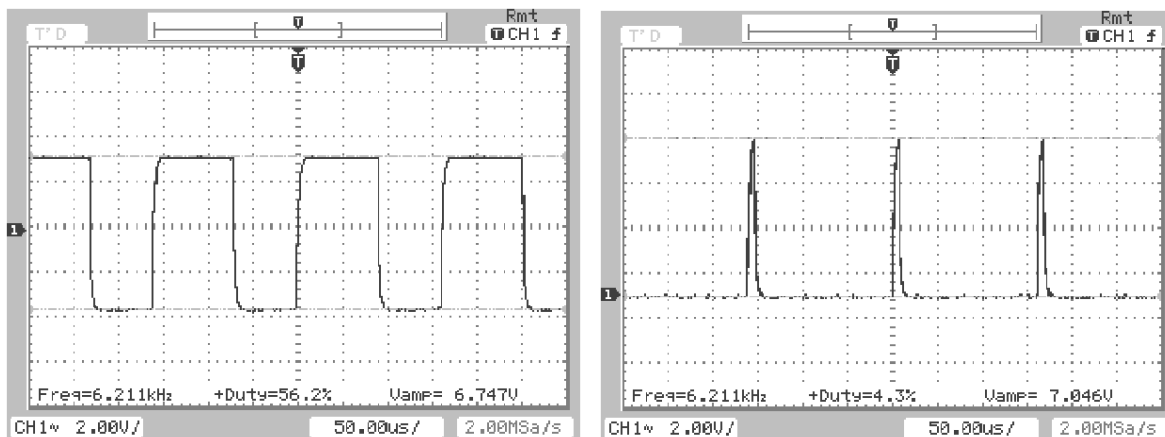
Na výstupu PWM modulátoru 555 (IO6) byly ověřeny parametry celého řetězce řízení. Při velkém ΔU_{AKU} byla ověřena shoda průběhu napětí s průběhem na výstupu zdroje konstantního kmitočtu - Obr. 6.9 vlevo. V pravé části obrázku je zobrazen průběh při maximálním zásahu řídicích obvodů se střídou 4,3 %. Minimální střída (4,3 %) odpovídá okamžiku, kdy je rozdílové napětí $\Delta U = 0$ V.



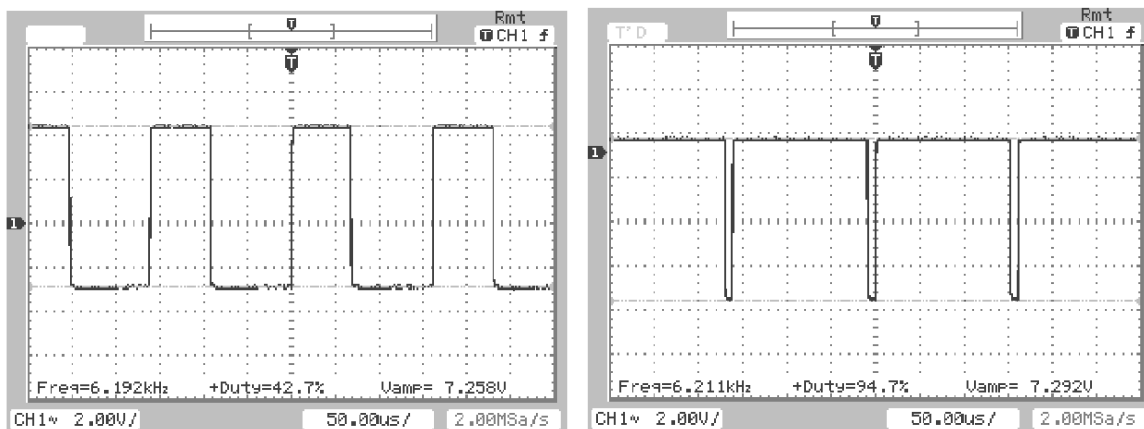
Obr. 6.8 Měření průběhu výstupního napětí na výstupech PWM a PWM-non

Na výstupu PWM-non Obr. 6.10 jsou průběhy inverzní. Z průběhů je patrné, že na výstupu PVM-non jsou podstatně rychlejší přechody mezi logickými stavy. Uvedený jev je s největší pravděpodobností na výstupu PWM způsoben nevhodným návrhem pracovního

bodů tranzistoru T1 pro spínací režim provozu. Pro další ověření parametrů jsou hodnoty obvodových součástek R44, R45, R46, R47 a R49 nastavujících pracovní bod tranzistoru T1 ponechány v původním stavu. Vstupní obvody DKS, kam je modulovaný PWM signál přiveden, by měly signál vytvarovat a přechody mezi logickými stavy podstatně zrychlit.



Obr. 6.9 Průběhy na výstupu PWM



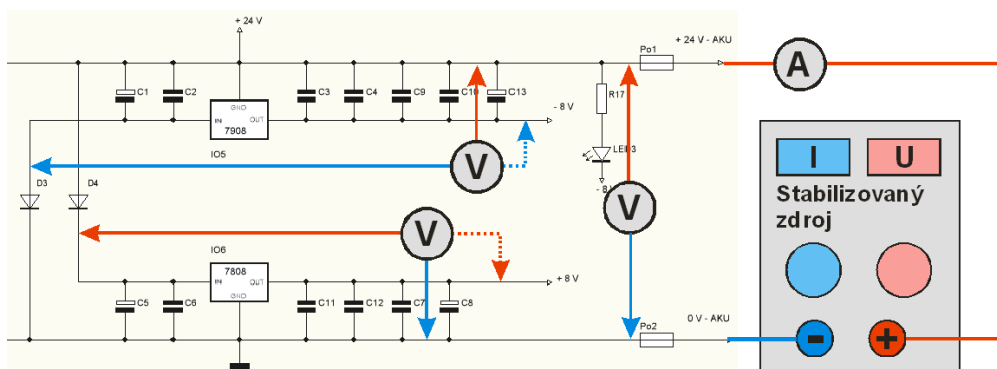
Obr. 6.10 Průběhy na výstupu PWM-non

6.2 Deska koncového stupně DKS

Na DKS bylo před propojením s DR provedeno měření napájecích napětí a statická kontrola přenosu vstupních logických proměnných ze vstupů A(t), B(t) a PWM k výkonovým tranzistorům. Z uvedeného důvodu byla všechna měření provedena bez připojených zátěží (AKU, zatěžovací rezistory).

6.2.1 Napájecí napětí

Před kontrolou napájecích napětí je osazená DŘ připojena ke zdroji napětí o velikosti 24 V s proudovým omezením nastaveným na hodnotu cca 200 mA. Body, ve kterých bylo prováděno měření, jsou vyznačeny na schématu Obr. 6.11.



Obr. 6.11 Měření napájecích napětí a proudu

Výsledky měření jsou shrnuty v tabulce Tab. 6-6. Naměřené hodnoty vyjadřují úbytky napětí na předřazených diodách D3 a D4. Napětí na vstupu a výstupu záporného stabilizátoru 7908 bylo vztaženo ke kladnému napětí +24 V.

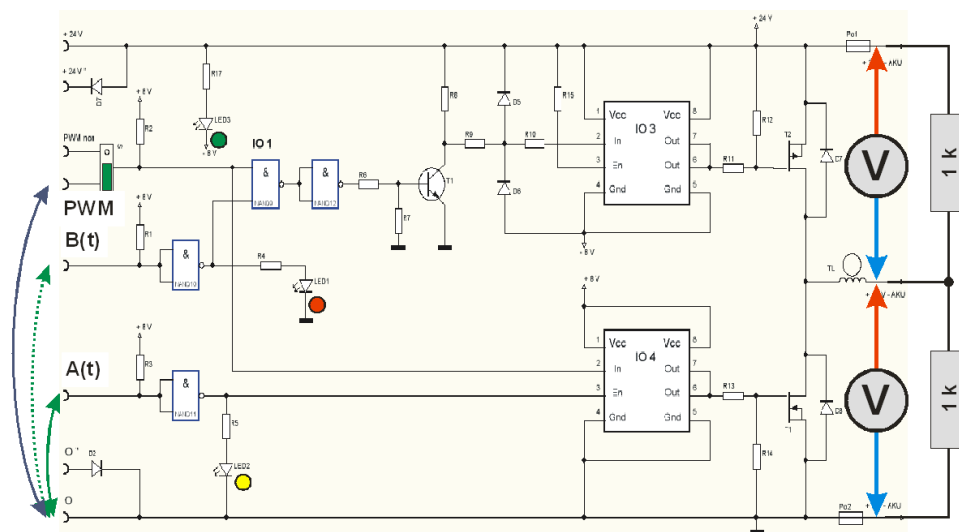
	Napětí na svorkách 0V - 24 V [V]	Napětí na stabilizátorech				Odběr proudu [mA]
		Vstupu IN st. 7808 [V]	Výstup OUT st. 7808 [V]	Vstupu IN st. 7908 [V]	Výstup OUT st. 7908 [V]	
Požadované hodnoty	24 ±0,5	24 (+0,5; -1)	8 ±0,25	-24 (+1, -0,5)	-8 ±0,25	< 50
Naměřené hodnoty	24	23,3	7,98	-23,3	-7,92	29

Tab. 6-6 Požadované a naměřené hodnoty napájecích napětí

6.2.2 Přenos vstupních logických proměnných na výstup

Pro kontrolu přenosu vstupních logických signálů ze vstupů A(t), B(t) a PWM na výstupní výkonové tranzistory T1 a T2 bylo nutno pro zajištění symetrie výstupního napětí na střed (výstup) připojit malou symetrickou předzátěž o velikosti 2 x 1 kΩ. Pokud předzátěž nebyla připojena, nebylo výstupní napětí definováno a odpovídalo různým závěrným proudům tranzistorů T1, T2 a diod D7 a D8 (pohybovalo se v intervalu 2 až 22 V). Pro potřeby kontroly je DŘ připojena ke zdroji napětí o velikosti 24 V s proudovým omezením nastaveným na 200 mA.

Zapojení pro kontrolu přenosu je uvedeno na Obr. 6.12.



Obr. 6.12 Zapojení pro kontrolu přenosu logických proměnných ze vstupu na výstup

Přenos logických proměnných je vyjádřen v Tab. 6-7. Logické „0“ jsou realizovány pomocí propojek ze vstupů ke společnému zápornému potenciálu. Při kontrole je možno odzkoušet i stav, kdy jsou sepnuty oba výkonové tranzistory T1, T2. Je však nutno dodržet podmínku proudového omezení napájecího zdroje. Při sepnutí se obvod chová jako zkrat, na který napájecí zdroj reaguje. Pokud není splněna podmínka proudového omezení, je potřeba stavu, kdy jsou oba tranzistory T1 i T2 sepnuty zamezit. V opačném případě může dojít k jejich poškození.

Vstupy			LED1	LED2	Výstupy	
PWM	A(t)	B(t)	rudá	žlutá	U_{T1} [V]	U_{T2} [V]
1	1	1	×	×	12 zavřen	12 zavřen
1	0	1	×	svítí	0 otevřen	24 zavřen
1	1	0	svítí	×	24 zavřen	0 otevřen
0	1	1	×	×	12 zavřen	12 zavřen
0	0	1	×	svítí	12 zavřen	12 zavřen
0	1	0	svítí	×	12 zavřen	12 zavřen
1	0	0	svítí	svítí	Zakázaný stav, T1 a T2 by byly otevřeny současně, nastal by zkrat	

Tab. 6-7 Tabulka přenosu logických proměnných ze vstupu na výstup

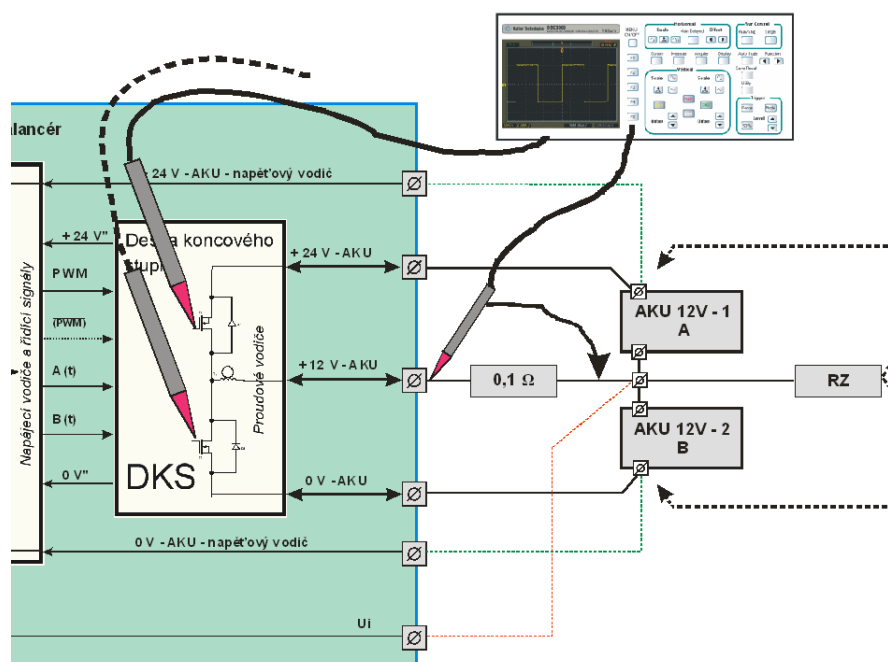
6.3 Balancér jako celek

Z průběhů na výstupech obvodů IO3 a IO4 (příloha 9-1 a 9-2) je patrná shoda průběhů a jejich inverzní charakter. To odpovídá požadavkům pro spínání výkonových tranzistorů T1

a T2. Z průběhů vyplývá správnost úvahy o vytvarování a zrychlení přechodů mezi logickými stavy signálu PWM na DŘ (Obr. 6.9).

V přílohách 10 a 11 jsou zobrazeny průběhy výstupního proudu při řízení výkonových tranzistorů T1 nebo T2 pro různé velikosti zátěže připojené k jednomu z akumulátorů. Na části průběhů proudu je patrný zásah PWM regulace.

Na Obr. 6.13 je schéma zapojení pro snímání průběhu proudu tlumivkou TL. Průběhy jsou sejmuty pro různé velikosti zátěží, různě zapojené zátěže a bez zátěže. Na průběhu proudu se zásahem PWM regulace, příloha 11-2 vlevo, je okótvána jedna perioda T. Doba t_1 je doba, po kterou je otevřen tranzistor T2, proud teče do tlumivky TL. Po dobu t_2 by měl být proud dodáván tlumivkou TL do akumulátoru i do zátěže, ten je však dodáván pouze po dobu t_3 . Po dobu t_4 již není dodáván tlumivkou TL žádný proud, proud akumulovaný v tlumivce je v této době vyčerpán.



Obr. 6.13 Měření průběhu zatěžovacího proudu a budících napětí tranzistorů T1 a T2

6.3.1 Ověření funkce

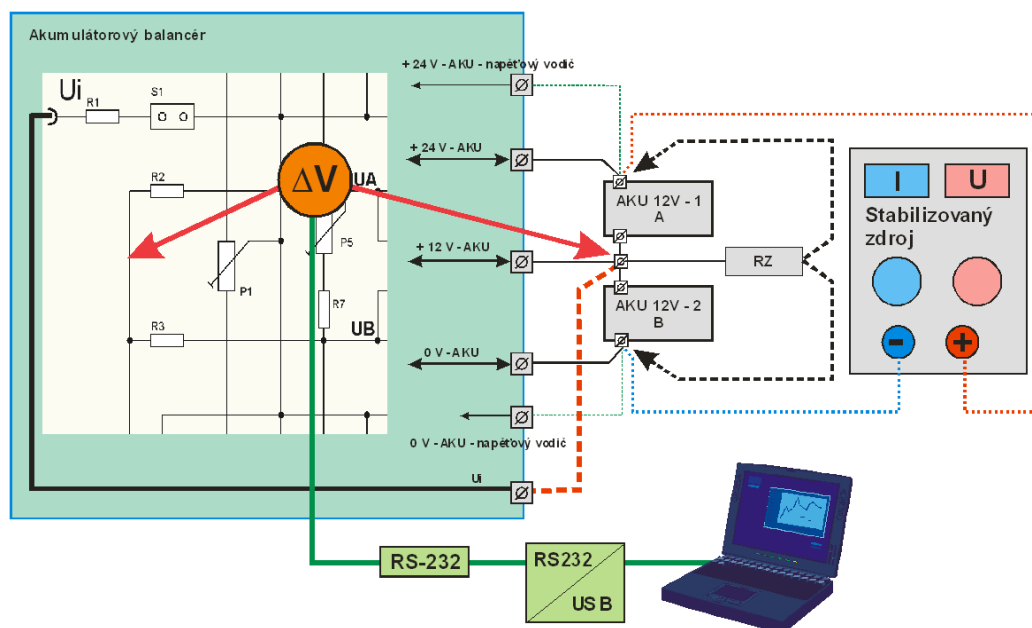
V přílohách 10 a 11 jsou na sejmutých oscilogramech průběhy budících napětí výkonových tranzistorů a proudy tlumivkou při různých velikostech udebíraného proudu. Průběhy potvrzují přenos čídicích signálů A(t), B(t) a PWM modulační k tranzistorům T1 nebo T2 a funkčnost celku.

6.3.2 Parametry balancéru

Na grafech, přílohy 12 a 13, je vyobrazeno rozdílové napětí ΔU na akumulátorech. K akumulátorům je střídavě připojována postupně zátěž $16,5 \Omega$ (0,8 A), $5,5 \Omega$ (2,4 A), $3,3 \Omega$ (4 A). Proud odebíraný zátěží je vypočítán pro napětí na zatěžovaném akumulátoru 13,2 V.

Červená toleranční pole pro $\Delta U < 0,5 \text{ V}$ a $\Delta U < 0,25 \text{ V}$ vychází z požadovaných parametrů. Měření byla prováděna tak, že byla vždy 2x po sobě s přestávkou na určitou dobu připojena zátěž a to nejprve k jednomu (A), a poté ke druhému (B) akumulátoru. Každý graf vyjadřuje průběhy rozdílů napětí při různých zátěžích (popsáno v titulku každého grafu).

První tři grafy, příloha 12-1, 12-2 a 12-3 vyjadřují průběh rozdílů s **průměrnými parametry** nastavenými při měření. U grafu, příloha 12-3, je vidět krátkodobé překročení tolerančního pole ΔU . Protože se jedná o překročení parametrů pro zatěžovací proud 4 A, je možné, že překročení bylo způsobeno úbytky napětí na svorkách akumulátorů při nevhodně upevněném některém z měřicích nebo napěťových vodičů.



Obr. 6.14 Zapojení pro měření rozdílů napětí

Následující 3 grafy, příloha 13-1, 13-2 a 13-3, vyjadřují průběhy rozdílů ΔU při teoreticky nejlepších nastavitelných parametrech balancéru (nejmenší nastavitelný rozdíl napětí, nejstrmější regulace PWM). Tento režim, přestože je nejpřesnější, nebude pro řízení nejvhodnější. K vyrovnávání napětí, resp. kapacity dochází téměř stále. Tomu odpovídají zvlněné části grafů.

Dosažená přesnost napětí na akumulátorech je v tomto případě podstatně lepší, než při průměrných nastavených parametrech. Dosažený rozdíl napětí ΔU na akumulátorech se blíží hranici 100 mV pro všechny velikosti zatěžovacích proudů.

6.4 Vyhodnocení měřených parametrů

Z měřených parametrů vyplývá, že základní požadavky, udržení rozdílu napětí na akumulátorech a minimální dodávaný proud balancérem byly podstatně lepší než parametry zadané. Parametry byly pro možnost posouzení měřeny vždy při různých režimech provozu simulujících reálné použití. V žádném případě však nebylo v možnostech, ať již z důvodu technických nebo časových, odzkoušet činnost ve všech vyjmenovaných režimech provozu.

Parametry, jak požadované, tak naměřené, byly shrnuty v Tab. 6-8. Parametry byly dosaženy při různých, již zmíněných režimech provozu balancéru.

	Výstupní proud min. [A]	Rozdílové napětí ΔU při zátěži na AKU [V]	Rozdílové napětí ΔU bez zátěže na AKU [V]
Požadovaná hodnota	> 2	< 0,5	< 0,25
Průměrné nastavené parametry balancéru	4	< 0,5	< 0,25
Nejlepší nastavené parametry balancéru	4	< 0,2	< 0,2

Tab. 6-8 Dosažené výstupní parametry balancéru

Další splněnou podmínkou činnosti je plně autonomní funkce bez jakéhokoliv zásahu obsluhy s výjimkou připojení k akumulátorům.

Vliv činnosti balancéru na životnost akumulátorů nebyla z časových důvodů ověřována. Stane se však jistě předmětem dalšího zkoumání.

7 PO UZÁVĚRCE – OBVODY PROUDOVÉ OCHRANY

V kapitole 1 – Základní požadavky, byl mezi dalšími požadavky, které nepřímo souvisí s funkcí balancéru, uveden požadavek na funkci elektronické pojistky proti nadproudům.

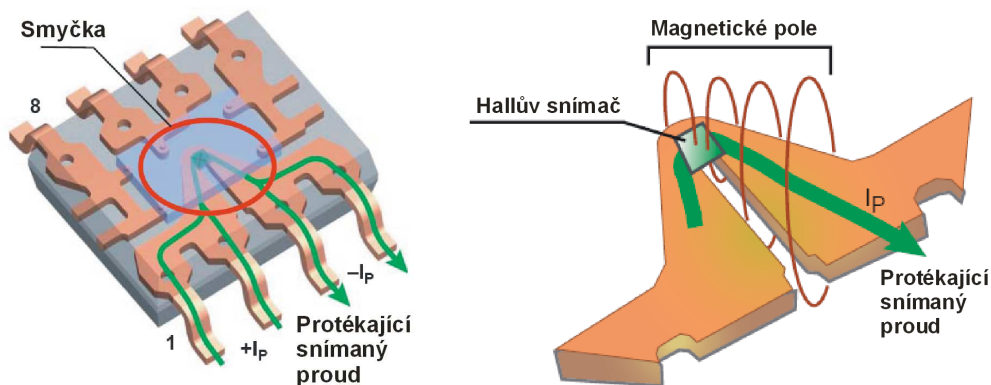
Již v počátcích praktického návrhu bylo zvažováno takové řešení, které vzhledem k relativně malému napětí akumulátorů a poměrně velkým uvažovaným proudům (přesahujícím zadání práce) při snímání jejich velikosti způsobí co možná nejmenší úbytky napětí a tím omezí ztráty v proudových obvodech na minimum.

Snímání proudu sledováním úbytku napětí na vloženém sériovém odporu je z uvedeného důvodu nevhodné. Jako vhodné řešení v uvedeném případě může být použití integrovaných senzorů proudu vyráběných firmou Allegro [22], [24] pracujících na principu Hallova efektu.

Protože nebyl žádný z řady uvedených obvodů v kusovém množství v době návrhu k dispozici, byl návrh řešen bez elektronické proudové ochrany, vzorky byly objednány a s návrhem bylo započato až po dodání vzorů v době před dokončením celého návrhu a této práce. To je také důvodem názvu kapitoly a samostatného vložení na konec celé práce.

7.1 Základní popis činnosti integrovaných senzorů proudu

Ve struktuře integrovaných senzorů proudu Obr. 7.1 je použit Hallův snímač umístěný v těsné blízkosti smyčky, kterou protéká měřený (snímaný) proud. Na elektrodách Hallova snímače vzniká napětí úměrné velikosti a směru protékajícího proudu. To je dále vnitřními obvody předzpracováno, linearizováno a na výstupu připraveno k dalšímu použití. Vnitřní blokové schéma je zobrazeno na Obr. 7.2.

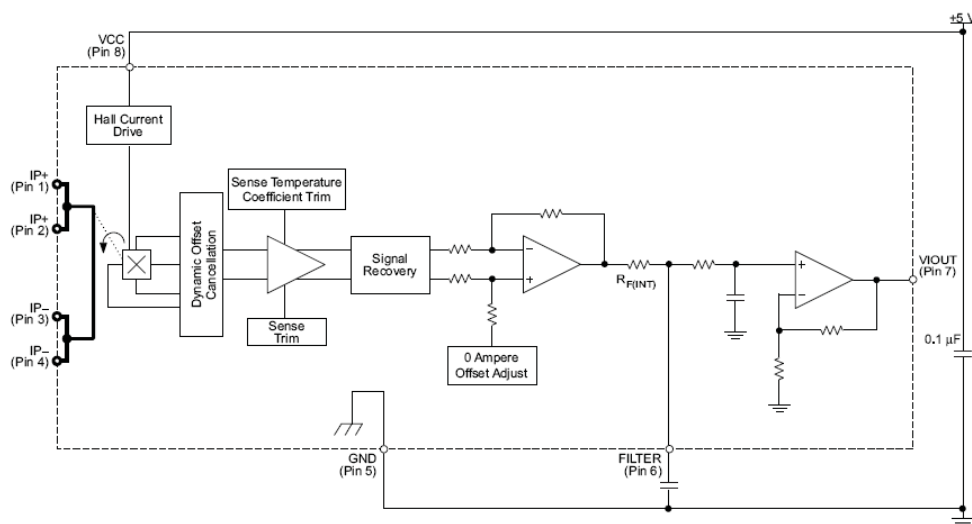


Obr. 7.1 Vnitřní struktura [24]

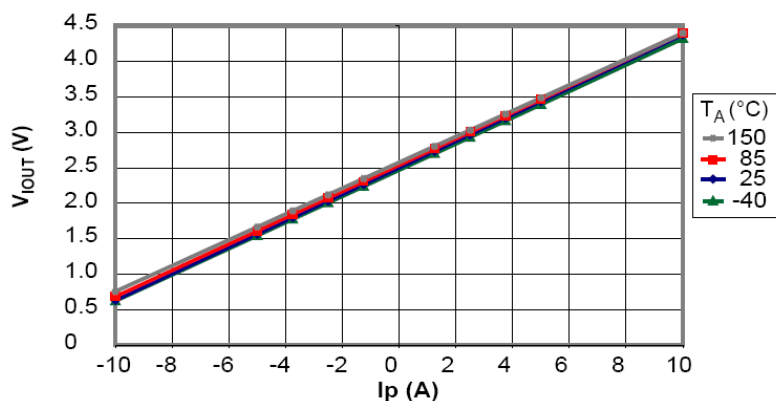
Obvod ACS712 je optimalizován pro snímaný proud ± 5 A (maximálně ± 10 A) a napájecí napětí 5 V při vlastním odběru proudu cca 8 mA. Odpor smyčky vložené do obvodu snímaného proudu je 1,2 m Ω . Na něm vzniká při průchodu proudu 10 A úbytek napětí $U = I \cdot R = 10 \cdot 0,0012 = 0,012$ V a výkonová ztráta $P = U \cdot I = 0,012 \cdot 10 = 0,12$ W. To jsou hodnoty velmi příznivé a z pohledu ztrát v proudových obvodech balancéru zanedbatelné.

Další předností obvodu je galvanické oddělení obvodů snímání proudu, vstupy IP+ a IP-, od obvodů zpracování Hallova napětí a výstupu V_{OUT}, dále schopnost zpracovat proud do cca 150 kHz a lineární závislost výstupního napětí na velikosti protékajícího proudu, viz graf Obr. 7.3 (v daném případě 185 mV/A).

Z důvodu filtrace vyhodnocovaného proudu je na vývodu 6 použit filtrační kondenzátor. Jeho hodnotu lze měnit podle potřeb konkrétní aplikace. Pro běžné použití vyhoví doporučená hodnota 1 nF.



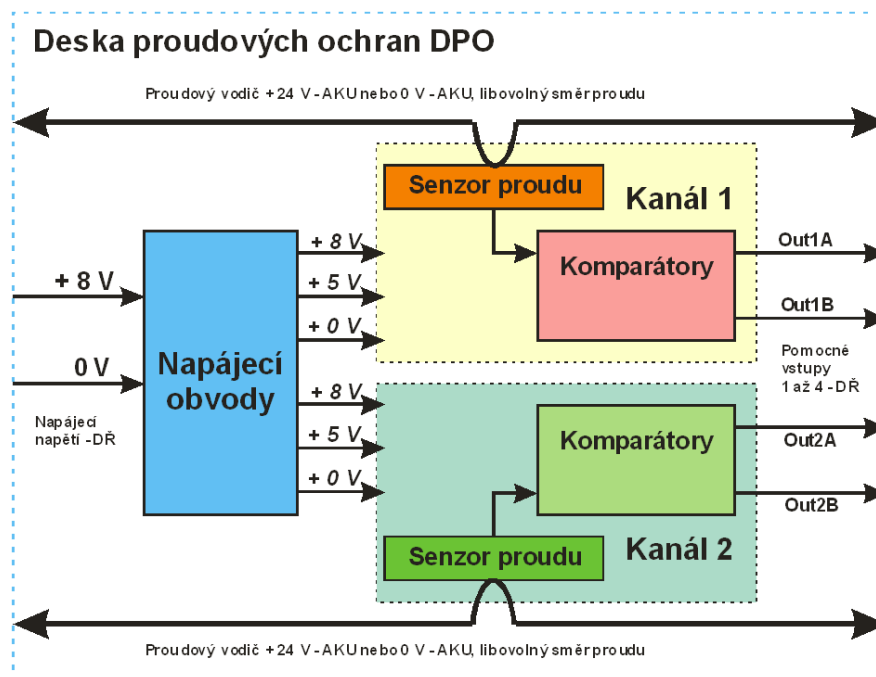
Obr. 7.2 Blokové schéma [24]



Obr. 7.3 Závislost výstupního napětí V_{OUT} na velikosti protékajícího proudu [24]

7.2 Návrh obvodu proudových ochran DPO (deska proudových ochran)

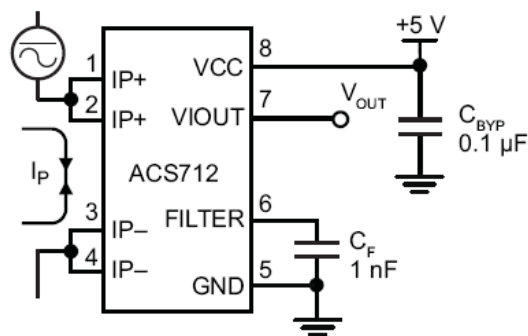
Při návrhu koncepce byla snaha navrhnout DPO tak, aby řešení vyhovělo nejen potřebám balancéru, ale potřeby přesahovalo a bylo použitelné i v jiných zapojeních se stejnými požadavky. Blokové schéma DPO je uvedeno na Obr. 7.4. Na DPO jsou pro vyhodnocení proudů umístěny 2 shodné kanály a to pro kladný i záporný „proudový vodič“, v případě balancéru dvou sériově zapojených akumulátorů, a společné napájecí obvody.



Obr. 7.4 Blokové schéma DPO

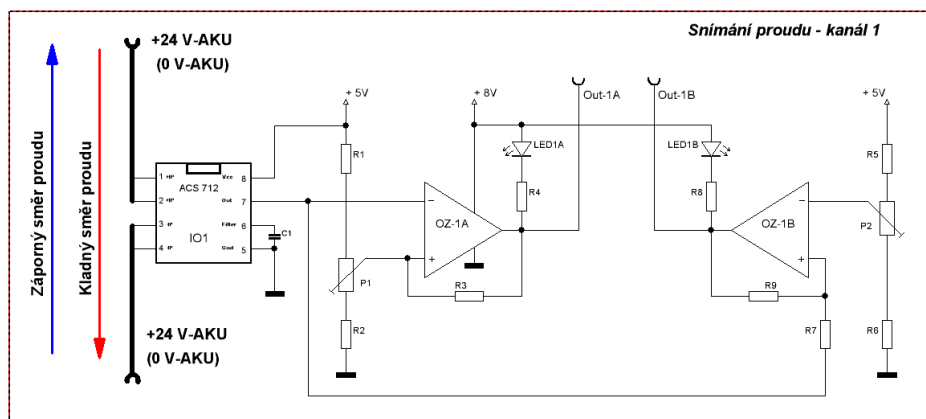
Základní zapojení vychází ze zapojení aplikačního (Obr. 7.5). Zapojení jednoho kanálu DPO je uvedeno na Obr. 7.6. K výstupu V_{OUT} obvodu ACS712 jsou v každé větvi navázány 2 komparátory¹⁰, jeden zapojený jako invertující OZ1A a druhý jako neinvertující OZ1B [4]. Každý slouží pro vyhodnocování jednoho směru proudu. Výstupem komparátorů je úroveň Log1 nebo Log0. Ty jsou přivedeny na pomocné vstupy 1 až 4 na DŘ, kde stavem Log0 blokují činnost příslušného obvodu D (4013 – IO3) a následně i příslušného výkonového tranzistoru T1 nebo T2 na DKS.

¹⁰ Na místě komparátorů lze použít pro měřicí účely zesilovače. Pro aplikaci v balancéru je vzhledem k požadovaným logickým úrovním na výstupu výhodnější použití komparátorů se skokovou změnou výstupního napětí a s možností nastavit komparační mez pro požadovanou velikost procházejícího proudu.



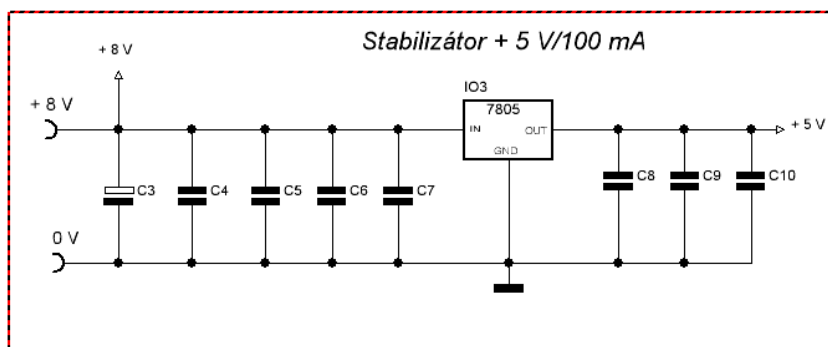
Obr. 7.5 Aplikační zapojení [24]

Velikost vyhodnocovaného proudu je nastavitelná v celém rozmezí vyhodnocovaného proudu -10 až $+10$ A (Obr. 7.3). Z důvodu zavedení mírné hystereze a zrychlení přechodu z jednoho logického stavu na výstupu komparátorů do druhého jsou v kladných zpětných vazbách použity odpory R3 a R9. Logické stavy indikující přechod do stavu, kdy obvod reaguje na velikost procházejícího proudu a blokuje činnost balancéru je indikován opticky pomocí nízkopříkonových diod LED1A a LED1B. Kompatibilita napěťových úrovní výstupů OZ1A a OZ1B se vstupy 1 až 4 na DŘ je zajištěna použitím napájecího napětí $+8$ V přivedeného z DŘ na DPO a oba komparátory.



Obr. 7.6 Zapojení jednoho kanálu obvodu proudových ochran

Pro napájení obvodu ACS712 (IO1) a vstupních děličů komparátorů (R1, P1, R2 a R5, P2, R6) je na DPO použit integrovaný stabilizátor napětí 7805 ($+5$ V) [38] s výstupním proudem 100 mA (Obr. 7.7). Vstup (In) a výstup (Out) stabilizátoru napětí je blokován proti kmitání kondenzátory v souladu s doporučením výrobce. Pro zamezení šíření poruchových proudů po napájecích spojích jsou použity další blokovací kondenzátory umístěné v co nejmenších vzdálenostech od pouzder napájených integrovaných obvodů.



Obr. 7.7 Napájecí obvody DPO

7.3 Funkce komparátorů a vstupní děliče

V zapojení je komparátor OZ1A použit pro vyhodnocení kladného směru procházejícího proudu (od $IP+$ k $IP-$) komparátor OZ1B. Pro vyhodnocení záporného směru procházejícího proudu komparátor OZ1B. Tomu odpovídají dle grafu Obr. 7.3 (při napájecím napětí 5 V) pro kladný směr proudu napětí na výstupu V_{OUT} obvodu ACS712 v intervalu přibližně 2,5 až 4,5 V a pro záporný směr proudu napětí v intervalu 0,5 až 2,5 V. Z rozsahů napětí lze vypočítat komparační rozsahy pro oba komparátory 2 V ($U_{P1} = 4,5 - 2,5 = 2$ V a $U_{P2} = 2,5 - 0,5 = 2$ V), které odpovídají požadovaným napětím na trimrech P1 a P2.

Pro nastavení komparační úrovně byly použity precizní víceotáčkové trimry s odporem $R_{P1,P2} = 10$ k Ω . Z úbytku napětí na trimrech a jejich odporu lze vypočítat velikost procházejícího proudu $I_{P1,P2} = U_{P1,P2}/R_{P1,P2} = 2/10000 = 2 \cdot 10^{-4}$ A.

Napětí na odporech R2 a R5 jsou shodná, a to 2,5 V. Z napětí na odporech a proudu $I_{P1,P2}$ vypočítáme velikost odporů $R2 = R5 = U_{R2,R5}/I_{P1,P2} = 2,5/2 \cdot 10^{-4} = 12,5$ k Ω . Z řady E24 vybereme hodnotu 12 k Ω .

Napětí na odporech R1 a R6 jsou opět shodná, a to přibližně 0,5 V. Z napětí na odporech a proudu $I_{P1,P2}$ vypočítáme opět velikost odporů $R1 = R6 = U_{R1,R6}/I_{P1,P2} = 0,5/2 \cdot 10^{-4} = 2,5$ k Ω . Z řady E24 vybereme hodnotu 2,2 k Ω .

Pro odhad hodnot odporů R3 a R7 v kladných zpětných vazbách komparátorů vyjdeme ze vztahů uvedených v literatuře [4]. Pro výpočet hysterezního napětí platí přibližný vztah

$$U_H = \alpha \cdot \Delta U_0 \quad (7-1)$$

$$\text{kde } \alpha = R_1/(R_1 + R_2) \text{ a } \Delta U_0 = U_{0max} - U_{0min}.$$

Odpor R2 ve vztahu odpovídá odporům R3 ve zpětné vazbě OZ1A a R9 ve zpětné vazbě OZ1B. Odpor R1 ve vztahu odpovídá odporu R7 u OZ1B a přibližně sérioparalelní kombinaci R1, P1, R2 u OZ1A. ΔU_0 je rozkmit výstupních napětí komparátorů z teoretického intervalu daného napájecím napětím $\Delta U_0 = U_{0\max} - U_{0\min} = 8 - 0 = 8 \text{ V}$.

Pro odhad hystereze volíme hodnoty:

- sérioparalelní kombinace R1, P1, R2 je přibližně 100 k Ω . Vzhledem k použití trimru by bylo nutno počítat s krajními mezemi, pro odhad postačuje jedna přibližná hodnota.
- R3 = 1 M Ω
- R7 = 10 k Ω
- R9 = 1 M Ω
- $\Delta U = 8 \text{ V}$

Hystereze komparátoru OZ1A je po dosazení do vztahu (7-1)

$$U_H = \alpha \cdot \Delta U_0 = 10000 / (10000 + 1000000) \cdot 8 = 79 \text{ mV} .$$

Hystereze komparátoru OZ1B je po dosazení do vztahu (7-1)

$$U_H = \alpha \cdot \Delta U_0 = 10000 / (10000 + 1000000) \cdot 8 = 79 \text{ mV} .$$

Z vypočítaných výsledků je patrná shoda hysterezí obou komparátorů. Ta je však vzhledem k použití trimrů pouze teoretická. Velikost hystereze v uvedené aplikaci ovlivní přesnost komparovaných napětí (vyhodnocovaných proudů) pouze minimálně.

Pro výpočet hodnot předřadných odporů R4 a R8 diod LED1A a LED1B platí stejná pravidla jako na DŘ a DKS. Jejich velikost je tedy shodná $R4 = R8 = 4,7 \text{ k}\Omega$.

7.4 Realizace DPO

Funkce obvodu proudových ochran byla ověřena na navrženém plošném spoji, přílohy 15-3, 16-3 a 17-3.

Při kontrole parametrů bylo kontrolováno napájecí napětí a ověřen rozsah velikosti vyhodnocovaných proudů. Při vytvoření vazeb s balancérem a pomocnými vstupy 1 až 4 na DŘ byla vyzkoušena funkce balancéru s DPO, Obr. 7.9.

7.4.1 Napájecí napětí

Před kontrolou napájecích napětí byla osazená DPO připojena ke zdroji napětí o velikosti 8 V s proudovým omezením nastaveným na hodnotu cca 100 mA. Při měření byla

kontrolována velikost odebíraného proudu a výstupní napětí stabilizátoru 7805. Výsledky naměřených hodnot jsou shrnuty v Tab. 7-1.

	Napětí na svorkách 0V + 8 V [V]	Napětí na vstupu IN stabilizátoru 7808 [V]	Napětí na výstupu OUT stabilizátoru 7805 [V]	Odběr proudu [mA]
Požadované hodnoty	$8 \pm 0,25$	$8 \pm 0,25$	$5 \pm 0,25$	< 30
Naměřené hodnoty	8	8	5,05	cca 24 mA

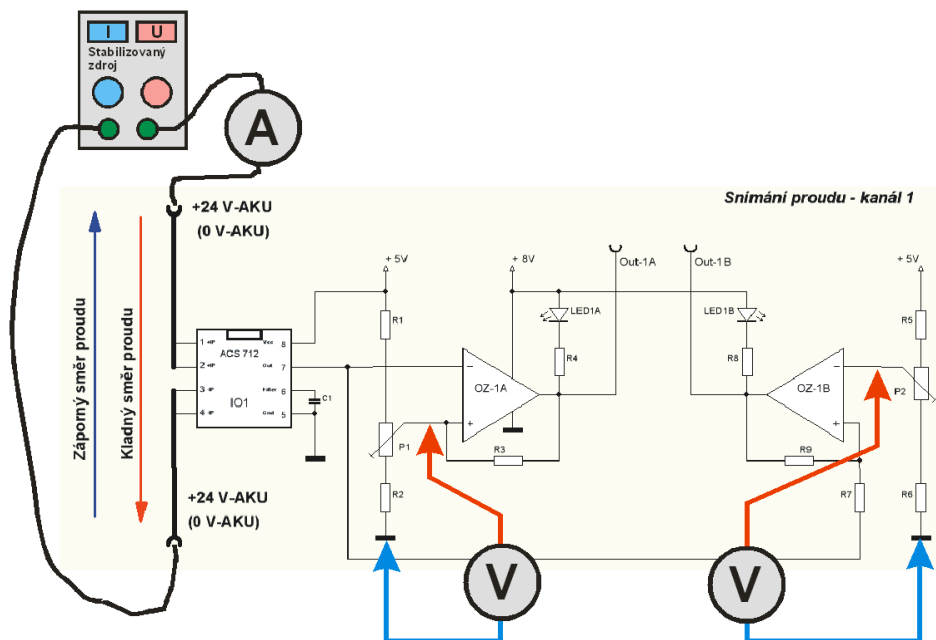
Tab. 7-1 Požadované a naměřené hodnoty napájecích napětí

7.4.2 Rozsahy nastavení komparátorů

Rozsah komparačních napětí byl kontrolován nejprve bez protékajícího proudu kontrolou napětí nastavitelných trimry P1, P2, P11 a P12 na vstupech komparátorů pro oba kanály. Číslování odporů a trimrů kanálu 2 je zvýšené o 10 oproti kanálu 1.

Poté byla provedena kontrola nastavitelnosti komparace pro protékající proud 1 A, 5 A a 9 A v obou směrech a nastavena zvolená komparační úroveň pro proud přibližně 5,5 A.

Jako zdroj proudu byl použit stabilizovaný zdroj napětí s proudovým omezením.

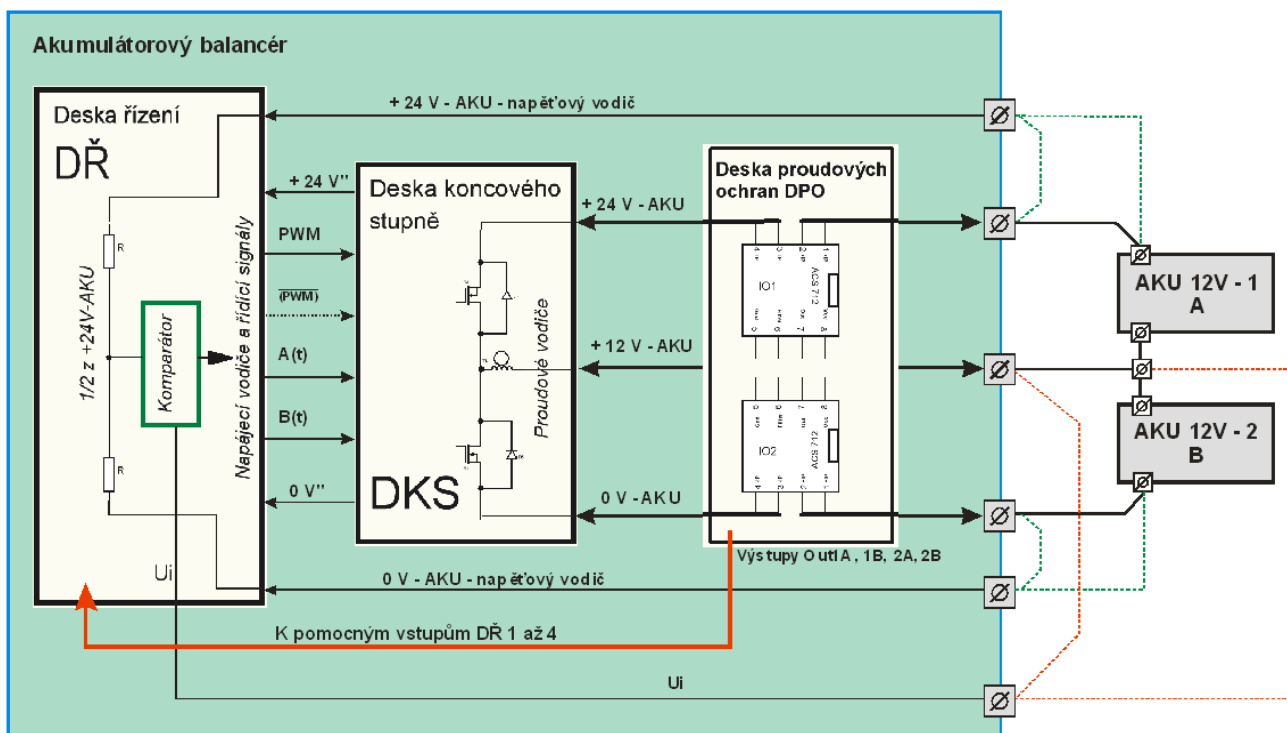


Obr. 7.8 Měření komparačních napětí

Kanál 1		Rozsahy napětí		Protékající proudy [A]						Hystereze	Svícení LED při LOG0	
		Trimr P1 [V]	Trimr P2 [V]	+1	+5	+9	-1	-5	-9		LED1A	LED1B
				Komparační mez cca [V]								
		Požadované hodnoty	Naměřené hodnoty	Nastavená hodnota	P1			P2				
	Požadované hodnoty	2,5 - 4,5	0,5 - 2,5	x	x	x	x	x	x	ve všech případech cca 50 mV	musí svítit	musí svítit
	Naměřené hodnoty	2,48 - 4,56	0,48 - 2,6	2,7	3,45	4,16	2,34	1,62	0,86		svítí	svítí
	Nastavená hodnota	3,5	1,5	x	x	x	x	x	x		svítí	svítí

Kanál 2		Rozsahy napětí		Protékající proudy [A]						Hystereze	Svícení LED při LOG0	
		Trimr P11 [V]	Trimr P12 [V]	+1	+5	+9	-1	-5	-9		LED2A	LED2B
				Komparační mez cca [V]								
		Požadované hodnoty	Naměřené hodnoty	Nastavená hodnota	P1			P2				
	Požadované hodnoty	2,5 - 4,5	0,5 - 2,5	x	x	x	x	x	x	ve všech případech cca 50 mV	musí svítit	musí svítit
	Naměřené hodnoty	2,42 - 4,56	0,48 - 2,52	2,69	3,38	4,22	2,33	1,69	0,84		svítí	svítí
	Nastavená hodnota	3,5	1,5	x	x	x	x	x	x		svítí	svítí

Tab. 7-2 Požadované, naměřené a nastavené hodnoty komparačních napětí



Obr. 7.9 Schéma implementace DPO do balancéru

ZÁVĚR, VYHODNOCENÍ

Cílem diplomové práce na téma „Akumulátorový balancér“ byl nejen vlastní návrh zařízení a jeho realizace, ale před vlastním návrhem i zhodnocení vlastností některých typů akumulátorů a vyhodnocení jejich parametrů ve vztahu k činnosti s balancérem.

V úvodních kapitolách byla nejprve vymezena funkce balancéru a popsány předpokládané režimy jeho provozu.

V následujících kapitolách bylo provedeno vyhodnocení provozních stavů a parametrů akumulátorů a to jak převzatých z katalogových údajů výrobců, tak na základě údajů ověřených praktickým měřením. Při zkoumání vlastností AKU byla pozornost soustředěna především na rozbor tvaru nabíjecích a vybíjecích charakteristik u dvou nejpoužívanějších typů akumulátorů s alkalickým elektrolytem NiCd a NiMH, a u akumulátorů s kyselým elektrolytem (olověných). S ohledem na tvar především nabíjecích charakteristik a ke způsobům zjišťování stavu nabití akumulátorů byly jako nejvhodnější pro provoz s balancérem vybrány akumulátory olovené s nehermetickými nádobami. S určitým omezením je pak provoz možný i s akumulátory olovenými hermetickými.

Následující kapitoly se již zabývají vlastním návrhem balancéru při stanovení parametrů v počátcích návrhu.

Při rozboru základní koncepce bylo celé zapojení rozděleno do dvou základních celků. První je tvořen řídicími obvody umístěnými na desce řízení (DŘ). Druhý je tvořen výkonovými obvody a je umístěn na desce koncového stupně (DKS). Mezi obvody byly vytvořeny potřebné vazby. Obvody jsou navrženy tak, aby umožňovaly vzájemné propojení v různých vývojových variantách, to znamená, že celé řešení je pojato tak, aby umožňovalo další případný vývoj. Při návrhu řídicích obvodů byly použity operační zesilovače a CMOS logické obvody, po zmapování chování balancéru ve vztahu k akumulátorům je možno obvody nahradit mikroprocesorovým řízením při zachování výkonové části a naopak při požadavku na větší dodávaný výkon lze navrhnout výkonnější koncový stupeň při zachování stávajících řídicích obvodů.

Při návrhu výkonové části bylo použito netradičního zapojení spínaného zdroje, který lze nazvat jako **zvysující invertující přepínaný spínaný zdroj**. Ten je ve svém základu tvořen dvěma páry výkonového tranzistoru a Schottkyho diody a společnou akumulační tlumivkou. Správnost úvah o funkci uvedeného netradičního zapojení byla ověřena pomocí simulačního programu PSPICE.

V závěrečné části vývoje byly navrženy plošné spoje, na kterých byla ověřena funkce a parametry dílčích celků, ověřeny hodnoty vypočítaných obvodových prvků a rozsahy nastavitelných parametrů. Pro potřeby měření byly nastaveny parametry průměrné odpovídající požadavkům zadání a parametry odpovídající teoreticky nejlepším dosažitelným parametrům.

Celému průběhu měření, nastavování parametrů a ověřování funkce se věnuje samostatná kapitola. Měření celku bylo provedeno při nastavených průměrných kvalitativních parametrech a při nastavených parametrech nejlepších dosažitelných. V obou případech byly dosaženy parametry lepší, než parametry požadované a funkce balancéru byla při různých zvolených režimech provozu bez jakýchkoliv problémů.

V závěru návrhu byl navržen ještě jeden samostatný celek a to ve funkci elektronické pojistky umístěný na desce proudových ochran (DPO). Proudové ochrany by měly významnou měrou přispět ke spolehlivosti a také bezpečnosti celého zařízení. Návrh byl proveden z důvodu nedostupnosti zvolených senzorů proudu pracujících na principu Hallova efektu před odevzdáním celé práce a popsán v samostatné kapitole. Přesto bylo při vývoji, výpočtech obvodových prvků, návrhu a ověřování parametrů postupováno shodně jako při návrhu řídicích a výkonových obvodů. Parametry byly nastaveny a ověřeny na navrženém plošném spoji. Potřebné vazby s řídicími obvody byly připraveny předem již při jejich návrhu. Dlouhodobé ověření funkce proudových ochran z časových důvodů provedeno nebylo.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 0.1	Blokové schéma pojízdného prostředku	10
Obr. 0.2	Blokové schéma napájecí soustavy.....	11
Obr. 0.3	Použití AKU v rozvodu 12 V	11
Obr. 0.4	Napájení spotřebičů v rozvodu 12 V z poloviny napájecího napětí	12
Obr. 1.1	Základní režimy provozu	15
Obr. 2.1	Závislost tvaru nabíjecí charakteristiky na teplotě a velikosti nabíjecího proudu (SANYO KR800AAE) [39]	20
Obr. 2.2	Závislost napětí a tvaru vybíjecí charakteristiky na vybíjecím proudu (SANYO KR800AAE) [39].....	20
Obr. 2.3	Katalogové nabíjecí charakteristiky Ni-MH akumulátorů SAFT VH AAL 1700 [40].....	21
Obr. 2.4	Katalogové vybíjecí charakteristiky Ni-MH akumulátorů SAFT VH AAL 1700 [40].....	21
Obr. 2.5	Závislost vnitřního odporu olověného akumulátoru na stavu nabití a na teplotě [7].....	23
Obr. 2.6	Tvar nabíjecí a vybíjecí charakteristiky olověného akumulátoru s vyznačenými pásmy nabíjení [8].....	25
Obr. 2.7	Vybíjecí charakteristiky olověného akumulátoru, závislost na velikosti vybíjecího proudu a teplotě [8].....	25
Obr. 4.1	Způsoby provozu	36
Obr. 4.2	Blokové schéma balancéru	37
Obr. 4.3	Blokové schéma DKS	37
Obr. 4.4	Náhradní schéma výkonové části DKS. Proudů a napětí v případě, kdy $U_{AKU-A} > U_{AKU-B}$	39
Obr. 4.5	Přibližné průběhy proudů a napětí, $U_{AKU-A} > (<) U_{AKU-B}$	40
Obr. 4.6	Náhradní schéma výkonové části DKS. Proudů a napětí v případě, kdy $U_{AKU-A} < U_{AKU-B}$	40
Obr. 4.7	Schéma výkonové části koncového stupně pro simulaci.....	41
Obr. 4.8	Schéma výkonové části DKS.....	45
Obr. 4.9	Schéma přizpůsobovacích a vyhodnocovacích obvodů DKS.....	46
Obr. 4.10	Napájecí obvody DKS	48
Obr. 4.11	Blokové schéma desky řízení DŘ.....	49
Obr. 4.12	Schéma okénkového diskriminátoru, vstupních děličů a přizpůsobovacích obvodů	51
Obr. 4.13	Schéma obvodů vyhodnocovací a řídicí logiky	54
Obr. 4.14	Vnitřní zapojení obvodu TL494	59
Obr. 4.15	Schéma DKS s obvodem TL494	60
Obr. 4.16	Doporučené zapojení PWM modulátoru s obvodem 555 a teoretické průběhy napětí na jeho výstupu [26].....	61
Obr. 4.17	Doporučené zapojení generátoru konstantního kmitočtu pro PWM modulátor průběhy napětí na jeho výstupech [26].....	62
Obr. 4.18	Schéma obvodů PWM modulace a generátoru konstantního kmitočtu. 63	

Obr. 4.19	Teoretický průběh napětí na výstupu obvodu tvorby řídicího napětí pro PWM.....	64
Obr. 4.20	Schéma obvodů řídicího napětí pro PWM.....	65
Obr. 4.21	Schéma napájecích obvodů DŘ.....	66
Obr. 6.1	Měření napájecích napětí.....	69
Obr. 6.2	Měření okénkového diskriminátoru.....	70
Obr. 6.3	Měření vyhodnocovací a řídicí logiky.....	72
Obr. 6.4	Průběh napětí hodinového obvodu na vývodu CT.....	72
Obr. 6.5	Měření napětí pro řízení PWM v závislosti na velikosti ΔU	73
Obr. 6.6	Měření výstupního průběhu napětí zdroje konstantního kmitočtu pro PWM.....	73
Obr. 6.7	Průběh napětí zdroje konstantního kmitočtu pro PWM.....	74
Obr. 6.8	Měření průběhu výstupního napětí na výstupech PWM a PWM-non... ..	74
Obr. 6.9	Průběhy na výstupu PWM.....	75
Obr. 6.10	Průběhy na výstupu PWM-non.....	75
Obr. 6.11	Měření napájecích napětí a proudu.....	76
Obr. 6.12	Zapojení pro kontrolu přenosu logických proměnných ze vstupu na výstup.....	77
Obr. 6.13	Měření průběhu zatěžovacího proudu a budících napětí tranzistorů T1 a T2.....	78
Obr. 6.14	Zapojení pro měření rozdílů napětí.....	79
Obr. 7.1	Vnitřní struktura [24].....	81
Obr. 7.2	Blokové schéma [24].....	82
Obr. 7.3	Závislost výstupního napětí V_{OUT} na velikosti protékajícího proudu [24].....	82
Obr. 7.4	Blokové schéma DPO.....	83
Obr. 7.5	Aplikační zapojení [24].....	84
Obr. 7.6	Zapojení jednoho kanálu obvodu proudových ochran.....	84
Obr. 7.7	Napájecí obvody DPO.....	85
Obr. 7.8	Měření komparačních napětí.....	87
Obr. 7.9	Schéma implementace DPO do balancéru.....	88

SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1	Základní parametry nejběžnějších typů akumulátorů.....	19
Tab. 4-1	Logické stavy na vstupech a výstupech DKS.....	47
Tab. 4-2	Logické stavy na výstupu okénkového diskriminátoru	52
Tab. 4-3	Logické stavy vstupů a výstupů obvodů vyhodnocovací logiky	53
Tab. 4-4	Funkce obvodu CMOS4013	55
Tab. 4-5	Funkce obvodu CMOS4012	57
Tab. 4-6	Funkce hodinového obvodu CMOS4060	58
Tab. 4-7	Dostupné kmitočty (časy) na výstupech obvodu CMOS4060.....	58
Tab. 6-1	Požadované a naměřené hodnoty napájecích napětí.....	69
Tab. 6-2	Požadované, naměřené a nastavené hodnoty okénkového diskriminát .	70
Tab. 6-3	Požadované, naměřené a nastavené hodnoty vyhodnocovací a řídicí logiky	71
Tab. 6-4	Naměřené hodnoty napětí pro řízení PWM v závislosti na velikosti ΔU ..	73
Tab. 6-5	Naměřené hodnoty zdroje konstantního kmitočtu pro PWM.....	74
Tab. 6-6	Požadované a naměřené hodnoty napájecích napětí	76
Tab. 6-7	Tabulka přenosu logických proměnných ze vstupu na výstup	77
Tab. 6-8	Dosažené výstupní parametry balancéru	80
Tab. 7-1	Požadované a naměřené hodnoty napájecích napětí.....	87
Tab. 7-2	Požadované, naměřené a nastavené hodnoty komparačních napětí	88

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Filip, R.: Studie zástavby mobilního spojovacího uzlu. Bakalářská práce, Pardubice, UPCE, 2007
- [2] Filip, R.: Spínané zdroje. Ročníkový projekt, Pardubice, UPCE, 2008
- [3] Filip, R.: Zjišťování stavu nabití akumulátorů – studie. Ročníkový projekt, Pardubice, UPCE, 2009
- [4] Punčochář, J. Operační zesilovače v elektronice. Praha, BEN, 1996, 480 s., ISBN 80-901984-3-0
- [5] Jedlička, P. Přehled obvodů řady CMOS 4000 díl 1. Praha, BEN, 1994, 182 s., ISBN neuvedeno
- [6] Jedlička, P. Přehled obvodů řady CMOS 4000 díl 2. Praha, BEN, 1994, 254 s., ISBN neuvedeno
- [7] Cenek, M.: Akumulátory od principu k praxi. Praha, FCC PUBLIC 2003, 247 s., ISBN 80-86534-03-0
- [8] Hammerbauer, J.: Elektronické napájecí zdroje a akumulátory. Plzeň, ZCU, 1996, 181 s., ISBN neuvedeno
- [9] Marek, J.: Hermetické akumulátory v praxi. Praha, IN-EL, 2004, 140s., ISBN 80-86230-34-1
- [10] Krejčířík, A.: Napájecí zdroje I. Praha, BEN, 1996, 351 s., ISBN 80-86056-02-3
- [11] Krejčířík, A.: DC/DC měniče. Praha, BEN, 2001, 109 s., ISBN 80-7300-045-8
- [12] Faktor, Z.: Transformátory a tlumivky pro spínané zdroje. Praha, BEN, 2002, 243 s., ISBN 80-86056-91-0
- [13] Mikulec, M., Havlíček, V.: Základy teorie elektronických obvodů 1. Praha. ČVUT, 2002, 252 s., ISBN 80-01-02519-5
- [14] Jansa, J.: Železoprachové toroidní tlumivky. Praktická elektronika A Radio č. 8/1997, ISSN 1211-328X
- [15] Jansa, J.: Tlumivky s práškovými jádry pro spínané zdroje. Praktická elektronika A Radio č. 1/2004, ISSN 1211-328X
- [16] Jansa, J.: Návrh tlumivky akumulčního vzestupného měniče. Praktická elektronika A Radio č. 6/2004, ISSN 1211-328X
- [17] Jansa, J.: Cívka. Praktická elektronika A Radio č. 1/2008, ISSN 1211-328X

SEZNAM WWW STRÁNEK

- [18] P MEC spol. s r.o., výrobce cívek a tlumivek, Šumperk, online:
<http://www.pmec.cz/>, cit. 2. 5. 2009
- [19] Micrometals, Inc, výrobce jader cívek, Anaheim, USA, online:
<http://www.micrometals.com/>, cit. 2. 5. 2009
- [20] GES-ELECRONICS, a.s., prodejce elektronických součástek, Plzeň,
online: <http://www.ges.cz/>, cit. 2. 5. 2009
- [21] Integrované senzory proudu, online:
<http://automatizace.hw.cz/integrované-senzory-proudu-a-problematika-použití-1cast>, cit. 2. 5. 2009
- [22] Allegro MicroSystems, Inc., výrobce elektronických senzorů proudu,
Worcester USA, online: <http://www.allegromicro.com/en/>, cit. 2. 5. 2009
- [23] Katalogový list obvodu IXDD409, online:
http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/270/254460_DS.pdf,
cit. 2.5.2009
- [24] Katalogový list obvodu ACS712, online:
http://www.allegromicro.com/en/Products/Part_Numbers/0712/0712.pdf,
cit. 2. 5. 2009
- [25] Katalogový list obvodu MC1558, online:
http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/M/C/1/5/MC1558.shtml,
cit. 2. 5. 2009
- [26] Katalogový list obvodu NE555, online:
http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/N/E/5/5/NE555.shtml,
cit. 2. 5. 2009
- [27] Katalogový list obvodu TL494, online:
http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/T/L/4/9/TL494.shtml,
cit. 2. 5. 2009
- [28] Katalogový list obvodu LM358, online:
http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/L/M/3/5/LM358.shtml,
cit. 2. 5. 2009
- [29] Katalogový list obvodu CD4011, online:
http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/C/D/4/0/CD4011.shtml,
cit. 2. 5. 2009
- [30] Katalogový list obvodu CD4012, online:
http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/C/D/4/0/CD4012.shtml,
cit. 2. 5. 2009
- [31] Katalogový list obvodu CD4013, online:
<http://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=CD4013>,
cit. 2. 5. 2009

- [32] Katalogový list obvodu CD4060, online:
http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/C/D/4/0/CD4060.shtml,
cit. 2. 5. 2009
- [33] Katalogový list tranzistoru BUZ11, online:
http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/B/U/Z/1/BUZ11.shtml,
cit. 2. 5. 2009
- [34] Katalogový list tranzistoru IRF9640, online:
<http://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=IRF9640>, cit. 2. 5. 2009
- [35] Katalogový list diody MBR1060, online:
http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/M/B/R/1/MBR1060.shtml,
cit. 2. 5. 2009
- [36] Katalogový list stabilizátoru 7808, online:
<http://focuslab.lfp.uba.ar/Extension/BDS2005/7800.pdf>, cit. 2. 5. 2009
- [37] Katalogový list stabilizátoru 7908, online:
<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/22620/STMICROELECTRONICS/L7900.html>, cit. 2. 5. 2009
- [38] Katalogový list stabilizátoru 78L05, online:
<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/4450/MOTOROLA/MC78L00.html>, cit. 2. 5. 2009
- [39] Katalogový list akumulátoru SANYO KR-800AAE, online:
<http://sanyo.wslogic.com/pdf/pdfs/KR-800AAE.pdf>, cit. 2. 5. 2009
- [40] Katalogový list akumulátoru SAFT VH AAL 1700, online:
<http://www.saftbatteries.com/doc/Documents/rechargeable/Cube407/datasheet.4e60bedb-6dde-41a8-af95-d7a3a65196fb.pdf>, cit. 2. 5. 2009
- [41] Katalogový list akumulátoru PANASONIC LC-R127R2P, online:
<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/105667/PANASONIC/LC-R127R2P.html>, cit. 2. 5. 2009

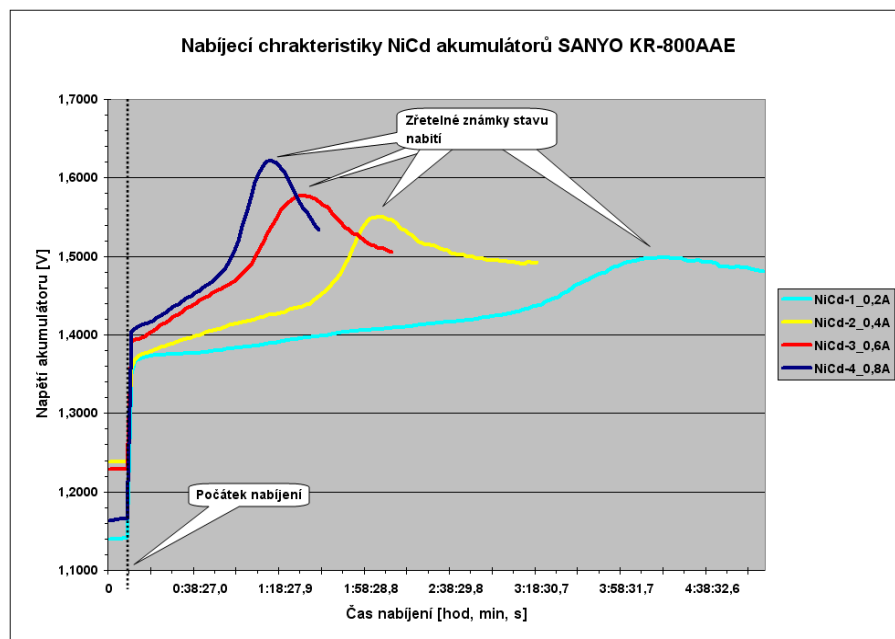
SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1-1 Prakticky naměřené nabíjecí charakteristiky Ni-Cd akumulátorů SANYO KR800AAE
- Příloha 1-2 Prakticky naměřené vybíjecí charakteristiky Ni-Cd akumulátorů SANYO KR800AAE
- Příloha 2-1 Prakticky naměřené nabíjecí charakteristiky Ni-MH AKU SAFT VH AAL 1700
- Příloha 2-2 Prakticky naměřené vybíjecí charakteristiky Ni-MH AKU
- Příloha 3-1 Nabíjecí charakteristika akumulátorů uspořádaných do baterie – 6 kusů
- Příloha 3-2 Prakticky naměřené nabíjecí charakteristiky hermetického olověného akumulátoru Panasonic při nabíjení zdrojem konstantního proudu
- Příloha 4-1 Prakticky naměřené nabíjecí charakteristiky olověného akumulátoru Panasonic při nabíjení zdrojem konstantního napětí
- Příloha 4-2 Prakticky naměřené vybíjecí charakteristiky olověného akumulátoru Panasonic
- Příloha 5-1 Prakticky naměřené nabíjecí charakteristiky tří sériově olověných akumulátorů Panasonic zapojených v sérii
- Příloha 5-2 Prakticky naměřená nabíjecí charakteristika olověného startovacího akumulátoru AKUMA Comfort
- Příloha 6-1 Prakticky naměřená vybíjecí charakteristika olověného startovacího akumulátoru AKUMA Comfort
- Příloha 7-1 Průběh budícího napětí
- Příloha 7-2 Průběh proudu tlumivkou
- Příloha 7-3 Průběh proudu odebíraného z akumulátoru A
- Příloha 8-1 Průběh proudu dodávaného do zátěže a do akumulátoru B
- Příloha 8-2 Souhrn průběhů proudů (viz. Příloha 7-2 Příloha 7-3 Příloha 8-1) při odpojené zátěži R_z
- Příloha 9-1 Průběhy budícího napětí tranzistoru T2 na výstupu IO3
- Příloha 9-2 Průběhy budícího napětí tranzistoru T1 na výstupu IO4
- Příloha 10-1 Řízení tranzistoru T2, aktivní kanál B, režim bez zátěže, pouze vyrovnávání kapacity AKU – vpravo patrný zásah PWM
- Příloha 10-2 Řízení tranzistoru T1, aktivní kanál A, režim bez zátěže, pouze vyrovnávání kapacity AKU - vpravo patrný zásah PWM1
- Příloha 10-3 Řízení tranzistoru T2, aktivní kanál B, režim se zátěží $5,5 \Omega$ (2,4 A) – vpravo patrný zásah PWM1
- Příloha 11-1 Řízení tranzistoru T1, aktivní kanál A, režim se zátěží $5,5 \Omega$ (2,4 A) - vpravo patrný zásah PWM
- Příloha 11-2 Řízení tranzistoru T2 (vlevo) a T1 (vpravo), režim se zátěží $16,5 \Omega$ (0,79 A) - vpravo patrný zásah PWM2
- Příloha 11-3 Řízení tranzistoru T2 (vlevo) a T1 (vpravo), režim se zátěží $3,3 \Omega$ (4 A)
- Příloha 12-1 Průběh rozdílového napětí ΔU na střední svorce mezi akumulátory +12 V-AKU při odběru z jednoho akumulátoru 0,8 A – nastaveny průměrné parametry

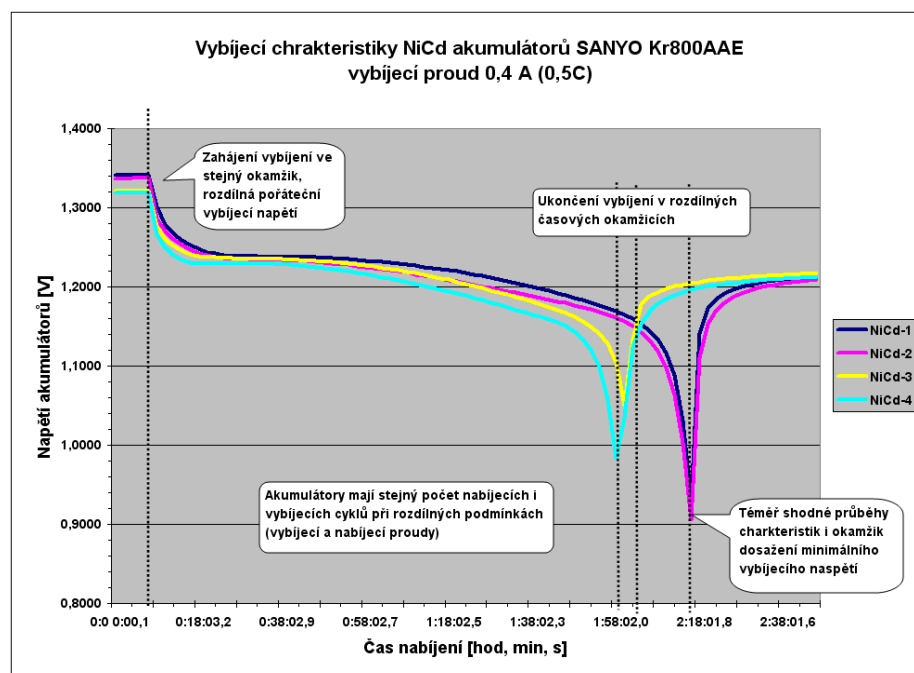
- Příloha 12-2 Průběh rozdílového napětí ΔU na střední svorce mezi akumulátory +12 V-AKU při odběru z jednoho akumulátoru 2,4 A – nastaveny průměrné parametry
- Příloha 12-3 Průběh rozdílového napětí ΔU na střední svorce mezi akumulátory +12 V-AKU při odběru z jednoho akumulátoru 4 A – nastaveny průměrné parametry
- Příloha 13-1 Průběh rozdílového napětí ΔU na střední svorce mezi akumulátory +12 V-AKU při odběru z jednoho akumulátoru 0,8 A – nastaveny maximální parametry
- Příloha 13-2 Průběh rozdílového napětí ΔU na střední svorce mezi akumulátory +12 V-AKU při odběru z jednoho akumulátoru 2,4 A – nastaveny maximální parametry
- Příloha 13-3 Průběh rozdílového napětí ΔU na střední svorce mezi akumulátory +12 V-AKU při odběru z jednoho akumulátoru 4 A – nastaveny maximální parametry
- Příloha 14-1 Osazená nepájivá kontaktní pole a universální plošný spoj
- Příloha 14-2 Měřicí pracoviště
- Příloha 15-1 DKS – plošný spoj
- Příloha 15-2 DŘ – plošný spoj
- Příloha 15-3 DPO – plošný spoj
- Příloha 16-1 DKS – osazovací plán
- Příloha 16-2 DŘ – osazovací plán
- Příloha 16-3 DPO – osazovací plán
- Příloha 17-1 DKS osazená
- Příloha 17-2 DŘ osazená
- Příloha 17-3 DPO osazená
- Příloha 18-1 Sestavený balancér
- Příloha 18-2 Zátěž pro testování balancéru
- Příloha 19-1 Rozpiska materiálu DŘ
- Příloha 22-1 Rozpiska materiálu DKS
- Příloha 24-1 Rozpiska materiálu DPO
- Příloha 25-1 Schéma DKS
- Příloha 26-1 Schéma DŘ
- Příloha 27-1 Schéma DPO

SEZNAM POUŽITÝCH MĚŘÍCÍCH PŘÍSTROJŮ A POMŮCEK

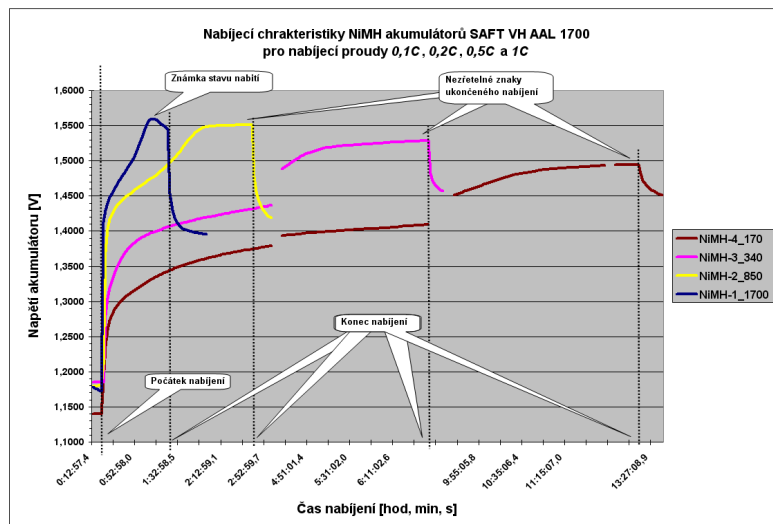
Měřicí přístroj	Typ	Výrobce
Osciloskop	EO213	RFT
Osciloskop	DSO3062A	Aligent Technologies
Multimetr	M-3640D	METEX
Multimetr	APPA305	APPA Technology Corporation
Stabilizovaný zdroj	M10-SP-305E	UNAOHM TECHNOLOGY S.r.l.
Čítač 10 Hz – 1 GHz	amatérská výroba	
Zátěž	10 x 33 Ω /10 W	
Převodník	RS232/USB	
Stolní počítač	P4; 2,4 GHz; 1024MB RAM	



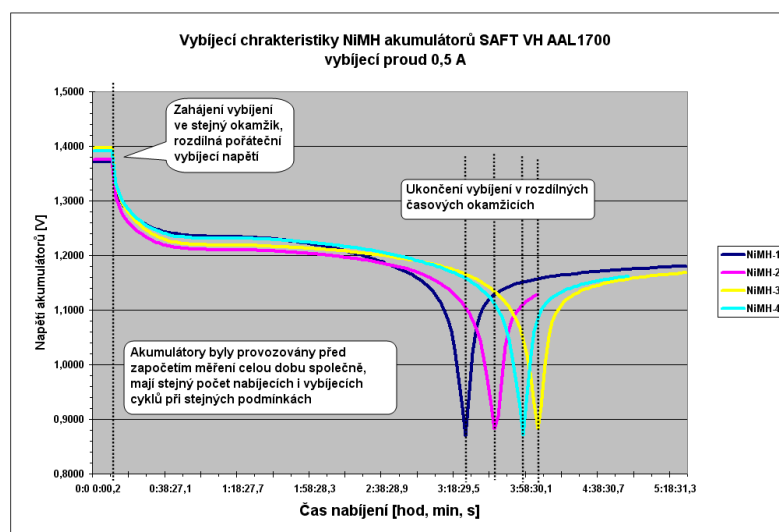
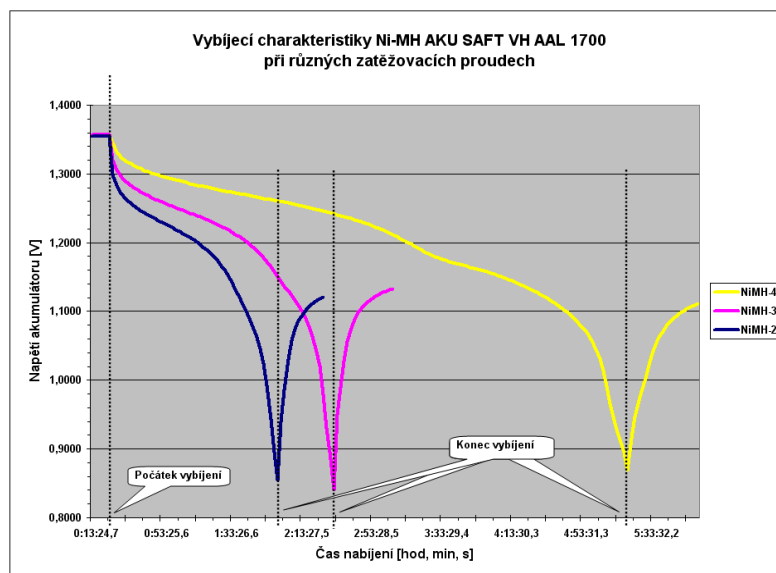
Příloha 1-1 Prakticky naměřené nabíjecí charakteristiky Ni-Cd akumulátorů SANYO KR800AAE



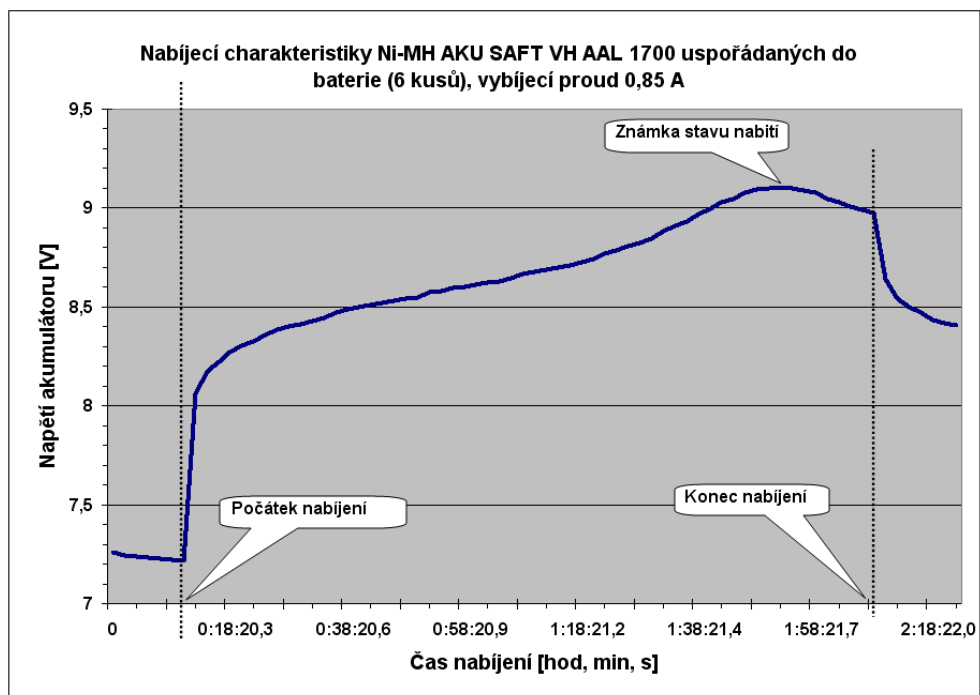
Příloha 1-2 Prakticky naměřené vybíjecí charakteristiky Ni-Cd akumulátorů SANYO KR800AAE



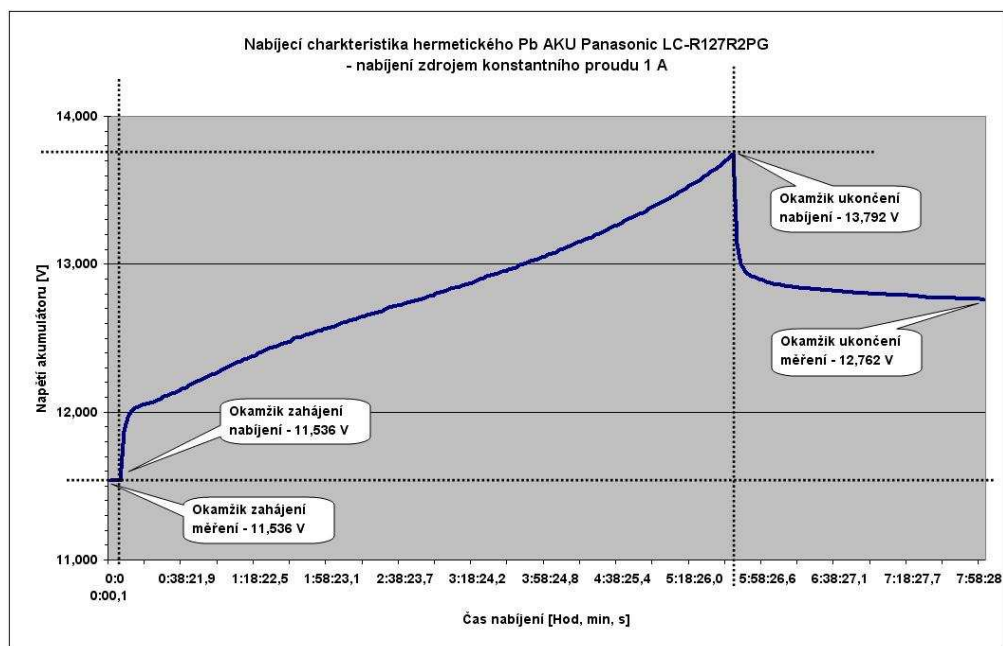
Příloha 2-1 Prakticky naměřené nabíjecí charakteristiky Ni-MH AKU SAFT VH AAL 1700



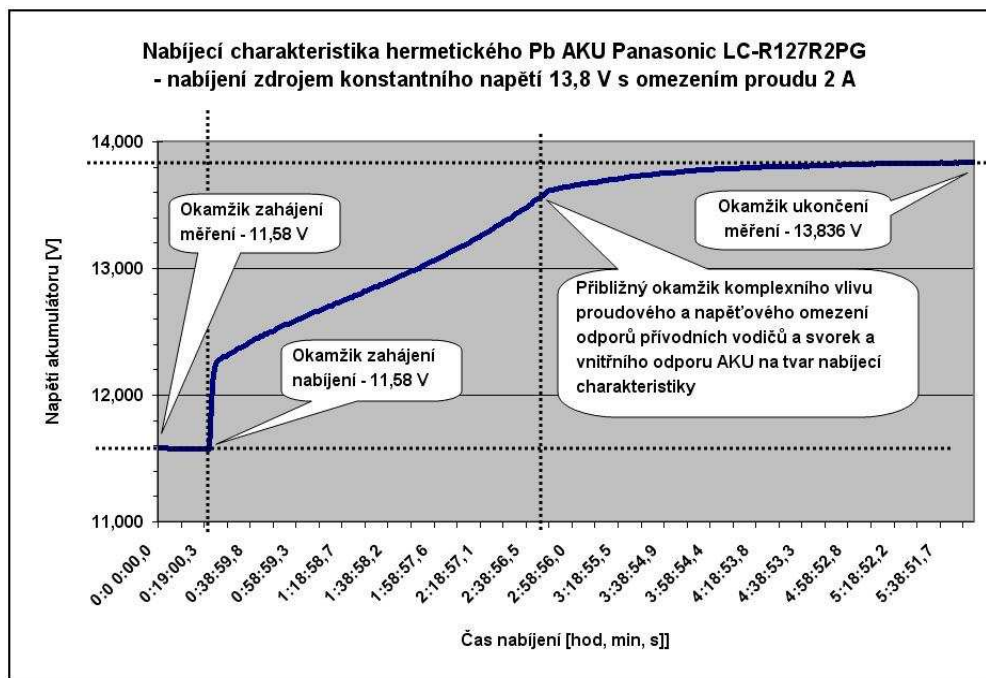
Příloha 2-2 Prakticky naměřené vybíjecí charakteristiky Ni-MH AKU



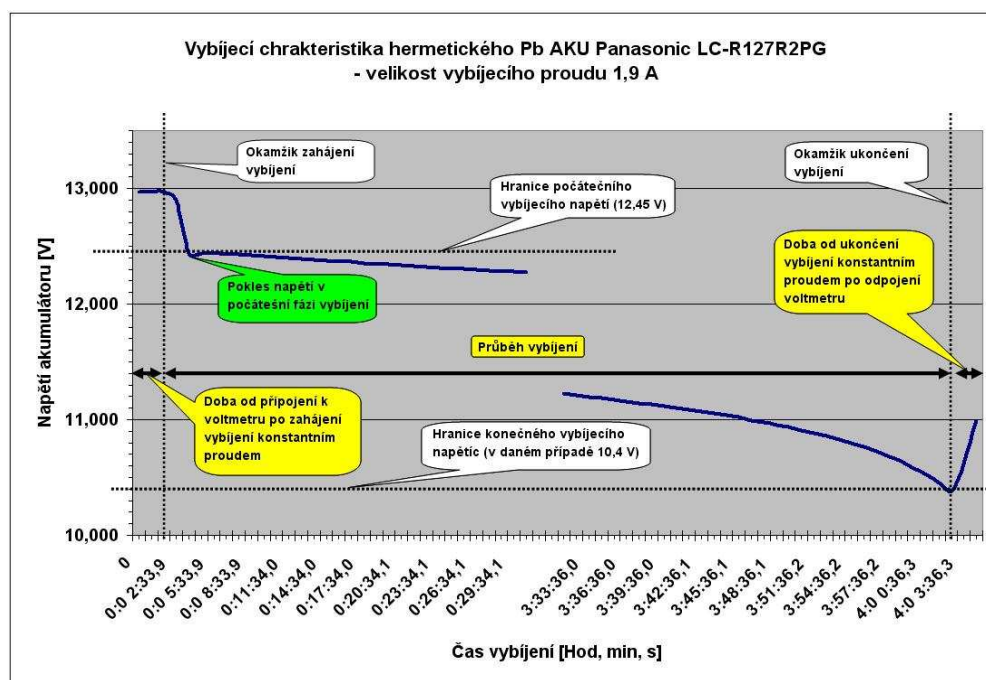
Příloha 3-1 Nabíjecí charakteristika akumulátorů uspořádaných do baterie – 6 kusů



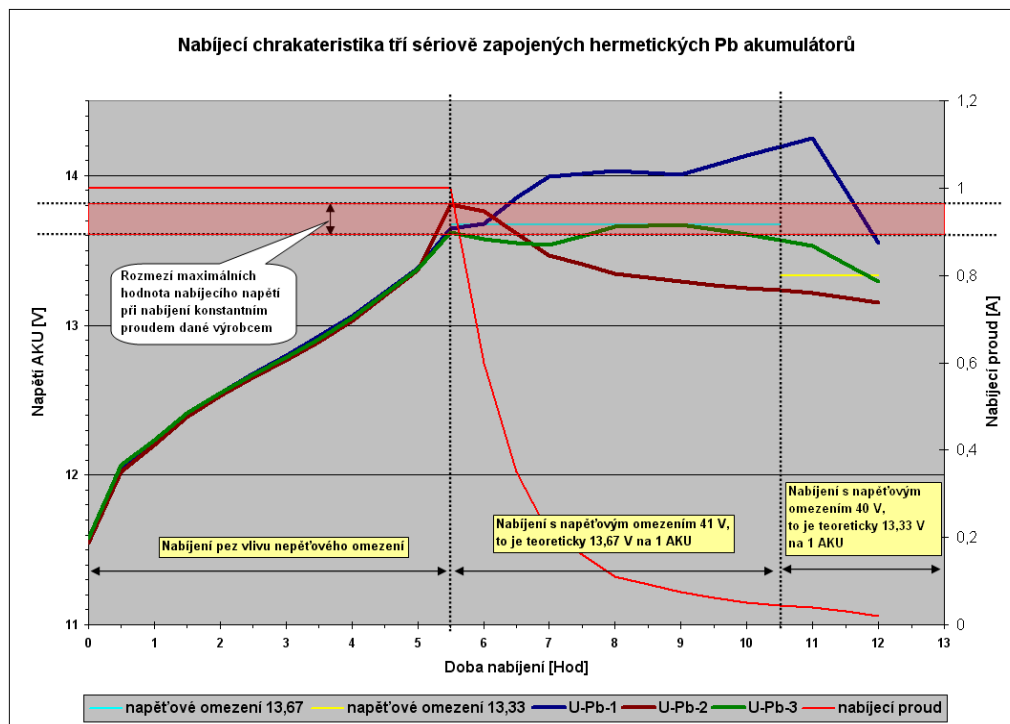
Příloha 3-2 Prakticky naměřené nabíjecí charakteristiky hermetického olověného akumulátoru Panasonic při nabíjení zdrojem konstantního proudu



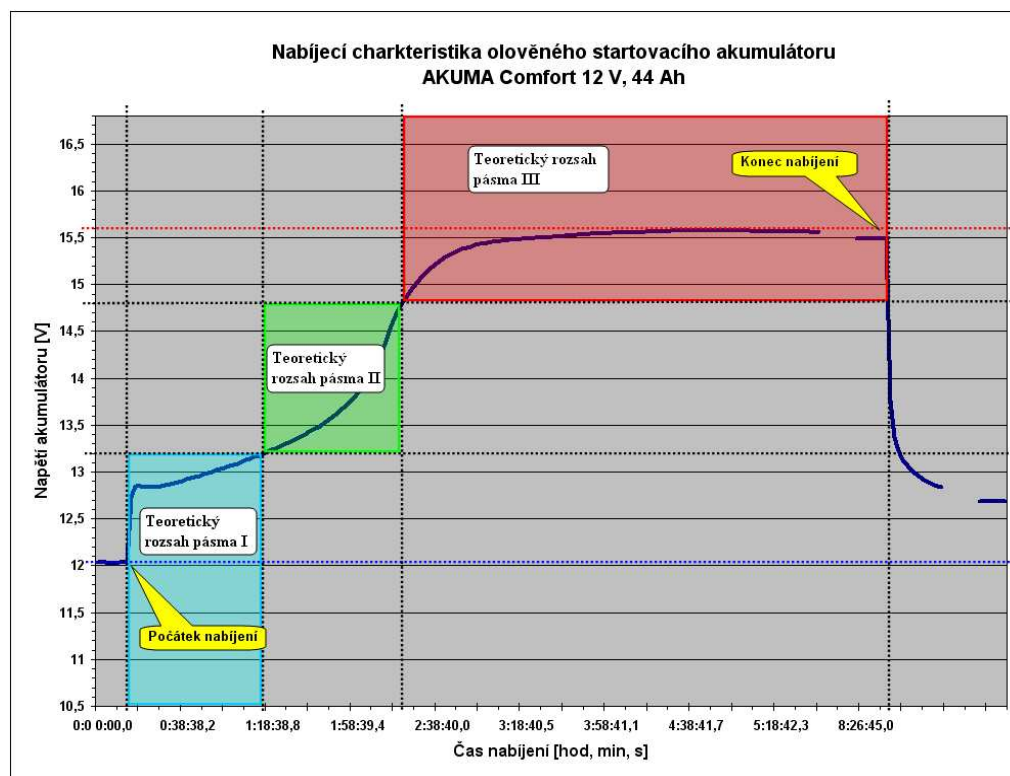
Příloha 4-1 Prakticky naměřené nabíjecí charakteristiky olověného akumulátoru Panasonic při nabíjení zdrojem konstantního napětí



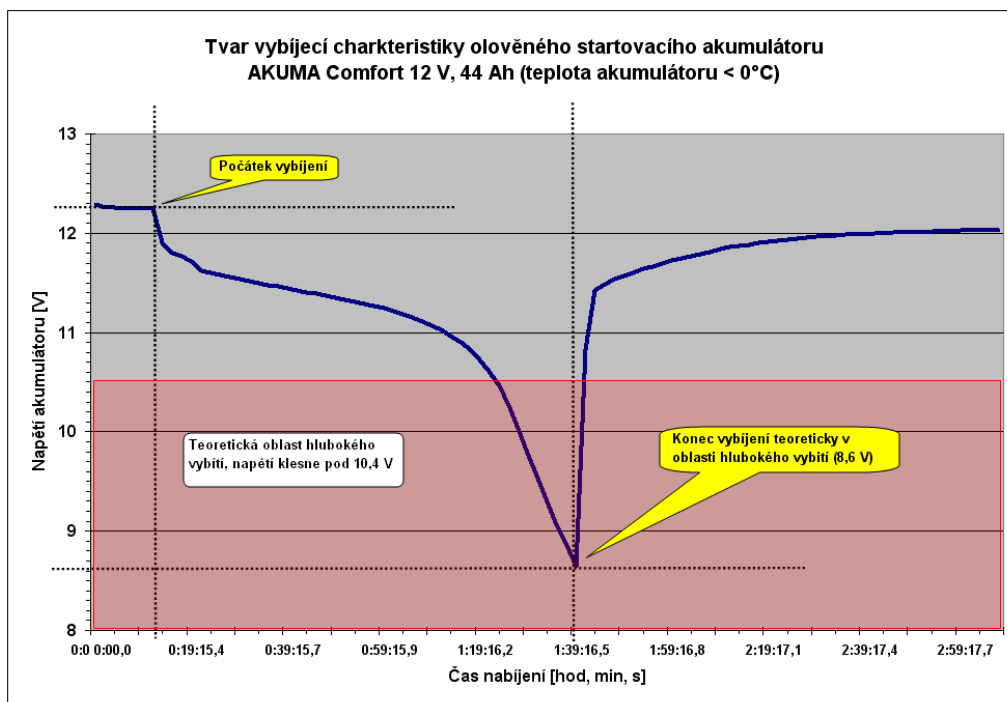
Příloha 4-2 Prakticky naměřené vybíjecí charakteristiky olověného akumulátoru Panasonic



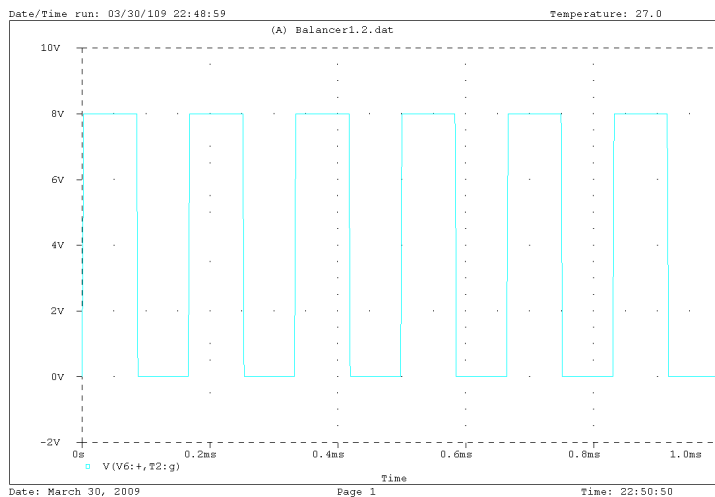
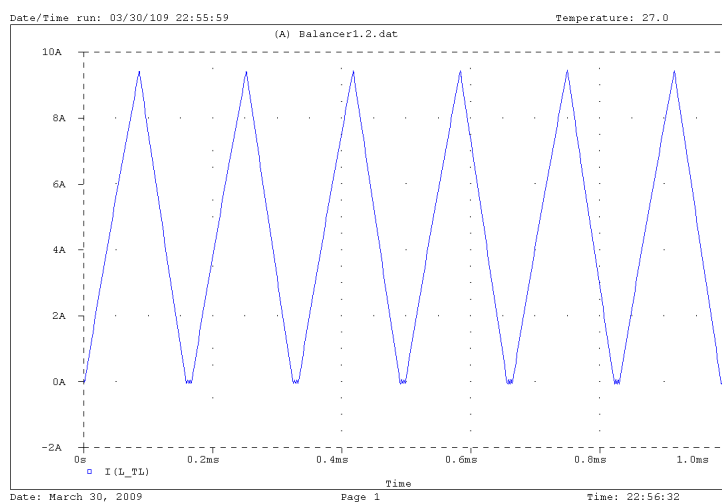
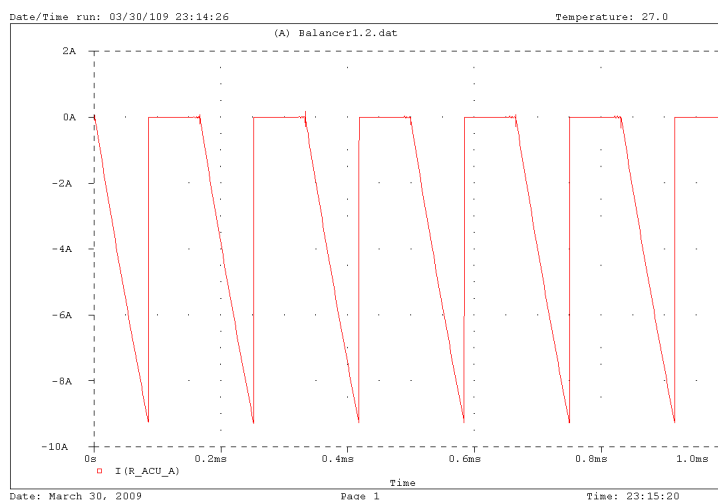
Příloha 5-1 Prakticky naměřené nabíjecí charakteristiky tří sériově olověných akumulátorů Panasonic zapojených v sérii

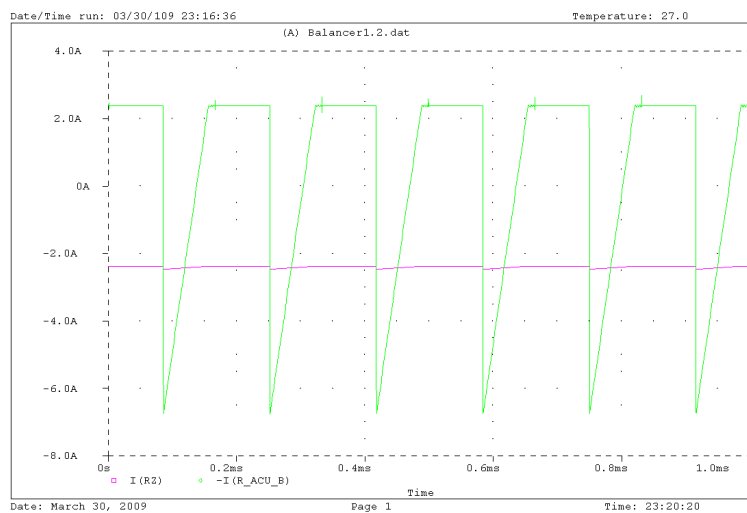


Příloha 5-2 Prakticky naměřená nabíjecí charakteristika olověného startovacího akumulátoru AKUMA Comfort

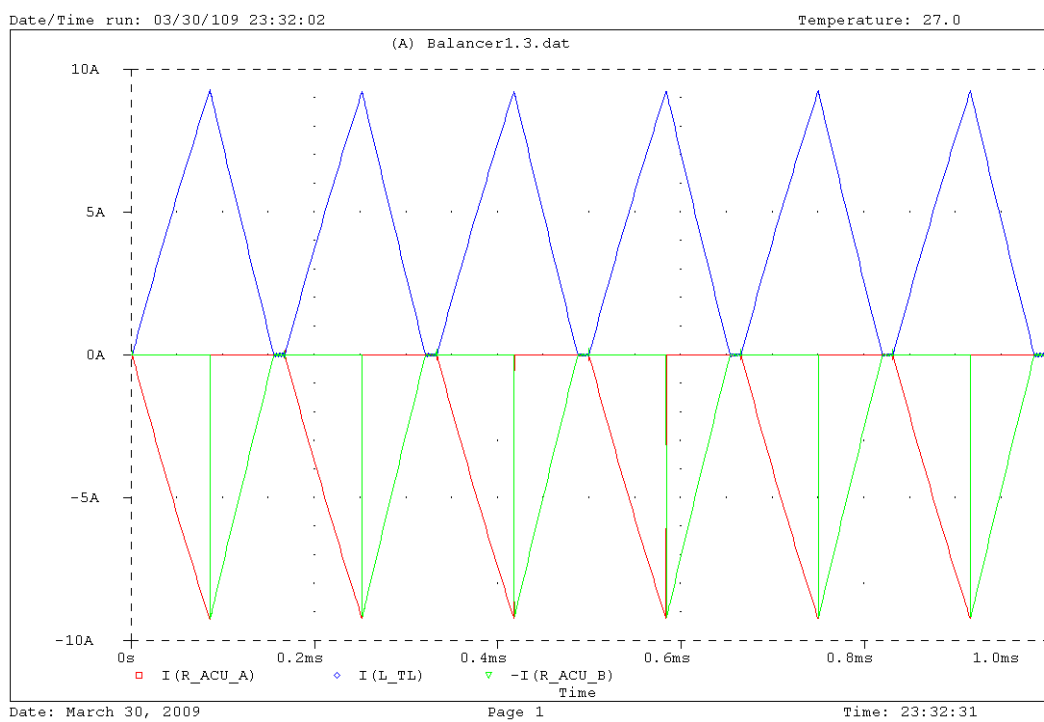


Příloha 6-1 Prakticky naměřená vybíjecí charakteristika olověného startovacího akumulátoru AKUMA Comfort

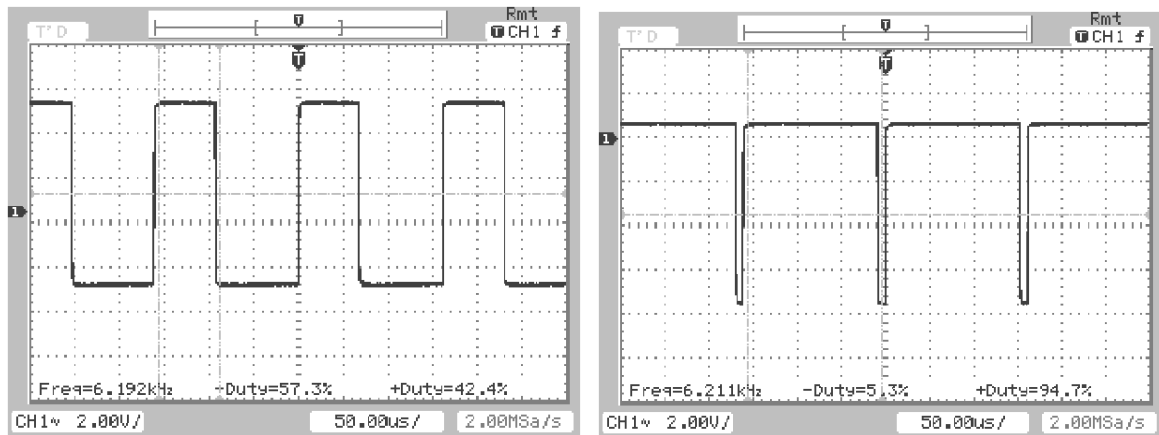
**Příloha 7-1 Průběh budicího napětí****Příloha 7-2 Průběh proudu tlumivkou****Příloha 7-3 Průběh proudu odebíraného z akumulátoru A**



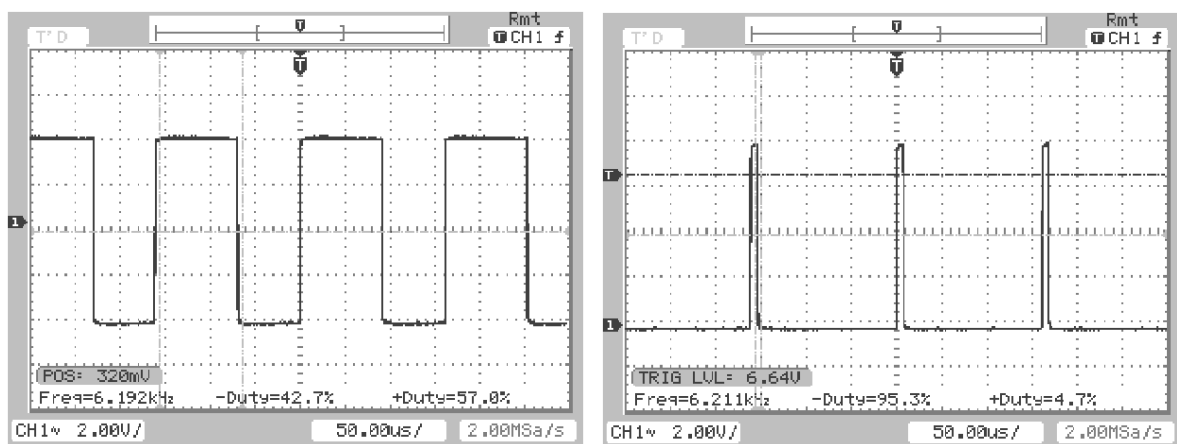
Příloha 8-1 Průběh proudu dodávaného do zátěže a do akumulátoru B



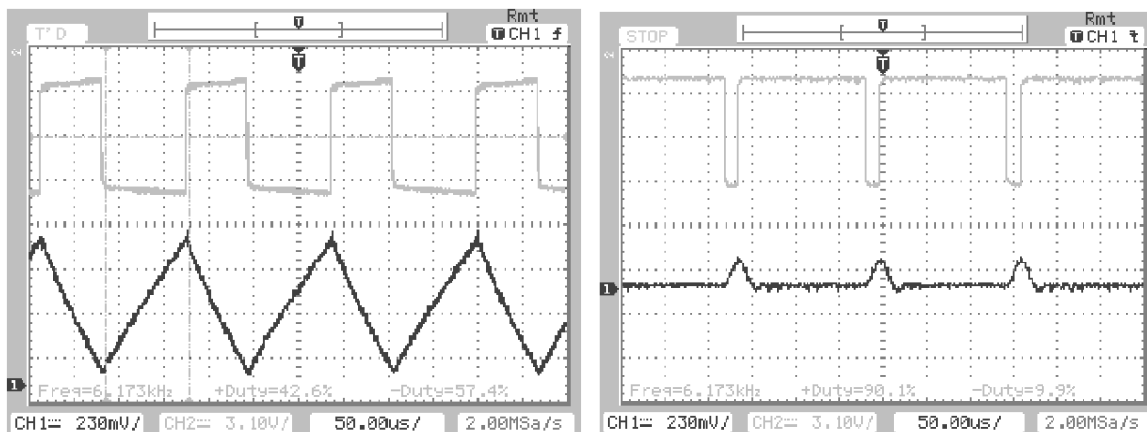
Příloha 8-2 Souhrn průběhů proudů (viz. Příloha 7-2 Příloha 7-3 Příloha 8-1) při odpojené zátěži Rz



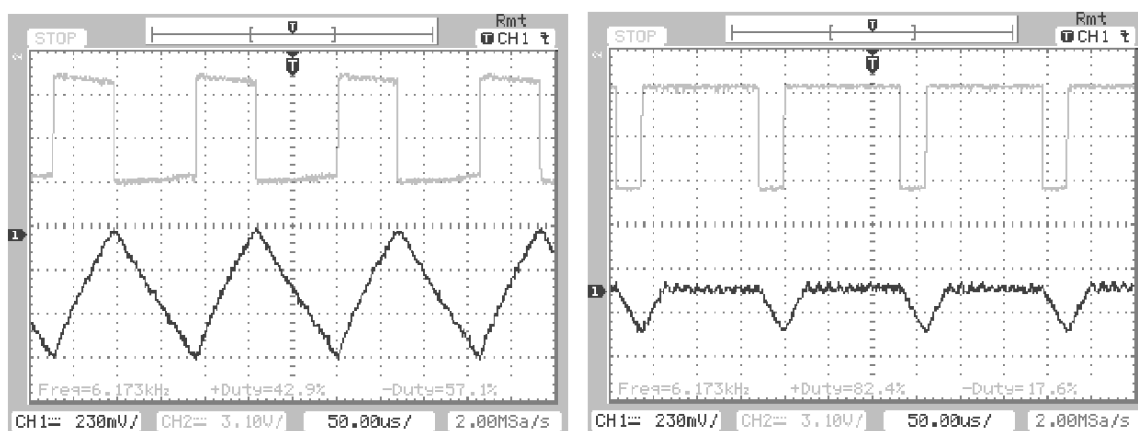
Příloha 9-1 Průběhy budícího napětí tranzistoru T2 na výstupu IO3



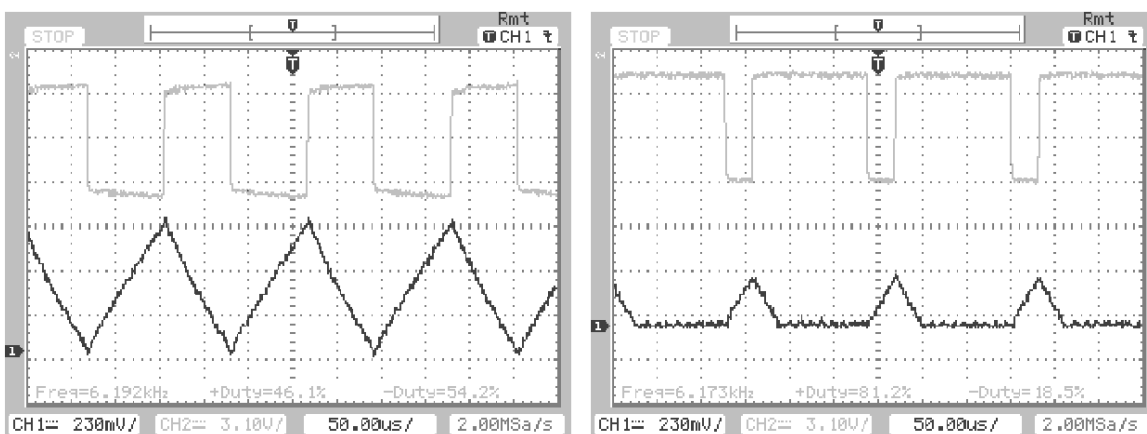
Příloha 9-2 Průběhy budícího napětí tranzistoru T1 na výstupu IO4



Příloha 10-1 Řízení tranzistoru T2, aktivní kanál B, režim bez zátěže, pouze vyrovnávání kapacity AKU – vpravo patrný zásah PWM¹

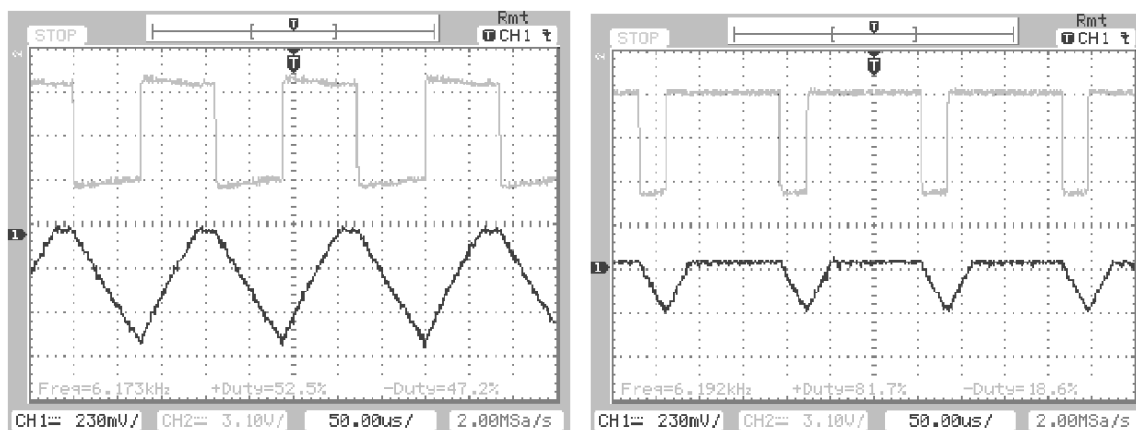


Příloha 10-2 Řízení tranzistoru T1, aktivní kanál A, režim bez zátěže, pouze vyrovnávání kapacity AKU - vpravo patrný zásah PWM¹

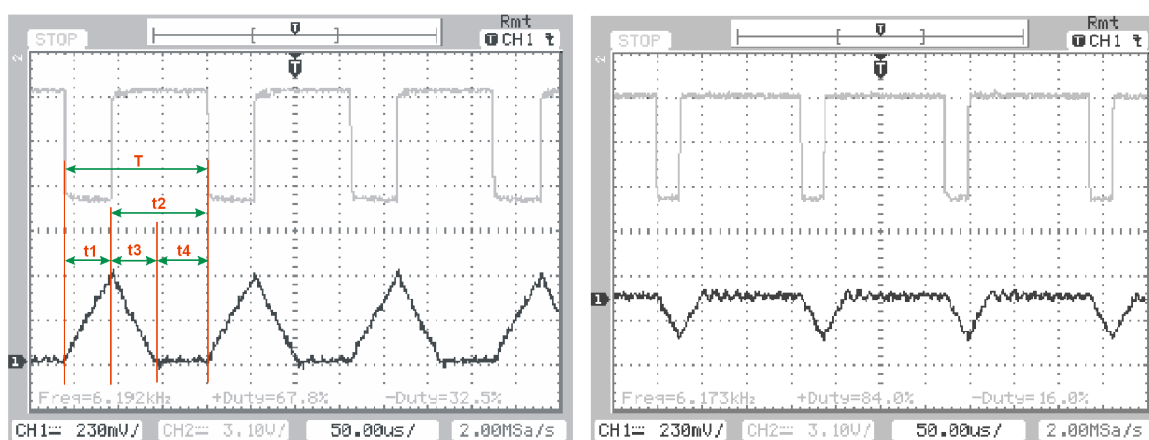


Příloha 10-3 Řízení tranzistoru T2, aktivní kanál B, režim se zátěží 5,5 Ω (2,4 A) – vpravo patrný zásah PWM¹

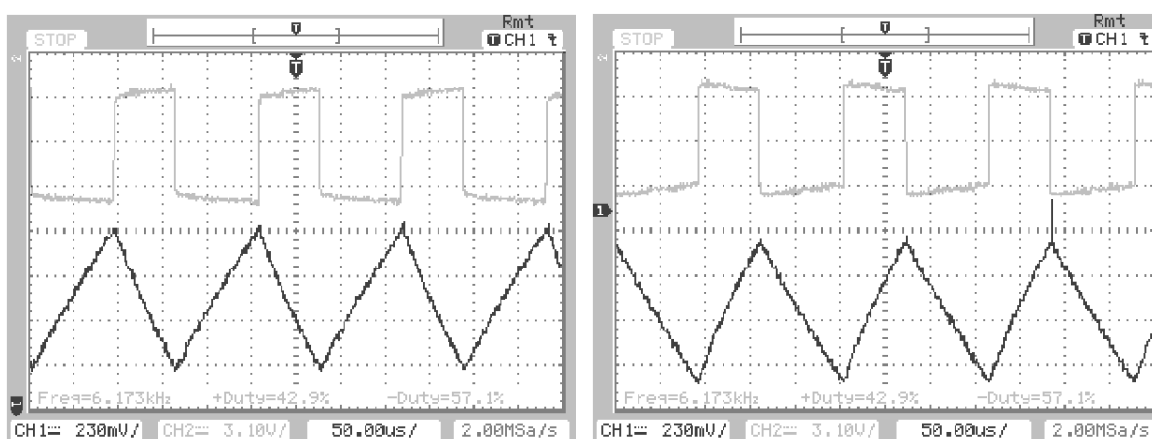
¹ CH1 zobrazuje proud tlumivkou TL, CH2 zobrazuje budící napětí výkonového tranzistoru



Příloha 11-1 Řízení tranzistoru T1, aktivní kanál A, režim se zátěží $5,5 \Omega$ (2,4 A) - vpravo patrný zásah PWM²

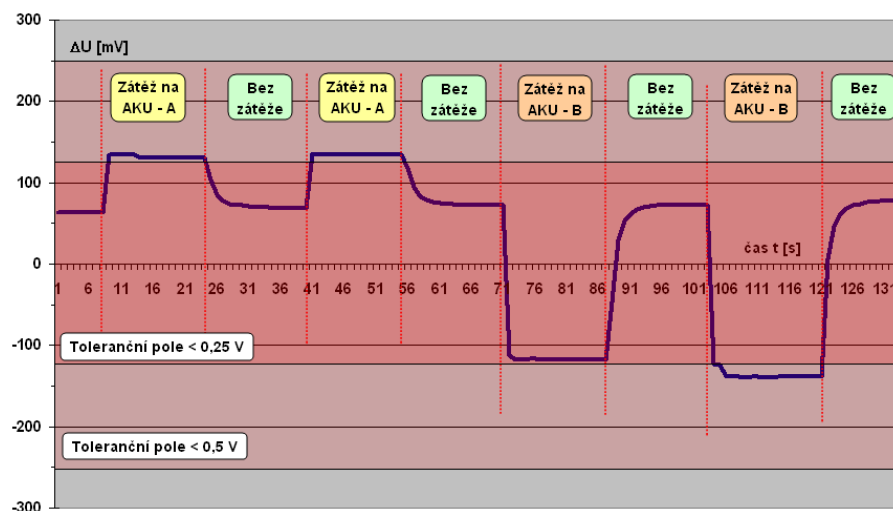


Příloha 11-2 Řízení tranzistoru T2 (vlevo) a T1 (vpravo), režim se zátěží $16,5 \Omega$ (0,79 A) - vpravo patrný zásah PWM²

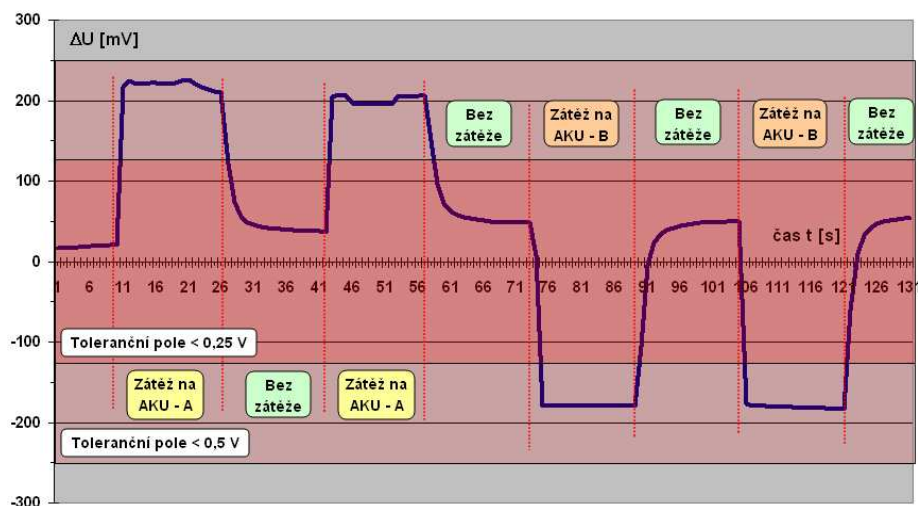


Příloha 11-3 Řízení tranzistoru T2 (vlevo) a T1 (vpravo), režim se zátěží $3,3 \Omega$ (4 A)²

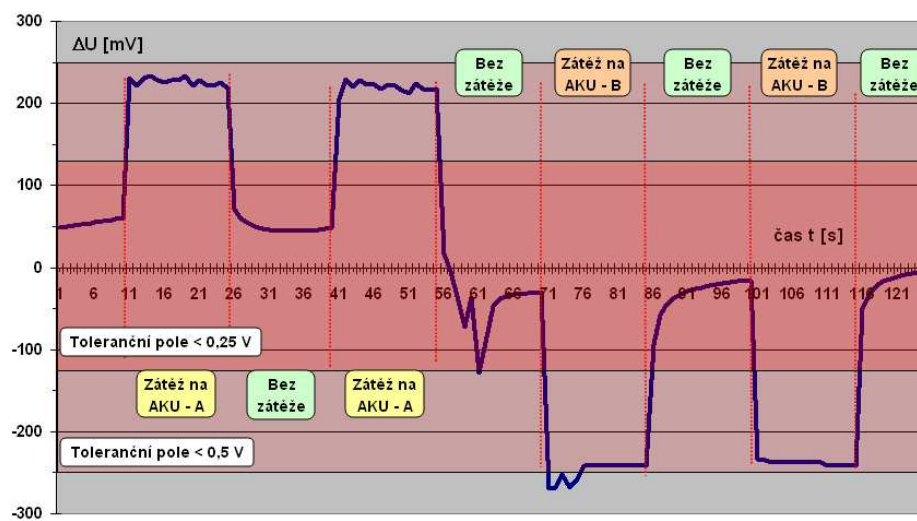
² CH1 zobrazuje proud tlumivkou TL, CH2 zobrazuje budící napětí



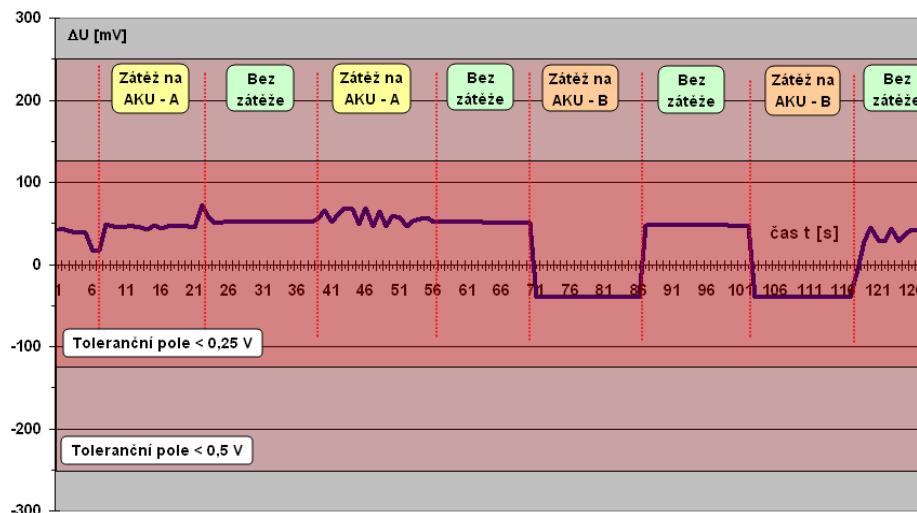
Příloha 12-1 Průběh rozdílového napětí ΔU na střední svorce mezi akumulátory +12 V-AKU při odběru z jednoho akumulátoru 0,8 A – nastaveny průměrné parametry



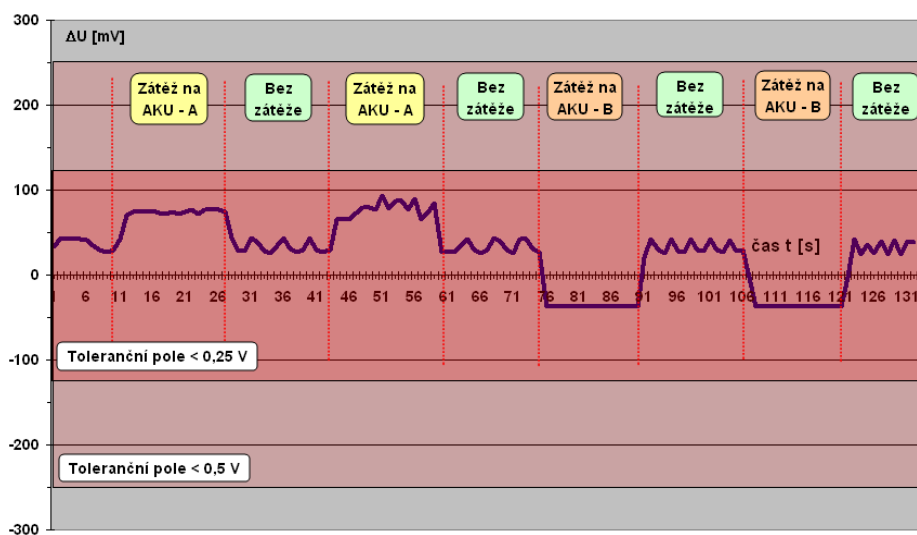
Příloha 12-2 Průběh rozdílového napětí ΔU na střední svorce mezi akumulátory +12 V-AKU při odběru z jednoho akumulátoru 2,4 A – nastaveny průměrné parametry



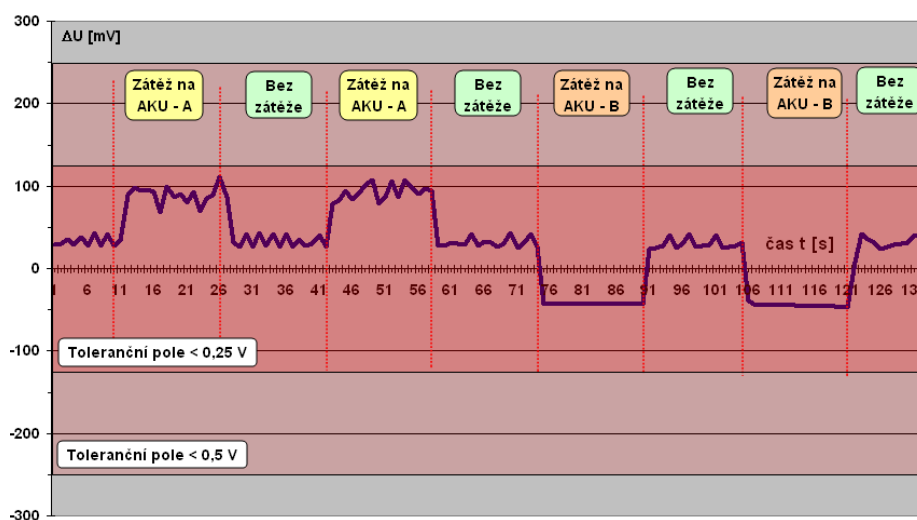
Příloha 12-3 Průběh rozdílového napětí ΔU na střední svorce mezi akumulátory +12 V-AKU při odběru z jednoho akumulátoru 4 A – nastaveny průměrné parametry



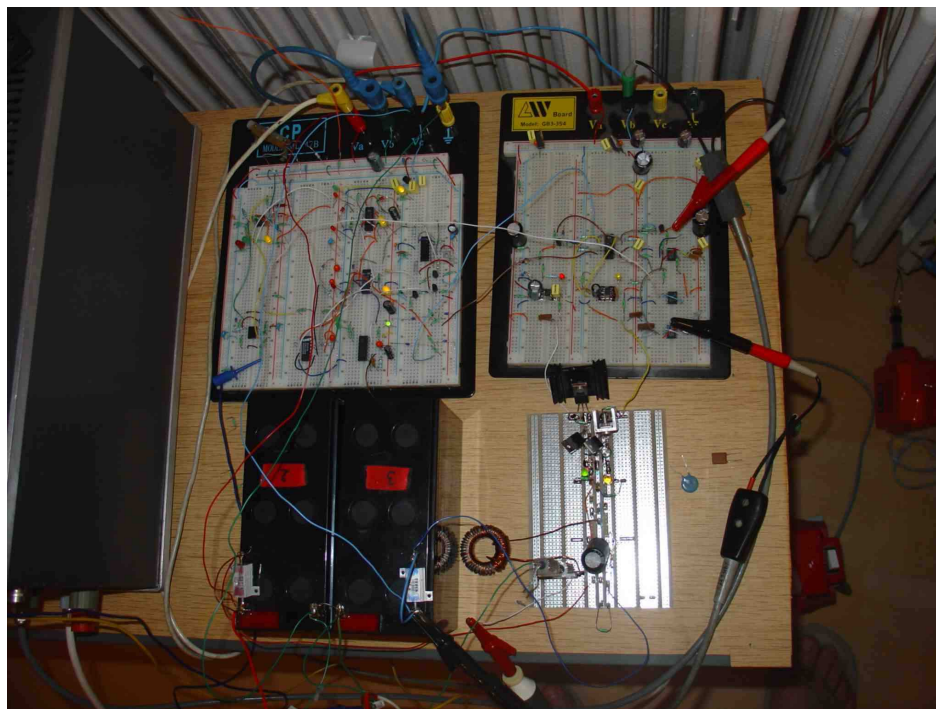
Příloha 13-1 Průběh rozdílového napětí ΔU na střední svorce mezi akumulátory +12 V-AKU při odběru z jednoho akumulátoru 0,8 A – nastaveny maximální parametry



Příloha 13-2 Průběh rozdílového napětí ΔU na střední svorce mezi akumulátory +12 V-AKU při odběru z jednoho akumulátoru 2,4 A – nastaveny maximální parametry



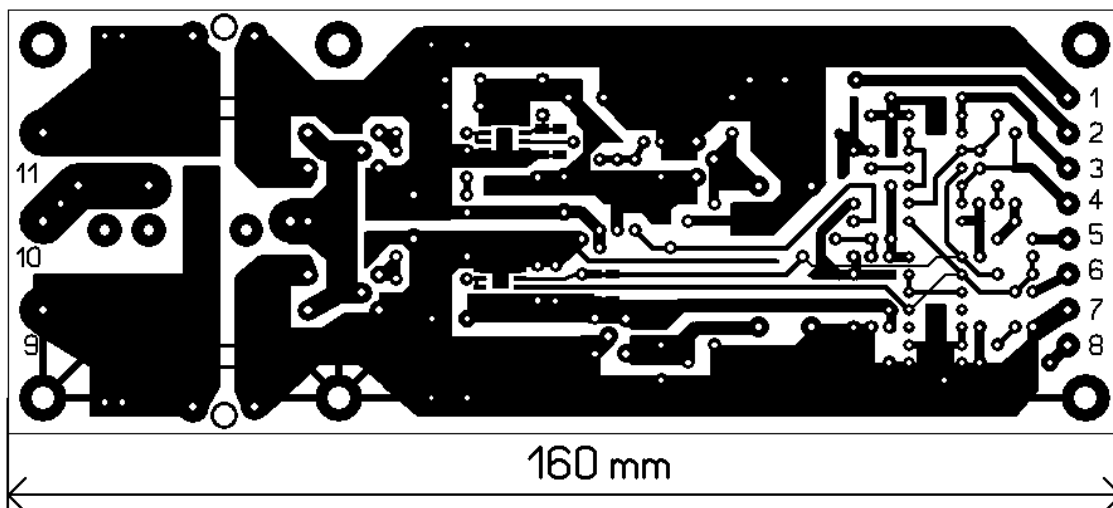
Příloha 13-3 Průběh rozdílového napětí ΔU na střední svorce mezi akumulátory +12 V-AKU při odběru z jednoho akumulátoru 4 A – nastaveny maximální parametry



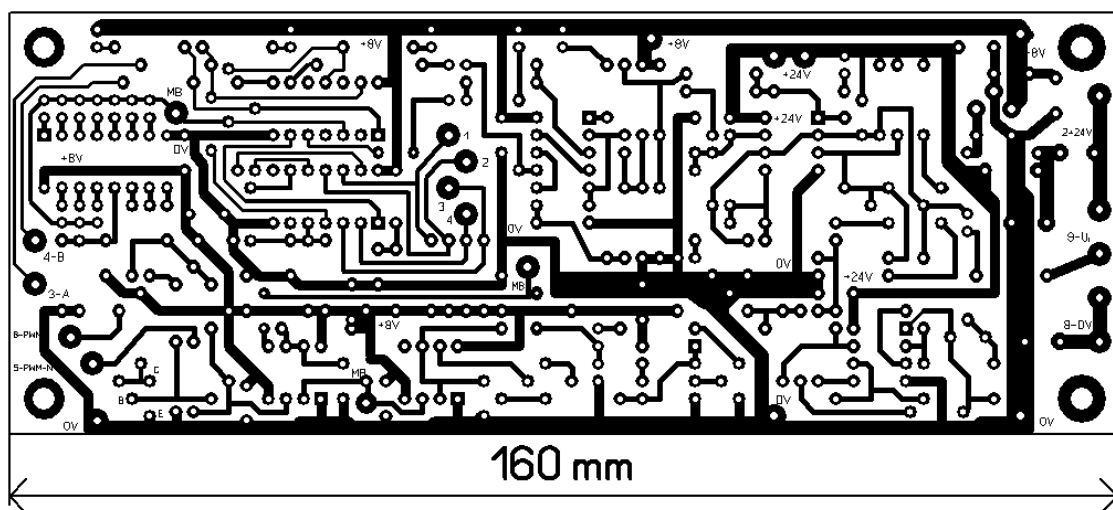
Příloha 14-1 Osazená nepájivá kontaktní pole a univerzální plošný spoj



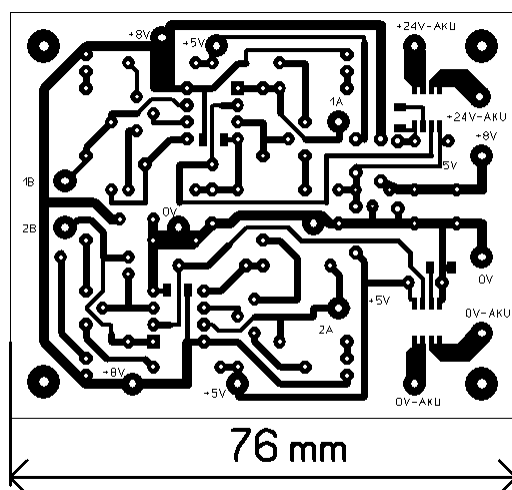
Příloha 14-2 Měřicí pracoviště



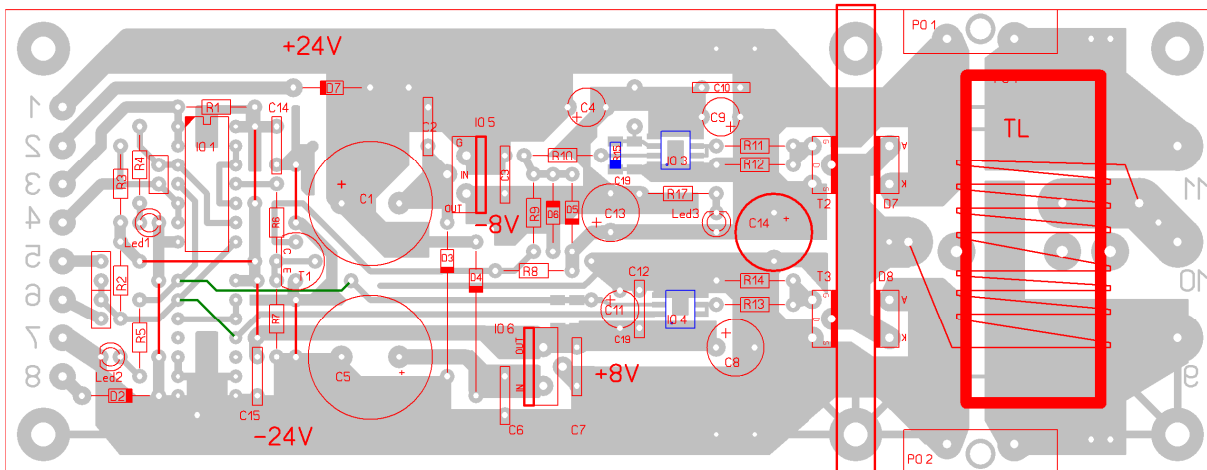
Příloha 15-1 DKS – plošný spoj



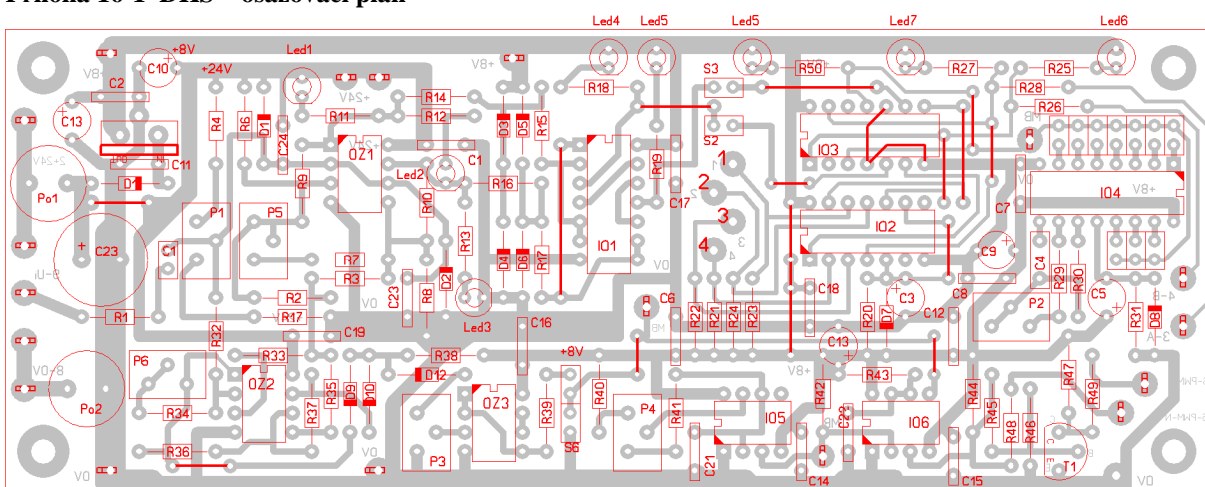
Příloha 15-2 DŘ – plošný spoj



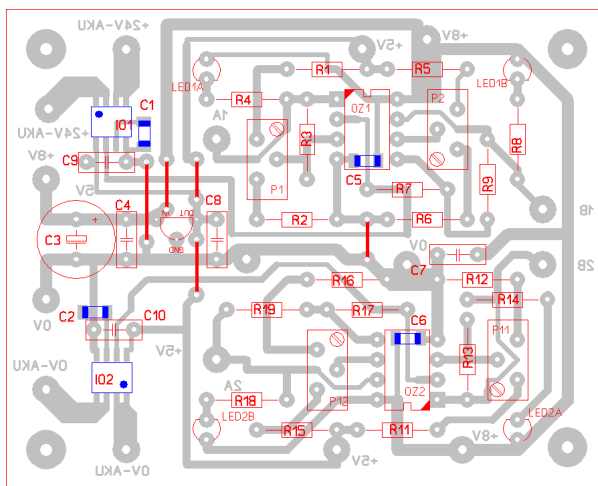
Příloha 15-3 DPO – plošný spoj



Příloha 16-1 DKS – osazovací plán



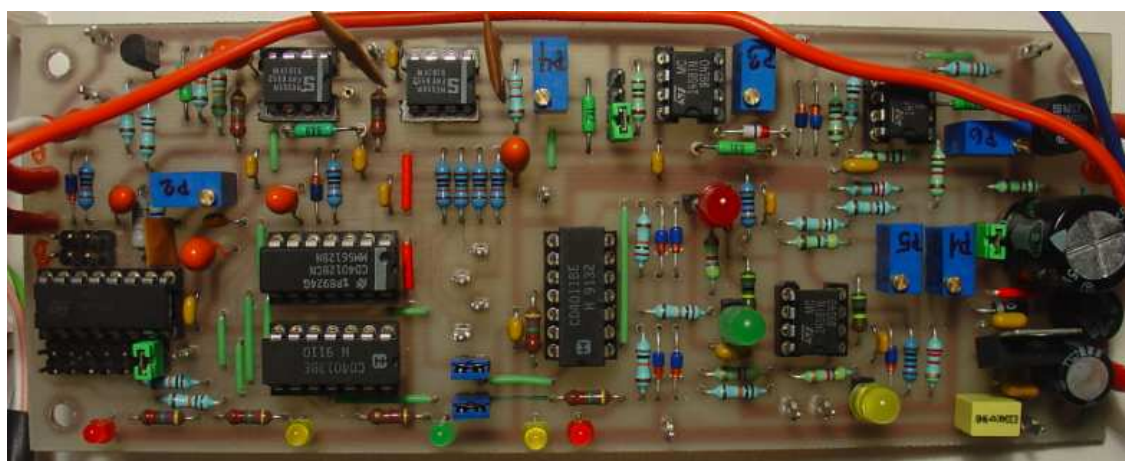
Příloha 16-2 DŘ – osazovací plán



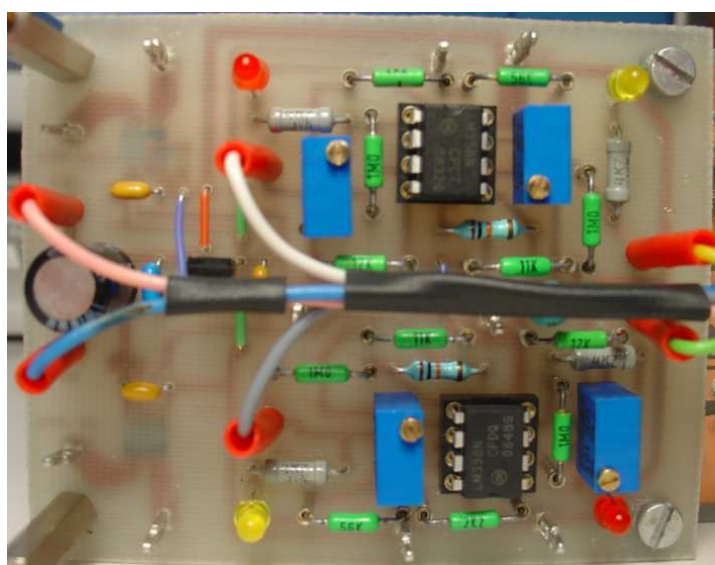
Příloha 16-3 DPO – osazovací plán



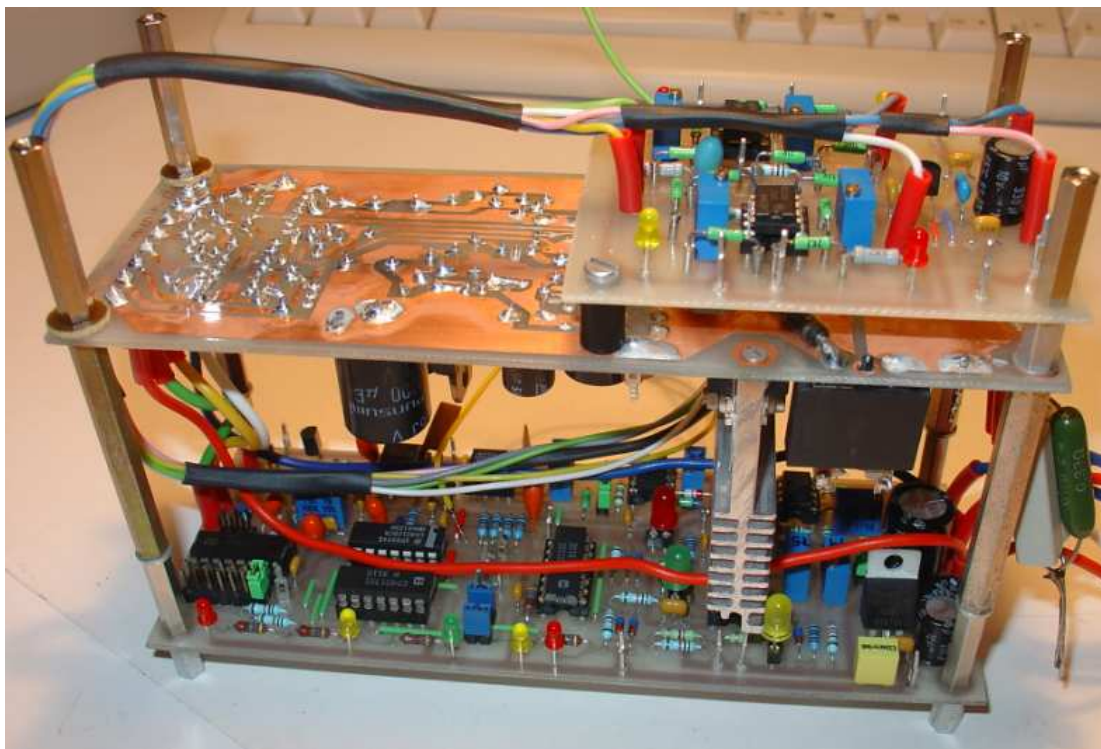
Příloha 17-1 DKS osazená



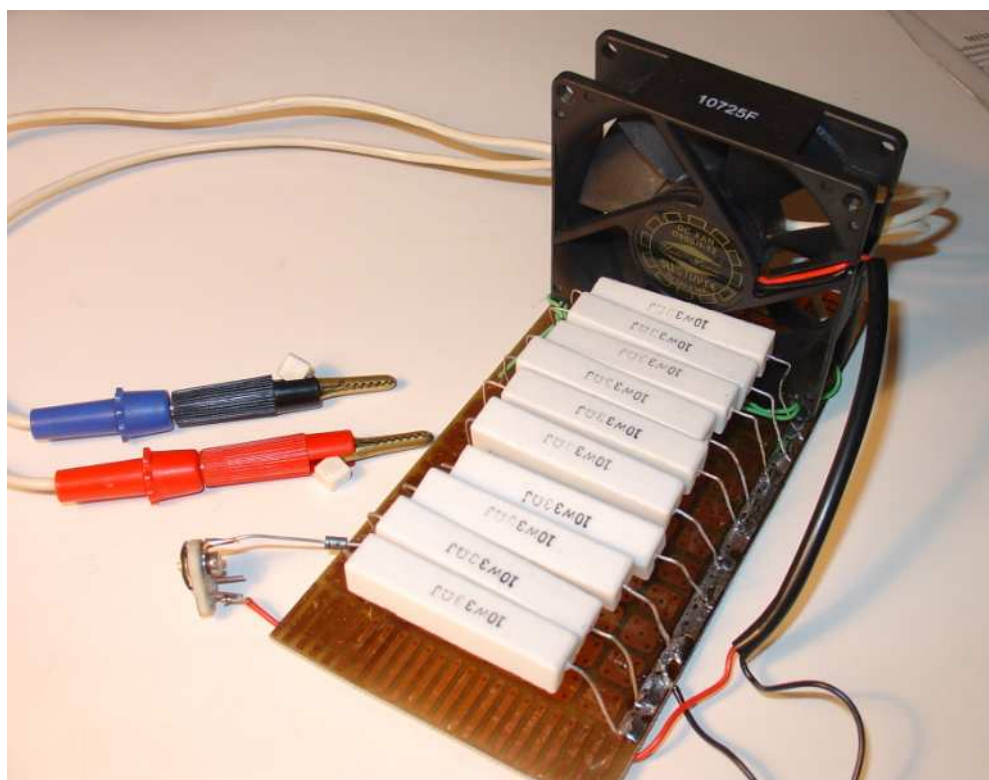
Příloha 17-2 DŘ osazená



Příloha 17-3 DPO osazená



Příloha 18-1 Sestavený balancér



Příloha 18-2 Zátěž pro testování balancéru

Rozpiska materiálu desky řízení DŘ

Poř. číslo	Název	Označení	Typ	Hodnota	Výkon, napětí, jiné	Alternativní velikost (rozetč, průměr, x*y)
1	Rez.	R1	SMA 0207	100	0,5 W	10
2		R2	SMA 0207	10 k	0,5 W	10
3		R3	SMA 0207	10 k	0,5 W	10
4		R4	SMA 0207	2,2 k	0,5 W	10
5		R5	SMA 0207	2,2 k	0,5 W	10
6		R6	SMA 0207	10 k	0,5 W	10
7		R7	SMA 0207	47	0,5 W	10
8		R8	SMA 0207	10 k	0,5 W	10
9		R9	SMA 0207	4,7 M	0,5 W	10
10		R10	SMA 0207	4,7 M	0,5 W	10
11		R11	SMA 0207	4,7 k	0,5 W	10
12		R12	SMA 0207	4,7 k	0,5 W	10
13		R13	SMA 0207	4,7 k	0,5 W	10
14		R14	SMA 0207	10 k	0,5 W	10
15		R15	SMA 0207	10 k	0,5 W	10
16		R16	SMA 0207	10 k	0,5 W	10
17		R17	SMA 0207	10 k	0,5 W	10
18		R18	SMA 0207	4,7 k	0,5 W	10
19		R19	SMA 0207	4,7 k	0,5 W	10
20		R20	SMA 0207	100 k	0,5 W	10
21		R21	SMA 0207	100 k	0,5 W	10
22		R22	SMA 0207	100 k	0,5 W	10
23		R23	SMA 0207	100 k	0,5 W	10
24		R24	SMA 0207	100 k	0,5 W	10
25		R25	SMA 0207	4,7 k	0,5 W	10
26		R26	SMA 0207	10 k	0,5 W	10
27		R27	SMA 0207	4,7 k	0,5 W	10
28		R28	SMA 0207	10 k	0,5 W	10
29		R29	SMA 0207	47 k	0,5 W	10
30		R30	SMA 0207	470 k	0,5 W	10
31		R31	SMA 0207	100 k	0,5 W	10
32		R32	SMA 0207	1 k	0,5 W	10
33		R33	SMA 0207	1 k	0,5 W	10
34		R34	SMA 0207	33 k	0,5 W	10
35		R35	SMA 0207	1 k	0,5 W	10
36		R36	SMA 0207	10 k	0,5 W	10
37		R37	SMA 0207	10 k	0,5 W	10
38		R38	SMA 0207	1 k	0,5 W	10
39		R39	SMA 0207	100	0,5 W	10
40		R40	SMA 0207	1,2 k	0,5 W	10
41		R41	SMA 0207	3,3 k	0,5 W	10
42		R42	SMA 0207	4,7 k	0,5 W	10
43		R43 - výběr	SMA 0207	6,8 k	0,5 W	10
44		R44	SMA 0207	4,7 k	0,5 W	10
45		R45	SMA 0207	27 k	0,5 W	10
46		R46	SMA 0207	5,6 k	0,5 W	10

47		R47	SMA 0207	10 k	0,5 W	10
48		R48	SMA 0207	10 k	0,5 W	10
49		R49	SMA 0207	10 k	0,5 W	10
50		R50	SMA 0207	4,7 k	0,5 W	10
54	Trimr	P1	64Y	500		5 x 2,5
55		P2	64Y	100 k		5 x 2,5
56		P3	64Y	10 k		5 x 2,5
57		P4	64Y	2 k		5 x 2,5
58		P5	64Y	500		5 x 2,5
59		P6	64Y	100 k		5 x 2,5
60						
62	Kond.	C1	KER	M1	50 V	5
63		C2	KER	M1	50 V	5
64		C3	TAN	10M	16 V	5, D5
65		C4	FOIL	10n	100 V	5
66		C5	TAN	10M	16 V	5, D5
67		C6	KER	M1	50 V	5
68		C7	KER	M1	50 V	5
69		C8	KER	M1	50 V	5
70		C9	TAN	10M	16 V	5, D5
71		C10	RAD	10M	16V	5, D16
72		C11	KER	M33	50 V	5x5
73		C12	KER	M1	50 V	5
74		C13	TAN	10M	16 V	5, D5
75		C14	KER	M1	50 V	5
76		C15	KER	M1	50 V	5
77		C16	KER	M1	50 V	5
78		C17	KER	M1	50 V	5
79		C18	KER	M1	50 V	5
80		C19	KER	M1	50 V	5
81		C20	KER	M1	50 V	5
82		C21	FOIL	22n	100 V	5
83		C22 - výběr	FOIL	22n	100 V	5
84		C23	RAD	1G	50 V	7,5, D16
85						
86						
87	Int. obv.	OZ1 A, B	MC1558		2xOZ	
88		OZ2 A, B	MC1558		2xOZ	
89		OZ3 A, B	LM358		2xOZ	
91		IO1	4011	CMOS		
92		IO2	4012	CMOS		
93		IO3	4013	CMOS		
94		IO4	4060	CMOS		
95		IO5	555	CMOS		
96		IO6	555	CMOS		
98		IO7	7808	kladný	+8V/1A	
101						
103	Tranz.	T1	BC 546	NPN		
105						
107	Dioda	D1	1N4148		0,2A/100V	
108		D2	1N4148		0,2A/100V	
109		D3	1N4148		0,2A/100V	

110		D4	1N4148		0,2A/100V	
111		D5	1N4148		0,2A/100V	
112		D6	1N4148		0,2A/100V	
113		D7	1N4148		0,2A/100V	
114		D8	1N4148		0,2A/100V	
115		D9	1N4148		0,2A/100V	
116		D10	1N4148		0,2A/100V	
117		D11	1N4007		1A/1000V	
118		D12	ZF4,7	4,7 V	0,5 W	
123	LED	LED1	žlutá		2 mA	
124		LED2	zelená		2 mA	
125		LED3	rudá		2 mA	
126		LED4	žlutá		2 mA	
127		LED5	rudá		2 mA	
128		LED6	žlutá		2 mA	
129		LED7	rudá		2 mA	
130		LED8	modrá		2 mA	
134						
136	Pojistka	Po1	MST	T200 mA		
137		Po2	MST	T200 mA		
138						

Příloha 19-1 Rozpiska materiálu DŘ

Rozpiska materiálu desky koncového stupně DKS

Poř. číslo	Název	Označení	Typ	Hodnota	Výkon, napětí, jiné	Velikost (rozteč, průměr, x*y)
1	Rezistor	R1	SMA 0207	100 k	0,5 W	10
2		R2	SMA 0207	100 k	0,5 W	10
3		R3	SMA 0207	100 k	0,5 W	10
4		R4	SMA 0207	4,7 k	0,5 W	10
5		R5	SMA 0207	4,7 k	0,5 W	10
6		R6	SMA 0207	33 k	0,5 W	10
7		R7	SMA 0207	5,6 k	0,5 W	10
8		R8	SMA 0207	10 k	0,5 W	10
9		R9	SMA 0207	10 k	0,5 W	10
10		R10	SMA 0207	10 k	0,5 W	10
11		R11	SMA 0207	22	0,5 W	10
12		R12	SMA 0207	10 k	0,5 W	10
13		R13	SMA 0207	22	0,5 W	10
14		R14	SMA 0207	10 k	0,5 W	10
15		R15	SMA 0207	0	0,5 W	10
16						
17	Kond.	C1	RAD	1G	50 V	7,5, D16
18		C2	KER	100N	50 V	5
19		C3	KER	100N	50 V	5
20		C4	TAN	10M	16 V	5, D5
21		C5	RAD	1G	50 V	7,5, D16
22		C6	KER	100N	50 V	5
23		C7	KER	100N	50 V	5
24		C8	TAN	10M	16 V	5, D5
25		C9	TAN	10M	16 V	5, D5
26		C10	KER	100N	50 V	5
27		C11	TAN	10M	16 V	5, D5
28		C12	KER	100N	50 V	5
29		C13	TAN	10M	35 V	5, D7,5
30		C14	RAD	1G	50 V	7,5, D16
31		C15 na DPS	KER - SMD	10N	50 V	
32		C16 na DPS	KER - SMD	10N	50 V	
33						
34	Int. obv.	IO1	4011	CMOS		
35		IO3	IXDD409SI	CMOS	SMD	
36		IO4	IXDD409SI	CMOS	SMD	
37		IO5	7808	kladný	+8V/1 A	
38		IO6	7908	záporný	-8V/1 A	
39						
40	Tranz.	T1	BUZ11	N-MOS		
41		T2	IRF9640	P-MOS		
42		T3	BC546A	NPN		
43						
44	Dioda	D1	SR3100	Schottky	3A/100V	
45		D2	SR3100	Schottky	3A/100V	

46		D3	1N4007		1A/1000V	10
47		D4	1N4007		1A/1000V	10
48		D5	1N4148		0,2A/100V	10
49		D6	1N4148		0,2A/100V	10
50		D7	MBR1060	Schottky	10A/60V	
51		D8	MBR1060	Schottky	10A/60V	
52	LED	LED1	rudá		2 mA	
53		LED2	žlutá		2 mA	
54		LED3	zelená		20 mA	
55						
56	Tlumivka	TL	157-26	viz. text		
57	Pojistka	Po1	auto	5 A		
58	Pojistka	Po2	auto	5 A		
59	Držák poj.		C1040			
60						

Příloha 22-1 Rozpiska materiálu DKS

Rozpiska materiálu desky proudových ochran DPO

Poř. číslo	Název	Označení	Typ	Hodnota	Výkon, napětí, jiné	Alternativní velikost (rozteč, průměr, x*y)
1	Rez.	R1, R11	SMA 0207	2,2 k	0,5 W	10
2		R2, R12	SMA 0207	12 k	0,5 W	10
3		R3, R13	SMA 0207	1 M	0,5 W	10
4		R4, R14	SMA 0207	4,7 k	0,5 W	10
5		R5, R15	SMA 0207	12 k	0,5 W	10
6		R6, R16	SMA 0207	2,2 k	0,5 W	10
7		R7, R17	SMA 0207	10 k	0,5 W	10
8		R8, R18	SMA 0207	4,7 k	0,5 W	10
9		R9, R19	SMA 0207	1 M	0,5 W	10
54	Trimr	P1	64Y	10 k		5 x 2,5
55		P2	64Y	10 k		5 x 2,5
56		P3	64Y	10 k		5 x 2,5
57		P4	64Y	10 k		5 x 2,5
60						
62	Kond.	C1	KER - SMD	4,7 n	50 V	5
63		C2	KER - SMD	4,7 n	50 V	5
64		C3	RAD	220 M	16 V	5, D11
65		C4	KER	330 n	100 V	5
66		C5	KER	M1	50 V	5, D5
67		C6	KER - SMD	M1	50 V	5
68		C7	KER - SMD	M1	50 V	5
69		C8	KER	M1	50 V	5
70		C9	KER	M1	50 V	5, D5
71		C10	TAN	15 M	16 V	5, D5
85						
86						
87	Int. obv.	OZ1 A, B	LM358		2xOZ	
88		OZ2 A, B	LM358		2xOZ	
91		IO1	ACS712	SMD		
92		IO2	ACS712	SMD		
98		IO3	78L05	kladný	+5V/0,1A	
101						
123	LED	LED1A	rudá		2 mA	
124		LED1B	žlutá		2 mA	
125		LED2A	rudá		2 mA	
126		LED2B	žlutá		2 mA	
134						

Příloha 24-1 Rozpiska materiálu DPO

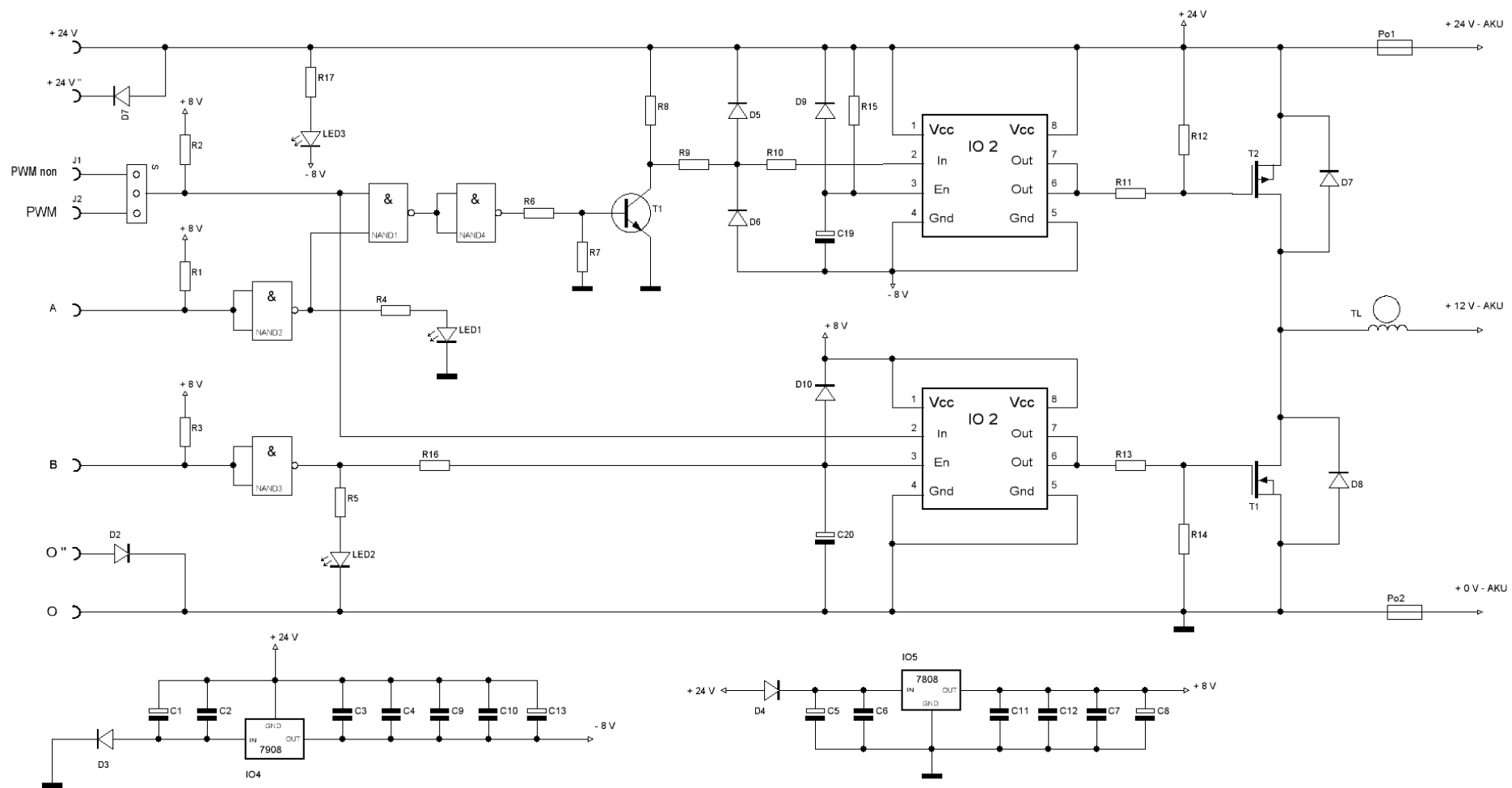
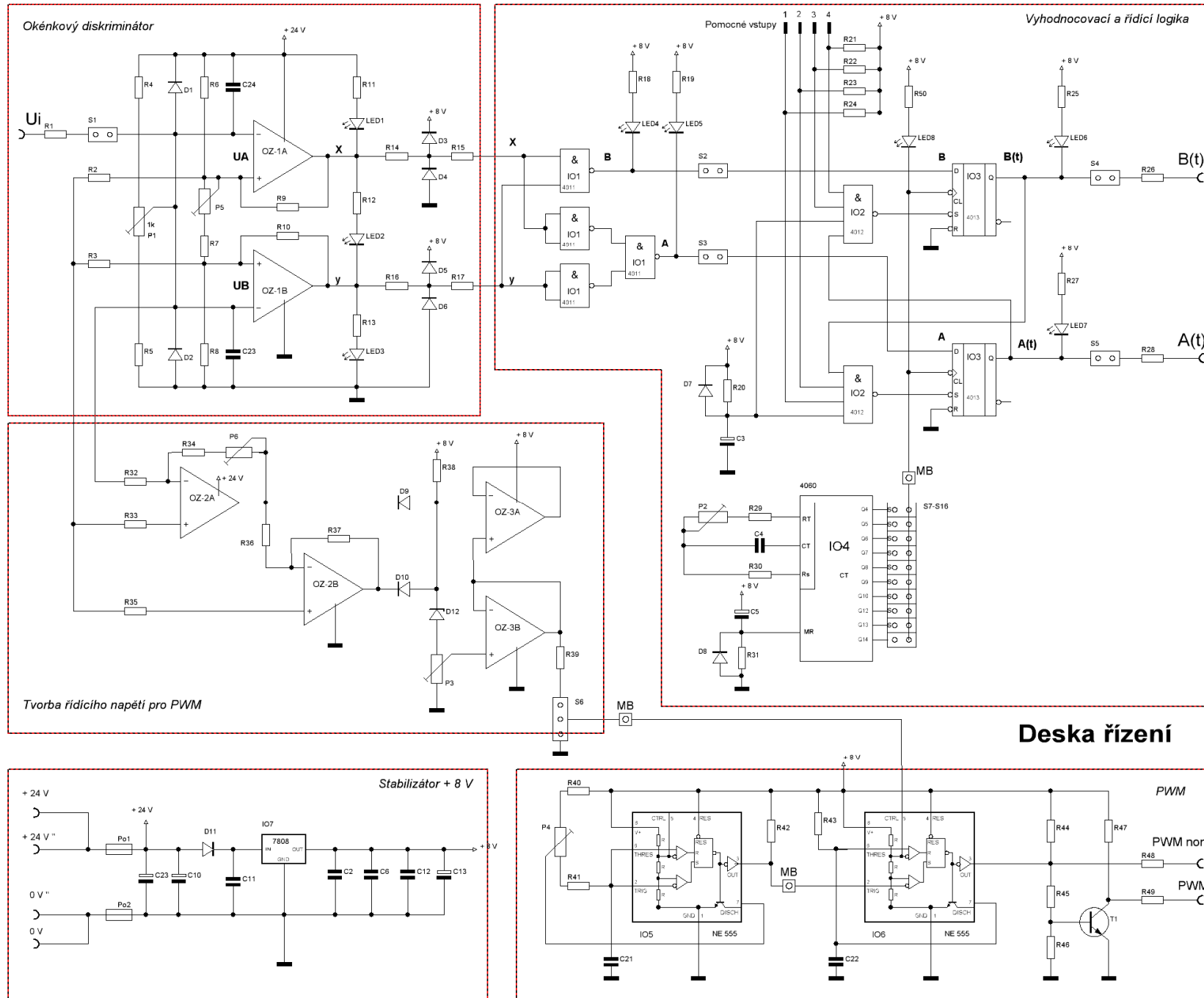
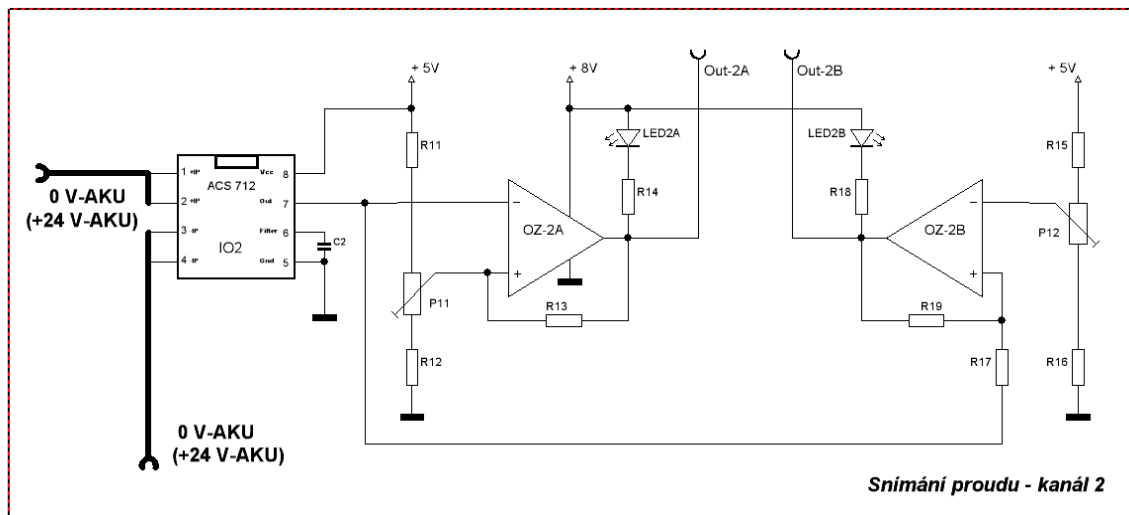
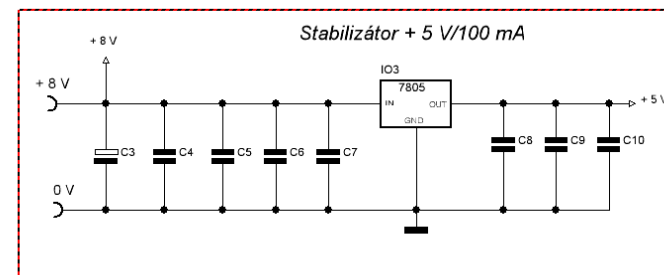
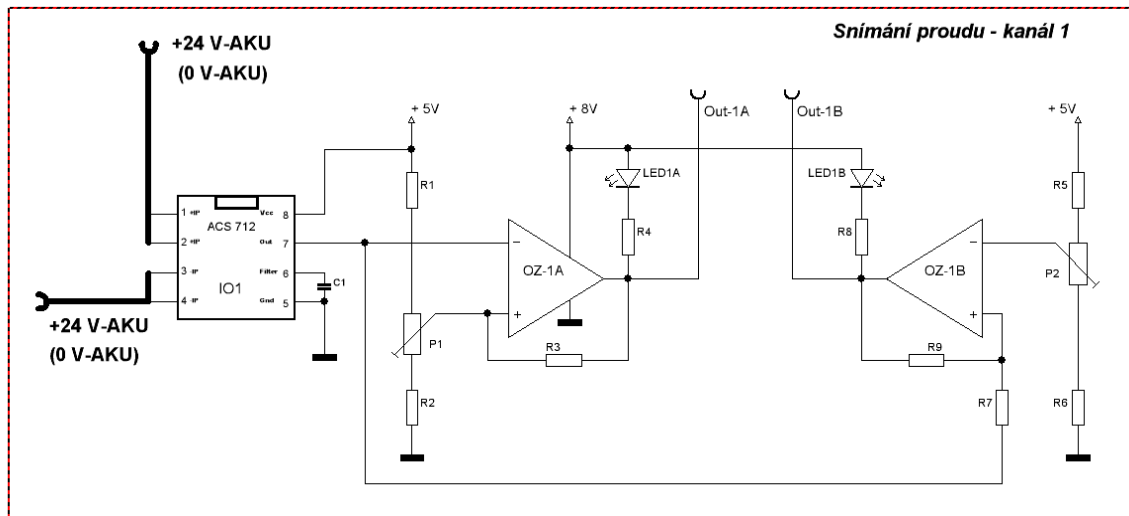


Schéma koncového stupně

Příloha 25-1 Schéma DKS



Příloha 26-1
Schéma DŘ



Příloha 27-1 Schéma DPO

