

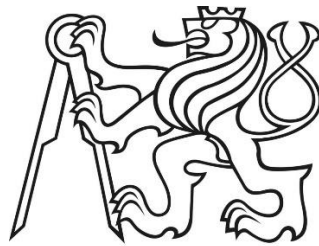
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vestavěná nabíječka startovacích a záložních
akumulátorů používaných v trakci**



2020

Tomáš DOLENSKÝ

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dolenský** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **461400**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vestavěná nabíječka startovacích a záložních akumulátorů používaných v trakci

Název diplomové práce anglicky:

Inbuilt Starting and Reserve Battery Charger for Traction Applications

Pokyny pro vypracování:

1. Specifikujte vlastnosti vestavěné nabíječky pro startovací a záložní akumulátory používané v železničních vozidlech a v automobilech.
2. Navrhněte silovou a řídicí část nabíječky.
3. Navrženou nabíječku realizujte.
4. Zhotovenou nabíječku proměřte a naměřená data věcně okomentujte a zhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Arendáš, M., Ručka, M.: Nabíječky a nabíjení. BEN, Praha, 1999.
- [2] Krejčířík, A.: Napájení zdroje 1, 2. BEN, Praha, 2002.
- [3] Šťastný, J, Remek, B.: Autoelektrika a autoelektronika. T. Malina, Praha, 2006.
- [4] Cenek, M., et al.: Akumulátory od principu k praxi. FCC Public, Praha, 2003.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Pavel Koblre, Ph.D., katedra elektrických pohonů a trakce

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **13.09.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **22.05.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**

Ing. Pavel Koblre, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu své práce, Ing. Pavlovi Kobrlemu, Ph.D., za cenné připomínky, laskavý a profesionální přístup a především za ochotu bezodkladně pomoci řešit problémy, které při psaní této práce vyvstaly.

Anotace

Diplomová práce sestává z teoretické a praktické části. Teoretická část práce obsahuje stručný přehled startovacích a záložních akumulátorů používaných především v silničních a železničních vozidlech, popis procesů probíhajících v akumulátorech během jejich vybíjení a nabíjení a přehled nejčastěji používaných typů nabíječek těchto akumulátorů spolu s vysvětlením principu jejich činnosti. V praktické části je předložen návrh konkrétního nabíječe 27 V/20 A, vhodného k vestavění do vozidla. Navržený nabíječ byl zkonstruován, úspěšně oživen a proměřen v několika provozních stavech. Výsledky měření jsou v závěru práce zhodnoceny.

Abstract

The diploma thesis consists of a theoretical and a practical part. The theoretical part contains a brief overview of starter and backup batteries used mainly in road and railway vehicles, a description of the processes taking place in batteries during their discharge and charging and an overview of the most commonly used types of chargers for these batteries together with an explanation of their function. In the practical part, a design of a specific charger 27 V/20 A, suitable for installation in a vehicle, is presented. The designed charger was assembled, successfully revived and measured in several operating states. The measurement results are evaluated at the end of the work.

Obsah

1	Úvod	1
2	Akumulátory ve vozidlech.....	2
3	Princip nabíjení akumulátoru.....	5
4	Typy nabíječů	8
4.1	Nabíječ s charakteristikou U	8
4.2	Nabíječ s charakteristikou I	11
4.3	Nabíječ s charakteristikou W	13
5	Návrh nabíječe	15
6	Pomocné a ochranné obvody	27
7	Chlazení výkonových součástek	37
8	Konstrukce a měření	41
9	Závěr	46
10	Použitá literatura.....	47
	Příloha č. 1 – Celkové schéma zapojení.....	48
	Příloha č. 2 – Schéma zapojení generátoru přerušení	49
	Příloha č. 3 – Rozpis součástek	50
	Příloha č. 4 – Fotodokumentace	53

1 Úvod

Akumulátoru, jako zásobníku energie ve vozidle je třeba věnovat více či méně pozornosti a péče, má-li sloužit spolehlivě a dlouhodobě. Ačkoliv se již řadu let vyrábějí tak zvané bezúdržbové akumulátory, neznamená to, že by takový akumulátor fungoval stále, bez ohledu na jakýkoliv zásah z vnějšku a sloužil toliko jako zdroj energie. I tu je třeba do něj průběžně ukládat, neboť i bez připojeného odběru takový akumulátor stejně jako obyčejný podléhá procesu samovybití. Navíc jsou tyto akumulátory citlivé na hluboké vybití, které výrazně zkrátí jeho životnost, pokud ji neukončí okamžitě, trvá-li vybitý stav příliš dlouho. Při běžném provozu obstarává přísun energie do akumulátoru dobíjecí zařízení vozidla, avšak v při jeho delším odstavení je akumulátor vystaven pouze samovybití. Navíc stále přibývá vozidel, jejichž řídicí systémy vyžadují trvalého napájení a jsou připojeny na akumulátor trvale, bez ohledu na to, zda vozidlo obsahuje odpojovač akumulátorů či nikoliv. Tato diplomová práce představuje návrh automatického dobíječe vhodného pro použití ve vozidlech jak v železniční, tak v silniční dopravě. Jedná se o zařízení vestavěné do tohoto vozidla, které zajišťuje pouhým připojením k veřejné rozvodné síti udržet vozidlo v pohotovostním stavu, zejména u vozidel dlouhodobě odstavených, používaných jen zřídka, jakož také poměrně rychlé obnovení startovací schopnosti u akumulátoru, který byl chybou obsluhy vybit, a to bez jeho demontáže z vozidla.

V prvních kapitolách jsou stručně představeny jednotlivé typy akumulátorů používaných ve vozidlech a princip jejich nabíjení. Poněkud podrobněji se práce zaměřuje na nejčastěji používaný olovený akumulátor, kde je pomocí komentáře a chemických rovnic popsán proces jeho nabíjení a vybití. Dále jsou představeny jednotlivé typy nabíječů, včetně jejich charakteristik a zhodnocení jejich použitelnosti pro jednotlivé aplikace. U některých typů jsou také uvedeny příklady v praxi používaných zapojení.

Další kapitoly se zabývají již konkrétním návrhem nabíječe. Na počátku jsou vytyčeny základní požadavky kladené na nabíječ, za kterými následují návrhy obvodových řešení jednotlivých jeho částí, spolu s vysvětlením jejich činnosti. Následují návrhy pomocných a ochranných prvků nabíječe a dále návrh chlazení výkonových polovodičových součástek, kterým jsou věnovány samostatné kapitoly.

Poslední kapitola se zabývá konkrétními klíčovými konstrukčními podrobnostmi a měřením zhotoveného přístroje, včetně komentářů provádějících jednotlivá měření. Na jejím konci je pak uvedeno krátké zhodnocení naměřených údajů a celého zařízení.

Za seznamem použité literatury následují jednotlivé přílohy k této práci, které obsahují kompletní schéma zapojení, včetně seznamu použitých součástek a nechybí ani fotodokumentace zhotoveného dobíječe, pořízená během jeho měření.

2 Akumulátory ve vozidlech

Základním zdrojem elektrické energie ve vozidle je akumulátor, tedy zásobník, který uchovává elektrickou energii ve formě energie chemické. Napájí některá zařízení ve vozidle v době, kdy není zajištěno napájení těchto spotřebičů jiným způsobem, např. alternátorem či dynamem poháněným spalovacím motorem u automobilů a motorových lokomotiv nebo statickými dobíječi u moderních elektrických lokomotiv. Používá se akumulátorů různých druhů a kapacit. Následující přehled jednotlivých akumulátorů a jejich vlastností vychází z [3]. Vzhledem k v současnosti používaným akumulátorům lze provést jejich základní dělení na zásadité a kyselé. Zásadité akumulátory se používají alkalické Ni-Cd (nikl-kadmiové) a Ni-Fe (nikl-železité) nebo stříbro-zinkové. Elektrolytem je vodní roztok hydroxidu draselného (draselný loup KOH) nebo hydroxidu sodného (NaOH, pouze u Ni-Cd a Ni-Fe článků). U alkalických akumulátorů tvoří kladnou elektrodu oxid nikelnatý s příměsí šupinkového niklu nebo grafitu, zlepšující vodivost. Zápornou elektrodu tvoří dle typu alkalického akumulátoru směsi kadmia, železa a oxidů železa. U Ni-Fe akumulátorů je aktivní část záporné elektrody z práškového železa a jeho oxidů, s příměsí oxidů rtuti a dalších speciálních příměsí. Alkalické akumulátory mají v porovnání s olověnými několikrát delší životnost, jsou otřesuvzdorné, odolné proti zkratům, přebíjení i hlubokému vybití. Nevýhodou je však jejich nákladnost – ať již hovoříme o pořizovací ceně, či o nutnosti častější údržby, která spočívá především v kontrole a doplňování hladiny elektrolytu. Další nevýhodou je velký rozdíl mezi nabíjecím a vybíjecím napětím. Jmenovité napětí je 1,2 V na článek, ačkoliv napětí naprázdno bezprostředně po nabití dosahuje 1,4–1,48 V. Tyto akumulátory se používají především v železničních vozidlech a v silničních vozidlech pro zvláštní účely, které je potřeba udržet v pohotovosti, i pokud jsou delší dobu odstavena. Další oblastí použití tohoto druhu akumulátorů je v záskokových či nouzových napájecích.

Stříbrozinkové akumulátory mají kladnou elektrodu ze sintrovaného stříbra a zápornou elektrodu z oxidu zinečnatého. Elektrolytem je opět vodní roztok hydroxidu draselného KOH s přísadou alkalického zinečnanu – přesněji 40 % KOH, 5 % ZnO a 55 % H₂O. Konstrukčně se tyto akumulátory neliší od ostatních typů, mají však asi o 70 % menší hmotnost a zhruba o 60 % menší objem než referenční olověný akumulátor. Jejich značnou nevýhodou je cena, poměrně krátká životnost (udává se 350 až 400 cyklů, avšak většina článků má podle [1] životnost 100 až 130 cyklů, přičemž již po 50 cyklech klesá kapacita) a velká citlivost na přebíjení. Ze všech druhů akumulátorů používaných v automobilové a železniční dopravě (vyjma trakčních baterií u elektromobilů) pracují s největší účinností. Mají široké rozmezí provozních teplot od -40 do +40°C, dobře snášejí vybíjení velkými proudy, dokonce zkratovým proudem bez poškození. Lze je skladovat ve vybitém stavu. Tyto akumulátory se uplatňují spíše ve zvláštních, závodních vozidlech. Jmenovité napětí jednoho článku je 1,5 V a podobně jako u alkalických akumulátorů jeho napětí nezávisí na hustotě elektrolytu. Při vybíjení stálým proudem lze nejprve pozorovat charakteristický vzestup napětí až na 1,8 V na článek. Tento stav setrvává přibližně po dobu jedné čtvrtiny vybíjecího cyklu. Poté následuje pokles k jmenovitému napětí, kde se tento stav téměř nemění. Na konci vybíjecího cyklu článkové napětí poklesne k hodnotě 1,2 až 1 V a při dalším působení vybíjecího proudu klesá velmi rychle k nule. Při nabíjení stálým proudem rovněž vykazují charakteristický průběh tak, jak se mění vnitřní odpor akumulátoru. V první čtvrtině nabíjecí doby napětí jednoho článku vystoupne asi na 1,7 V a po celou dobu nabíjení se téměř

nemění. Před koncem nabíjecího cyklu však začne opět rychle narůstat a zde je třeba proces nabíjení ukončit. Napětí jednoho článku nesmí překročit 2,1 V, jinak hrozí jeho zničení.

Nejpoužívanějším typem jsou akumulátory olovené. Zjednodušeně lze konstatovat, že se jedná o dvě olovené desky ponořené do elektrolytu, který tvoří zředěná kyselina sírová H_2SO_4 . Činnými hmotami jsou pak oxid olovičitý PbO_2 na anodě a tzv. houbovitě olovo na katodě. Elektrody jsou nejčastěji tvořeny mřížkami odlitými z olova a legované pro zpevnění a chemickou odolnost různými přísadami. Tvar těchto mřížek musí být uzpůsoben jejich základní funkci – bezpečně nést činné hmoty a odvádět z nich proud. Materiál činných hmot na nich musí být pevně zachycen a nesmí opadávat při provozních vibracích a otřesech, ani při svých objemových změnách vyvolaných vybíjecími a nabíjecími proudy. Jeho složení ve stavu před zalisováním do mřížky je různé a patří k know-how každého výrobce. Většinou se však jedná o vyšší oxidy olova a dalších látek, které se na činné hmoty převádějí až po nalisování na desky a jejich vytvrzení formováním elektrickým proudem. Pro zvětšení pevnosti, odolnosti, pórovitosti a elektrické vodivosti se do směsi dále přidávají různé příměsi z chemicky indiferentních látek. Desky jsou vyráběny v normovaných velikostech a podle kapacity akumulátoru jsou spojovány paralelně do tzv. deskových skupin a upevněny ke společnému můstku s pólovým vývodem. Kladné a záporné skupiny jsou do sebe navzájem zasunuty, přičemž se jednotlivé kladné a záporné desky pravidelně střídají a záporných desek je o jednu více než kladných a v sestavě jsou vždy vně. Desky opačných polarit jsou v sestavě mezi sebou proloženy tzv. separátory, které celou sestavu zpevňují, desky galvanicky oddělují a udržují jejich vzájemnou geometrickou polohu neměnnou.

Na separátory jsou kladeny zvláštní nároky, neboť samy o sobě mají velký vliv na vlastnosti akumulátoru, především při nízkých teplotách. Jednak musejí odolávat chemicky silně agresivnímu prostředí, dále nesmějí bránit snadnému průchodu iontů a nesmějí se dotýkat desek příliš velkou plochou kvůli volnému prostoru pro vyrovnávání hustoty elektrolytu. Jsou proto vyráběny ze skelné tkaniny a plastů v různých kombinacích a provedeních. Tzv. mikroporézní plastové separátory a separátory ze speciálních papírů například umožnily značné zlepšení vlastností akumulátorů při nízkých teplotách.

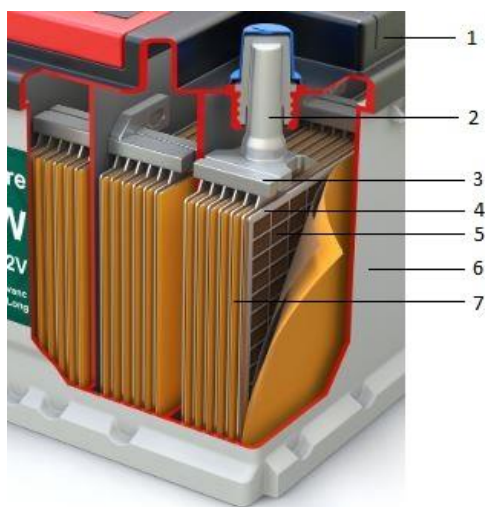
Na rozdíl od zásaditých akumulátorů je u oloveného akumulátoru hustota elektrolytu jednou z určujících veličin při posouzení stavu jeho nabití a kondice vůbec. Pro naše klimatické podmínky se předepisuje měrná hustota elektrolytu v rozmezí 1,260–1,285 g/cm^3 , avšak při provozních stavech bývá kolem 1,200–1,220 g/cm^3 , kdy má elektrolyt největší vodivost. Kapacita a svorkové napětí závisí na hustotě elektrolytu přímo úměrně, tedy při vyšších hodnotách hustoty má akumulátor větší kapacitu a napětí, avšak nelze překročit mez 1,285 g/cm^3 , kdy je elektrolyt již značně agresivní a napadá materiál desek.

Vzhledem k tomu, že zejména akumulátor v automobilu je vystaven nejnáročnějším provozním podmínkám vůbec a je také značně ohrožen vysokou pravděpodobností nekvalitní nebo žádné údržby, vznikají také z tohoto důvodu nové konstrukce tzv. bezúdržbových akumulátorů. Přesněji řečeno akumulátory se sníženými požadavky na údržbu. K jejich konstrukci bylo využito zcela nových prvků. Nádoba a víko jsou z polypropylenu, vnitřní propojení článků je provedeno mezistěnou a mřížky desek jsou z nízkoantimonových slitin, nebo je antimon zcela nahrazen vápníkem. Přidáním stříbra do materiálu desek bylo dosaženo zvýšení startovacích proudů a prodloužení životnosti (akumulátory SILVER). Desky opačných polarit jsou od sebe odděleny tzv.

kapsovými (obálkovými) separátory z mikroporézního plastu (vysokomolekulárního polyetylenu). Kladné desky jsou dále vloženy do obálek, které zabraňují vypadávání materiálu činné hmoty a tím vzniku kalu.

Tato konstrukce akumulátorů má menší hmotnost a objem než akumulátor klasického provedení, má menší vnitřní odpor, tedy větší startovací proudy a naopak malý samovybíjecí proud. Dále se vyznačuje stabilní nabíjecí charakteristikou a tím velmi malou schopností rozkládat vodu na vodík a kyslík. Odvod plynů vznikajících při nabíjení je proveden labyrintem mezi dvěma díly víka, směřujícím k bočním vývodům a který dále zabraňuje vytékání elektrolytu v jakékoliv poloze akumulátoru. Součástí víka jsou také dvě mikroporézní vložky z keramiky, které zabraňují jeho explozi. Celá konstrukce dále eliminuje riziko výbuchu také při vzniku poruchy (výboje) uvnitř akumulátoru. K odvodu plynů z akumulátoru se může použít centrální odplynovací kanál, opatřený protizážehovou zátkou, která umožňuje odvod plynů mimo akumulátor přes mikroporézní keramickou vložku a která také zabraňuje explozi akumulátoru. Tento systém rovněž zabraňuje vytékání elektrolytu v jakékoliv poloze akumulátoru. Použitím speciálních zátek i u klasických akumulátorů lze snížit úbytek vody. Tyto zátky obsahují katalyzátor umožňující rekombinaci vodíku a kyslíku na vodu, prakticky tím tedy odpadá nutnost doplňování elektrolytu destilovanou vodou.

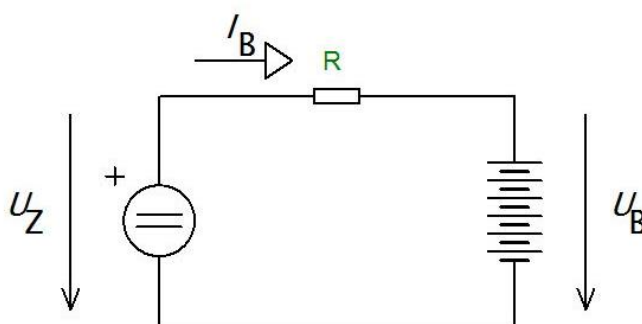
Vyráběny jsou i uzavřené, zcela bezúdržbové, tzv. hermetizované či rekombinační akumulátory. Elektrolytem je opět roztok kyseliny sírové, ovšem nasáknutý do tlustších separátorů ze skelné vaty nebo vázaný v izotropním gelu SiO_2 . Proto se tyto akumulátory nazývají též gelové. Kyslík vzniknuvší na kladné elektrodě difunduje vodivými kanálky v gelu nebo skelné vatě ke katodě, kde vytváří vazby s olovem a vzniká oxid olovnatý PbO . Ten pak s ionty SO_4^{2-} vytváří síran olovnatý PbSO_4 . Malé množství vodíku, vznikající při nabíjení akumulátoru rekombinuje s kyslíkem na vodu. Uvolní-li se však přesto určité množství kyslíku a vodíku, které nezrekombinovalo, je tento akumulátor vybaven přetlakovým ventilem, který tuto směs uvolní do okolí. Proto se těmto druhům akumulátorů také říká ventilem řízené. Stav nabití bývá indikován hustoměrem instalovaným uvnitř akumulátoru, s vyvedeným signalizačním terčíkem. Na obr. 1 převzatém z [22] je znázorněn řez bezúdržbovým akumulátorem.



Obr. 1 Řez olověným akumulátorem: 1 - víko, 2 - pólový vývod, 3 - sběrný můstek, 4 - Pb mřížka, 5 - činná hmota, 6 - nádoba z polypropylenu, 7 – separátor

3 Princip nabíjení akumulátoru

Akumulátor používaný at' v silničním, železničním nebo jiném dopravním prostředku má umožnit skladování elektrické energie. Tu je třeba z něj nejen odebírat, ale zároveň ji do něj ukládat. Musí být tedy umožněn obousměrný přenos energie, resp. proces vybíjení musí být vratný. Při vybíjení probíhají v akumulátoru určité chemické reakce, které uvolňují energii, která je pak v reálném čase zdrojem elektrického výkonu. Proud tedy teče z akumulátoru do spotřebiče. Má-li se akumulátor opět nabít, je třeba vyvolat opačné chemické reakce, které energii spotřebovávají, a tu je nutné dodat z vnějšku. Je tedy třeba vyvolat proud opačného směru, tekoucí do akumulátoru. Toho se dosahuje připojením akumulátoru k vnějšímu zdroji stejnosměrného napětí U_Z , které musí být vyšší, než je aktuální napětí akumulátoru U_B (tedy $U_Z > U_B$), aby mohl téci nabíjecí proud. Principiální schéma je na obr. 2.



Obr. 2 Princip nabíjení akumulátoru

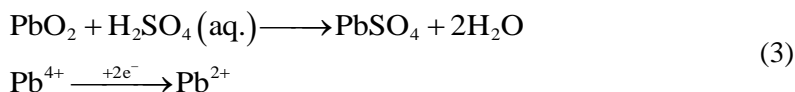
Proud I_B tekoucí ze zdroje je dán rozdílem napětí tohoto zdroje a akumulátoru a je omezen sériovým rezistorem R , představujícím vnitřní odpor vnějšího zdroje R_{iz} , odpor vedení R_v , tj. vodičů, přechodovým odporem na spojích apod. a vnitřním odporem akumulátoru R_{iB} , který je však velmi malý. Lze tedy psát

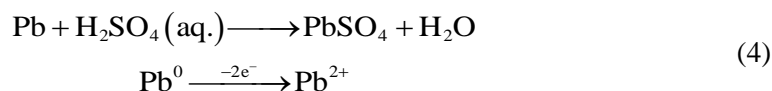
$$I_B = \frac{\Delta U}{R} = \frac{U_Z - U_B}{R_{iz} + R_v + R_{iB}} \quad (1)$$

Celý proces vybíjení a nabíjení si popíšeme na olověném akumulátoru. Ve vodném roztoku kyseliny sírové H_2SO_4 dochází k elektrochemickým reakcím, přičemž vodná kyselina sírová slouží jako elektrolyt pro přenos elektronů. Pro výchozí chemickou konfiguraci v akumulátoru platí:



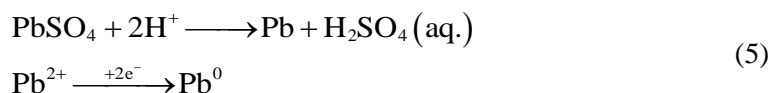
Při vybíjení teče uvnitř akumulátoru proud od záporné elektrody ke kladné. Ve vodném roztoku je kyselina sírová disociovaná. Na elektrodách dochází k elektrochemickým reakcím, přičemž na anodě dochází k redukci olovičitých kationtů na olovnaté (3) a na katodě k oxidaci olova na olovnaté ionty (4). Při obou reakcích vzniká síran olovnatý.



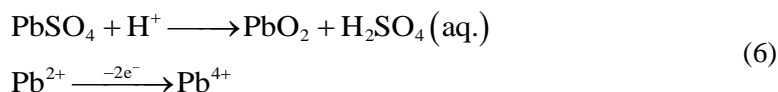


Z rovnice (3) je patrné, že vybíjením se zmenšuje hustota elektrolytu (kyselina sírová H_2SO_4 se rozkládá a při chemické reakci vznikají molekuly vody H_2O).

Při nabíjení prochází elektrolytem proud od kladné elektrody k záporné. Na katodě probíhá elektrochemická reakce, při níž dochází k redukci olovnatých iontů elektrony na houbovitě olovo (5). Přitom vzniká kyselina sírová H_2SO_4 .



Podobně na anodě dochází k elektrochemické reakci, při které se oxidují olovnaté ionty na olovičité (6). Vzniká při ní oxid olovičitý PbO_2 a opět kyselina sírová H_2SO_4 .



Elektrická energie dodávaná při nabíjení do akumulátoru se spotřebovává na převádění nábojů proti elektrochemickému potenciálu a na přeměnu molekul síranu olovnatého PbSO_4 na Pb a PbO_2 . Jak již bylo uvedeno a jak dokládají rovnice (5) a (6), vytváří se při nabíjení olověného akumulátoru na obou elektrodách kyselina sírová, hustota elektrolytu tedy stoupá. Tato reakce probíhá pouze do dokud se nevyčerpá všechen síran olovnatý. Charakteristickými znaky tohoto stavu je ustálení hustoty elektrolytu na $1,28 \text{ g/cm}^3$ a dosažení napětí $2,6\text{--}2,7 \text{ V}$ na článek. U akumulátorů s víčky nebo s průhledným či průsvitným obalem lze pozorovat unikání bublin z elektrolytu (tzv. plynování článků). Prochází-li však akumulátorem nabíjecí proud dále, má tento za účinek pouze rozkládat vodu na výbušnou směs vodíku a kyslíku. Hovoříme o tzv. elektrolýze vody, jež je popsána sumární rovnicí (7). K tomu je však zapotřebí vyššího napětí, takže napětí jednoho článku stoupne až na $2,8 \text{ V}$. Na anodě probíhá reakce podle (8), na katodě pak podle (9).



Nabíjení je třeba v tomto okamžiku ukončit, neboť krom uvedené generace výbušné směsi vodíku a kyslíku akumulátoru jeho trvalé přebíjení škodí a zkracuje jeho životnost. Málodky je třeba nabíjet akumulátor do konečných známek nabití, kterými jsou:

- hustota elektrolytu dosáhla $1,28 \text{ g/cm}^3$ a po další dvě hodiny se již nemění,
- napětí jednoho článku dosáhlo $2,6$ až $2,7 \text{ V}$ a po další dvě hodiny se již nemění,
- všechny články intenzívně plynoují.

V provozu, resp. ve všech dobíjecích zařízeních, která jsou součástí vozidla, ale i při dobíjení staničních (záskokových) akumulátorů se tomuto stavu vyhýbáme. Například dobíjecí

system v osobním automobilu, kde se používají nejčastěji olověné akumulátory o jmenovitém napětí 12 V, mívá nastaveno provozní napětí obvykle na 14,4 V, tedy 2,4 V na článek. Přibližně k tomuto provoznímu stavu bude směřovat i navrhovaný dobíječ.

4 Typy nabíječů

Tato kapitola vysvětluje jednotlivé typy nabíjecích zařízení z hlediska charakteristiky resp. průběhu celého nabíjecího procesu. Není zde tedy provedeno rozdělení jednotlivých zařízení dle oblasti jejich použití (zda se jedná o nabíječ staničních akumulátorů či alternátor v motorovém vozidle) ani z hlediska jejich topologie.

Rozeznáváme tři hlavní skupiny nabíječů: nabíječ s charakteristikou U , nabíječ s charakteristikou I a nabíječ s charakteristikou W .

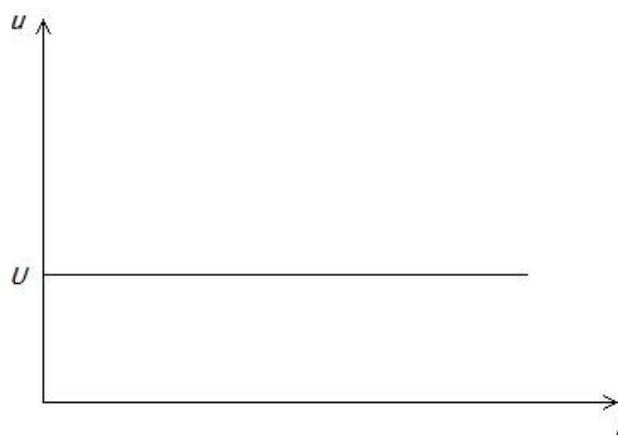
4.1 Nabíječ s charakteristikou U

Nabíječ tohoto typu se vyznačuje konstantním výstupním napětím. Jeho charakteristika je na obr. 3. Po připojení zcela vybitého akumulátoru k jeho výstupu protéká velký počáteční proud (je-li schopen zdroj tento proud dodat), který způsobuje rychlé ohřátí elektrolytu a který se stoupajícím napětím na akumulátoru, tedy s časem klesá. Jeho průběh pro nabíjení olověného akumulátoru je naznačen na obr. 4. Zde se doporučuje počáteční proud omezit asi na 0,6 až 1,2násobek jmenovité kapacity článku. Velikost nabíjecího napětí má být nastavena na plynovací napětí akumulátoru, s požadovanou přesností $\pm 1\%$. To umožňuje nabíjet též skupinu akumulátorů připojených paralelně k nabíječi. Lze jej použít pro nabíjení olověných trakčních či startovacích, niklkadmiových či stříbrozinkových akumulátorů s následujícími vlastnostmi a podmínkami:

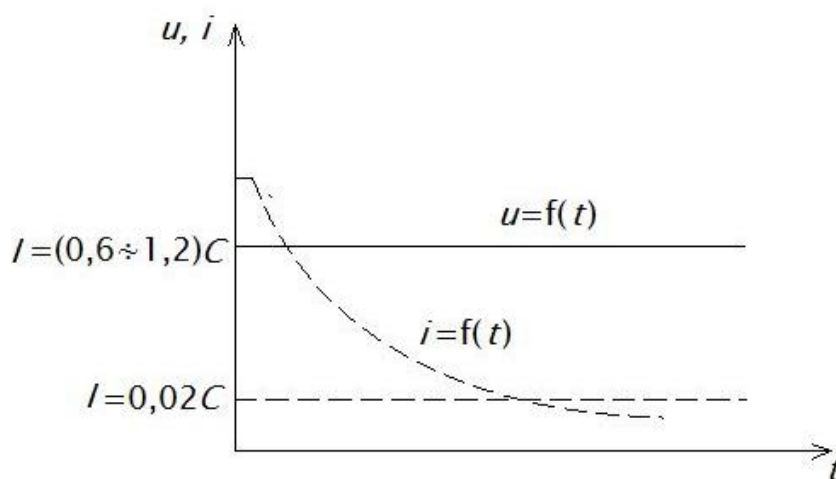
- olověné akumulátory
 - nabíjecí napětí se volí obvykle 2,4 až 2,45 V na článek (dle druhu akumulátoru), přičemž akumulátory se slabšími elektrodami vyžadují napětí nižší
 - podle druhu akumulátoru se počáteční nabíjecí proud doporučuje omezit na 0,6 až 1,2násobek jmenovité kapacity v ampérhodinách (viz. výše)
 - konečný nabíjecí proud je menší než 0,02násobek jmenovité kapacity v ampérhodinách
 - umožňuje rychlé nabití na 80 % jmenovité kapacity během 1 až 1,5 hod.
 - umožňuje delší přebíjení (vzhledem k malému proudu na konci nabíjení)
 - vyžaduje kontrolu teploty elektrolytu, zejména u silně sulfatizovaných akumulátorů během celé doby nabíjení
- niklkadmiové akumulátory
 - nabíjecí napětí se volí 1,65 až 1,72 V na článek
 - počáteční nabíjecí proud se doporučuje omezit na 0,4 až 0,6násobek jmenovité kapacity v ampérhodinách
 - proud na konci nabíjení je menší než 0,7násobek jmenovité kapacity v ampérhodinách
- stříbrozinkové akumulátory
 - nabíjecí napětí nesmí překročit 2,1 V na článek

Topologií odpovídá nabíječ s charakteristikou U zdroji stabilizovaného stejnosměrného napětí. Vzhledem k požadavku na malou toleranci výstupního napětí, používá se nejčastěji zpětnovazební regulace. Principiální schéma nabíječe je na obr. 5. Celý obvod je napájen ze zdroje

stejnosemného nestabilizovaného napětí, kterým zpravidla bývá síťový transformátor s usměrňovačem a filtrem. Toto napětí kolísá více či méně se zatížením, je tedy přivedeno k regulačnímu členu, kterým bývá obvykle výkonový tranzistor či tranzistory, pracující ve spojitém režimu. Regulační člen je řízen zesilovačem regulační odchylky, který na obr. 5 reprezentuje operační zesilovač. Do jednoho ze vstupů je přivedeno teplotně kompenzované referenční napětí, které zde představuje Zenerova dioda a do druhého vstupu je přes odporový dělič přivedeno výstupní napětí. Odporovým trimrem ve spodní části děliče se nastavuje požadované výstupní napětí. Napětíový rozdíl mezi vstupy zesilovače, tzv. chybové napětí je pak zesíleno a přivedeno na vstup regulačního členu. Teplotní kompenzace referenčního napětí lze provést jednak použitím integrovaného zdroje referenčního napětí, který obvody teplotní kompenzace obsahuje již ve svém pouzdře, anebo při použití Zenerovy diody zařazením do série s ní jiné součástky (např. diody) s opačným teplotním koeficientem.



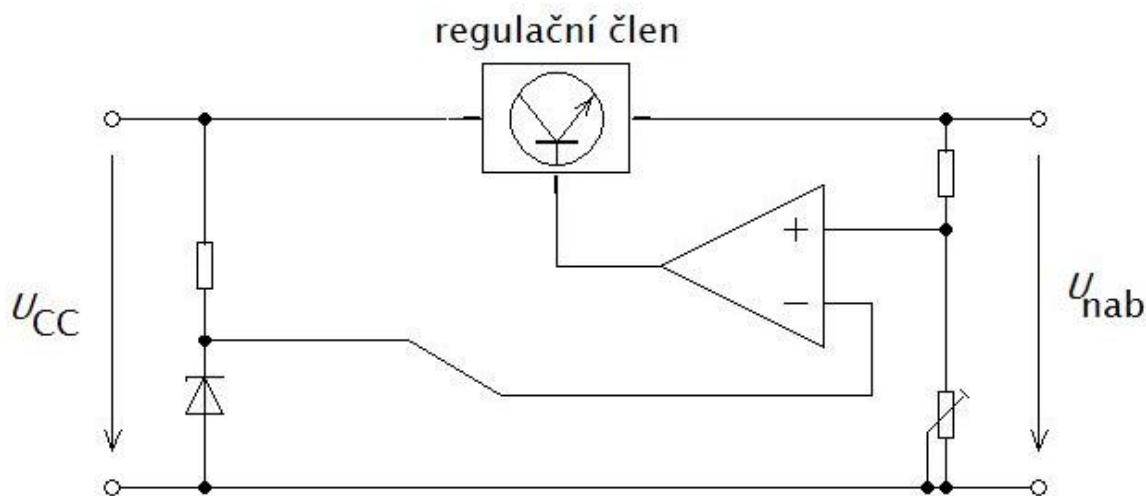
Obr. 3 Charakteristika nabíječe U



Obr. 4 Průběh napětí a proudu v závislosti na čase u nabíječe s charakteristikou U

Takto popsaný zdroj stálého nabíjecího napětí nemá vlastní prostředky k omezení počátečního nabíjecího proudu. To lze vyřešit buď konstrukcí transformátoru, tedy navrhnout jej tak, aby se stoupajícím zatížením zároveň vhodným způsobem klesalo napětí na jeho sekundáru,

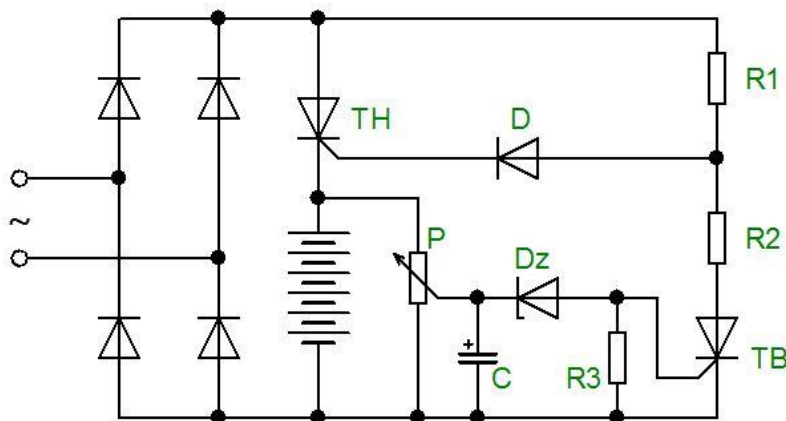
nebo omezit nabíjecí proud zařazením sériového odporu před akumulátor, anebo snímáním nabíjecího proudu a zásahem do regulační smyčky.



Obr. 5 Princip nabíječe s charakteristikou U

Zajímavou konstrukci nabíječe s „vylepšenou“ charakteristikou U nabízí na příklad zapojení na obr. 6, které se objevilo v mnoha odborných časopisech nebo literatuře, např. [1]. Ono „vylepšení“ spočívá jednak v příznivějším průběhu nabíjecího proudu, a jednak v úplném odstranění rizika přebíjení. V prvním případě se jedná o působení nabíjecího proudu impulzního charakteru, u kterého praxe ukázala jeho příznivější účinky na životnost akumulátoru. Úplné odstranění rizika přebíjení dále spočívá v ukončení nabíjení dosažením nastaveného napětí odpojením nabíjecího proudu. Navíc takto zkonstruovaný nabíječ umožňuje při poklesu napětí na akumulátoru opětne samočinné připojení nabíjecího proudu. Akumulátor je tedy udržován v nabitěm stavu po libovolně dlouhou dobu. Regulačním prvkem je zde navzdory předchozímu výkladu tyristor. Celý obvod je napájen z výstupu usměrňovače bez filtračního prvku (kondenzátoru), tedy stejnosměrným pulzujícím (tepavým) napětím. Činnost hlavního tyristoru TH je řízena blokovacím tyristorem TB. Bude-li jezdec potenciometru P v takové poloze, že napětí akumulátoru bude po vydělení děličem představujícím potenciometr P menší než Zenerovo napětí na diodě Dz, tato se neotevře a nepropustí zapínací impuls na řídicí elektrodu blokovacího tyristoru TB a ten zůstává vypnutý. Se stoupajícím napětím na výstupu napájecího usměrňovače se za předpokladu dostatečného sekundárního napětí napájecího transformátoru vytvoří rozdíl napětí mezi anodou a katodou hlavního tyristoru TH a ten se bude nacházet v blokovacím stavu. S dalším zvyšováním napájecího napětí se však přes rezistor R1 a diodu D objeví kladné napětí na řídicí elektrodě hlavního tyristoru TH, a jelikož jsou splněny podmínky pro jeho sepnutí, TH sepne a začne protékat nabíjecí proud. V druhé polovině periody napájecího napětí dochází k jeho poklesu, přičemž klesá zároveň nabíjecí proud. Poklesnutím jeho velikosti pod hodnotu vratného proudu tyristor TH vypne a při dalším poklesu napájecího napětí pod napětí na akumulátoru je již polarizován v závěrném směru. Celý děj se s další periodou opakuje. Dosáhne-li nyní napětí akumulátoru určité hodnoty, projde zapínací impuls přes Zenerovu diodu Dz na řídicí elektrodu blokovacího tyristoru TB. Po splnění další podmínky pro zapnutí, tj. při přítomnosti blokovacího napětí z výstupu usměrňovače, TB zapne a připojí tak spodní konec odporového děliče R1-R2

k nulovému potenciálu a znemožní tím zapnutí hlavního tyristoru TH. Ten zůstává po celou tuto periodu vypnutý. Takto se samočinně udržuje akumulátor nabitý bez rizika jeho přebíjení. Ostatní součástky již pouze zaručují správnou činnost obvodu: rezistor R3 brání náhodnému zapnutí blokovacího tyristoru TB a kondenzátor C působí jako tlumicí setrvačný prvek – zabraňuje nežádoucímu blokování hlavního tyristoru TH.



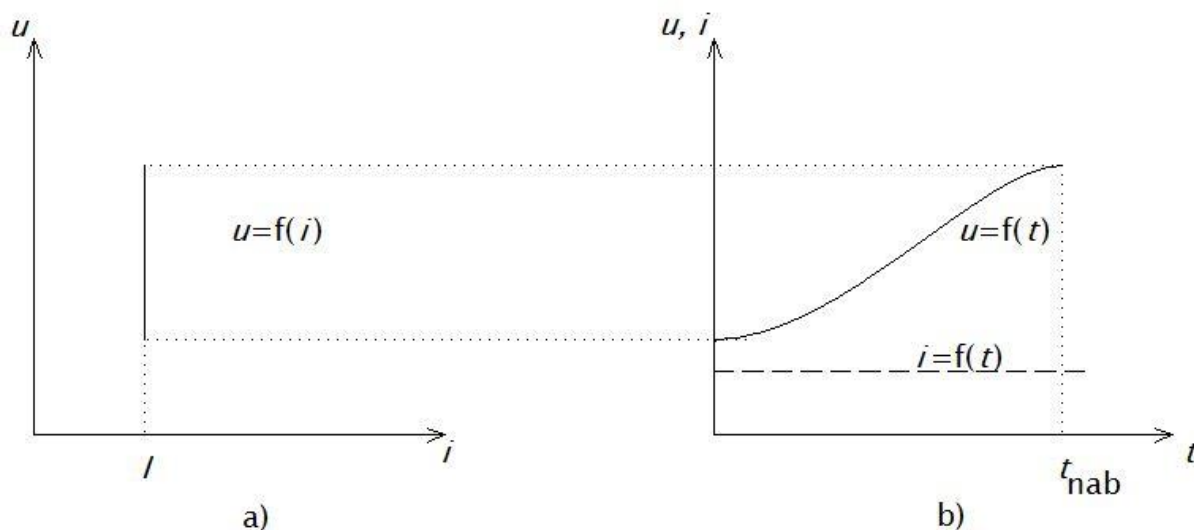
Obr. 6 Příklad jednoduchého nabíječe s charakteristikou U

4.2 Nabíječ s charakteristikou I

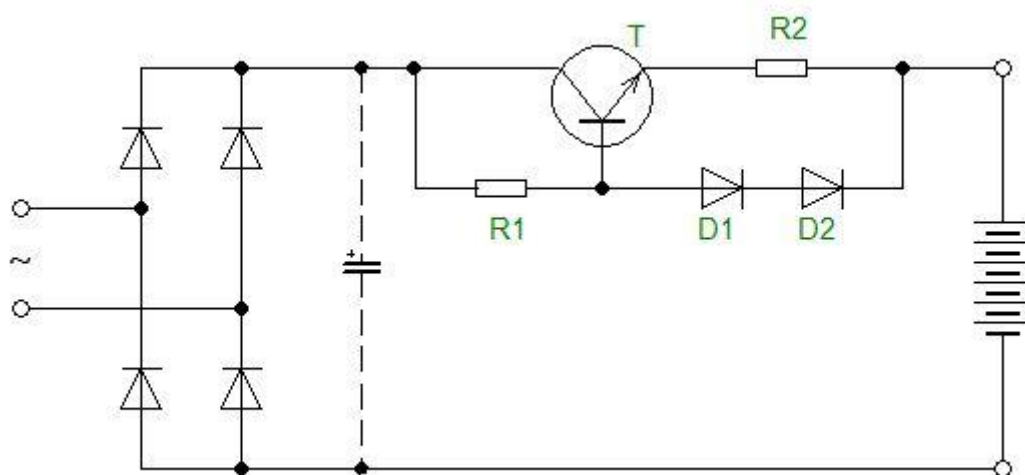
Na obr. 7 jsou průběhy nabíjecího proudu a napětí nabíječe s charakteristikou I. Jak je patrné, tento nabíječ se vyznačuje stálým nabíjecím proudem, přičemž v průběhu nabíjení stoupá jeho výstupní napětí v důsledku zvyšujícího se napětí akumulátoru tak, aby do akumulátoru dodával stále stejný proud. Nabíječe s charakteristikou I se používají zejména pro nabíjení malých olověných akumulátorů nebo při definovaných zkouškách či uvádění do činnosti startovacích akumulátorů tohoto typu. U niklkadmiových a stříbrozinkových akumulátorů je navíc nutná kontrola teploty elektrolytu. Mezi jednoznačné výhody nabíječe tohoto typu patří především jeho zkratuvzdornost. V odborné literatuře, např. v [1], se jako další výhoda udává snadné určení energie potřebné k nabití akumulátoru pouhým vynásobením nabíjecího proudu časem. Toto tvrzení je však platné pouze za předpokladu, jsme-li schopni posoudit momentální kondici akumulátoru v okamžiku připojení k nabíječi. Tedy především stupeň jeho nabití (vybití) a kapacitu, která se stářím klesá. Pak lze opravdu snadno určit dobu potřebnou k nabití akumulátoru a celý proces nabíjení je možné částečně zautomatizovat např. použitím časového spínače, který po nastavené době odpojí akumulátor od nabíječe.

Příkladem jednoduché konstrukce nabíječe tohoto typu může být obvod znázorněný na obr. 8. Napětí ze sekundárního vinutí transformátoru je po usměrnění můstkovým usměrňovačem a možné filtraci (naznačeno čárkovaně) přivedeno na kolektor výkonového tranzistoru NPN. Ten je otevřen připojením báze přes rezistor R1 ke kladnému napětí a předpětím v obvodu B- E, které tvoří sériově zapojené křemíkové diody D1 a D2. Úbytek napětí na těchto diodách činí asi 1,5 V, přičemž pro otevření bipolárního NPN tranzistoru je potřebné napětí B- E asi 0,7 V. Výstupní proud je určen velikostí odporu R2, na kterém se při průchodu nabíjecího proudu vytvoří úbytek napětí. Překročí-li tento úbytek hodnotu napětí na diodách D1 a D2, počne se tranzistor T přivírat a dojde tak k omezení nabíjecího proudu. Je zřejmé, že při značně vybitém akumulátoru nebo při

trvalém zkratu na výstupu a stálém napájecím napětí dochází na výkonovém tranzistoru k velké výkonové ztrátě, na kterou musí být tento tranzistor a jeho chlazení dimenzováno. Situaci lze uspokojivě vyřešit např. přepínáním odboček na sekundárním vinutí napájecího transformátoru.



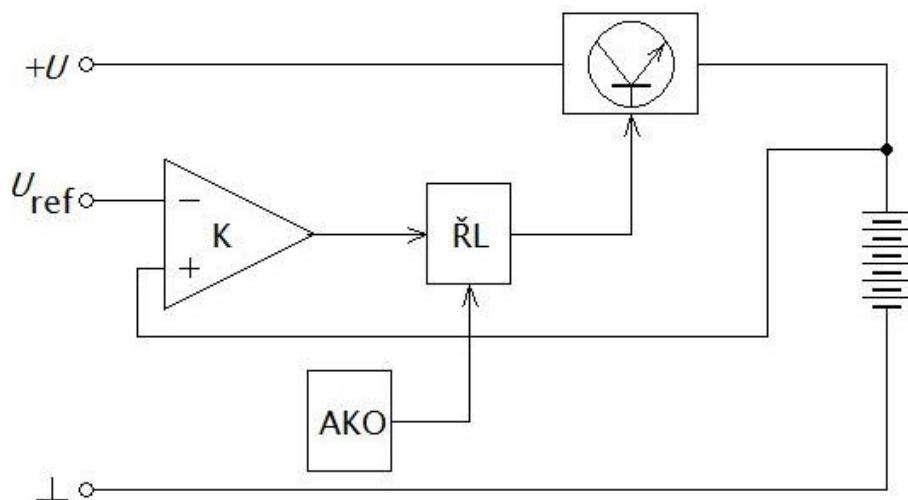
Obr. 7 a) Charakteristika nabíječe I, b) Průběh proudu a napětí u nabíječe s charakteristikou I



Obr. 8 Příklad nabíječe s charakteristikou I

Pro navrhovaný nabíječ lze tento typ použít, doplní-li se obvody měření napětí akumulátoru a vhodnými časovači. Topologicky je takové zapojení naznačeno na obr. 9. Po připojení akumulátoru se před zahájením nabíjecího procesu změří jeho aktuální napětí. Je-li tato hodnota menší než nastavené referenční napětí, komparátor K svým výstupem přivedeným na vstup řídicí logiky odblokuje průchod nabíjecího proudu do akumulátoru. Po uplynutí určité doby (např. 5 minut), která je dána astabilním klopným obvodem AKO kmitajícím s dlouhou periodou, dojde k odpojení nabíjecího proudu a po nějaký čas (rovněž v řádu několika minut) dochází opět k měření napětí na akumulátoru. Rozhodující je toto napětí na konci doby určené pro měření. Převyšuje-li v tomto okamžiku napětí na akumulátoru hodnotu nastaveného referenčního napětí,

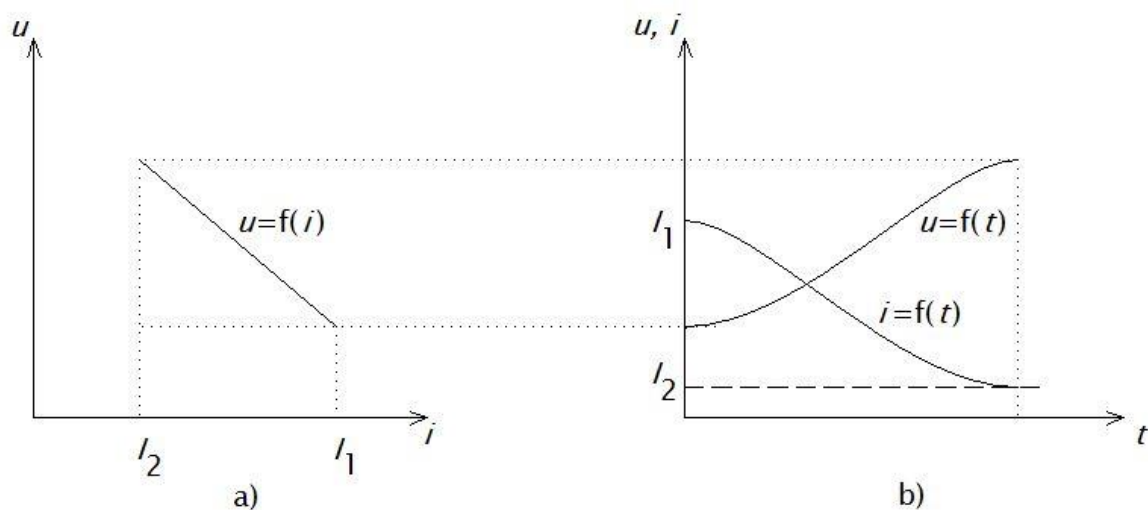
vydá komparátor K blokovací signál do bloku řídicí logiky ŘL a po dobu následujícího cyklu je blokován průchod nabíjecího proudu. Za takto krátkou dobu nemůže dojít k vybití akumulátoru a tento je tedy udržován v nabitém stavu a zabezpečí spolehlivé zprovoznění odstaveného vozidla. K blokovacím signálům do řídicí logiky lze pak následně doplnit také obvod pro automatické hlídání teploty chladiče (na obr. 9 není znázorněno), který odvádí ztrátové teplo z výkonového prvku, a zamezit tak jeho tepelnému přetížení a následnému poškození.



Obr. 9 Blokové schéma nabíječe typu I doplněného o ochranu proti přebíjení

4.3 Nabíječ s charakteristikou W

Poslední skupinou nabíječů jsou tzv. nabíječe W . Jejich charakteristiky zachycuje obr. 10.



Obr. 10 a) Charakteristika nabíječe W , b) Závislost nabíjecího napětí a proudu na čase, kde I_1 je počáteční nabíjecí proud a I_2 konečný nabíjecí proud

Do jisté míry je tato skupina podobná nabíječům U , neboť se rovněž vyznačují velkým počátečním a postupně klesajícím nabíjecím proudem a rostoucím napětím na akumulátoru, ovšem rozdílem je postupné zvyšování také výstupního napětí nabíječe. Typickým případem jsou tzv. dvoustupňové či vícestupňové nabíječe, kdy na počátku nabíjení značně vybitého akumulátoru se sníží výstupní napětí nabíječe (např. zvolením příslušné odbočky sekundáru transformátoru) a při

poklesu nabíjecího proudu pod určitou mez dojde k přepnutí na odbočku s vyšším napětím. Nebo lze této charakteristiky dosáhnout zařazením impedance (včetně ventilu s fázovým řízením) do sekundáru nebo primáru napájecího transformátoru. Nabíječe tohoto typu jsou vhodné především pro rychlé nabíjení, ovšem obtížně se navrhuje jako univerzální neboť různé druhy akumulátorů vyžadují k optimálnímu nabíjení různý sklon charakteristiky. Nezbytná je zde kontrola teploty elektrolytu [1] během nabíjení. Vůbec celý proces nabíjení vyžaduje daleko většího dohledu, než tomu bylo při použití nabíječů předchozích skupin. Počáteční rozvahou jaké výstupní napětí a nabíjecí proud nastavit počínaje, zmíněnou kontrolou teploty elektrolytu a včasným odpojením akumulátoru konče.

Nabíječe s touto charakteristikou lze rovněž vybavit vhodnými časovači, které po nastavené době odpojí akumulátor od nabíječe, příp. přepnou nabíjení na jiný stupeň, nebo opět použít řídicí logiku, která na základě vyhodnocení vstupních veličin zvolí optimální stupeň nabíjení. Zde se již však dá těžko obejít bez mikroprocesorového řízení nabíjení.

5 Návrh nabíječe

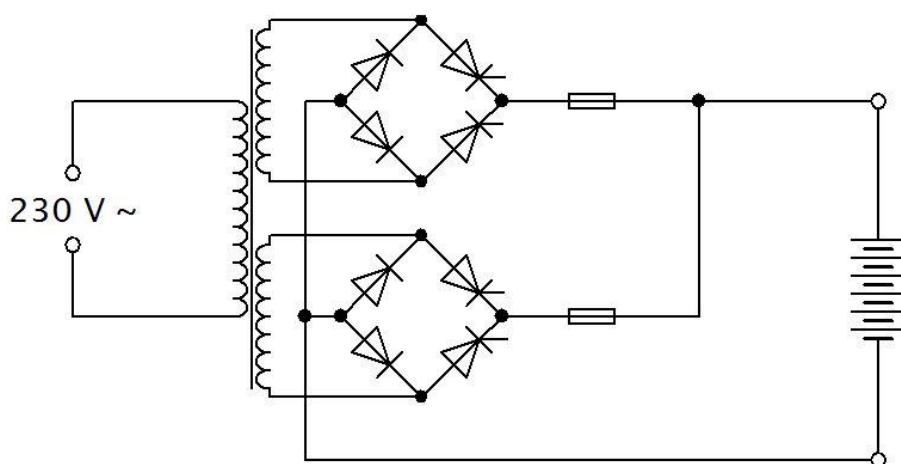
V souladu se zadáním této práce a účelem použití je třeba navrhnout nabíječ, který bude zaručovat bezpečný a spolehlivý provoz v jakékoli situaci, za jakýchkoli podmínek, má-li být instalován přímo ve vozidle, a bude dostatečně výkonný pro zajištění zprovoznění vozidla, lhostejno zda bylo vozidlo během předchozího odstavení temperováno nezávislým vytápěcím systémem nebo byl-li akumulátor vybit neúspěšným startem pro poruchu motoru. V prvním případě se předpokládá, že dobíjecí systém vozidla je v pořádku, akumulátor je nabit a nabíječ má za úkol pouze pokrýt spotřebu řídicích obvodů nezávislého topení a případně oběhového čerpadla a ventilátoru při teplovodním vytápění. Ve druhém případě je třeba zajistit alespoň částečné nabití akumulátoru do stavu, kdy bude schopen spustit motor, a to nejlépe ještě během odstraňování poruchy, pro kterou bylo před tím startování neúspěšné.

Nabízejí se dvě základní koncepce řešení. Buď jít cestou současného trendu a využití moderní součástkové základny a celé zařízení koncipovat v podstatě jako spínaný zdroj s mikroprocesorovým řízením se všemi výhodami a nevýhodami, nebo cestou analogového řízení, které skýtá jednodušší obvodové řešení a větší spolehlivost. V prvním případě bude celé zařízení vzhledem k vyšší pracovní frekvenci rozměrově menší a lehčí, avšak kvůli poměrně velkému výkonu mnohem problémovější z hlediska EMC. Kromě zmíněného výkonu situaci dále komplikuje skutečnost, že k usměrnění a vlastní regulaci, tj. spínání výkonového prvku, které je nejvýznamnějším zdrojem rušení, dochází ještě na primární straně transformátoru. Návrhu vstupního filtru je zde tedy potřeba věnovat značnou pozornost. Na druhé straně mikroprocesorové řízení nabízí širokou paletu možností nastavení a regulace, vystačí s jedinou konfigurací silového obvodu a jednotlivé průběhy (charakteristiky) nabíjení lze vymodelovat řídicím programem. Dále umožňuje diagnostikovat připojený akumulátor a podle toho zvolit nejvhodnější způsob nabíjení.

Poněkud jednodušší co do možností nastavení, avšak provozně značně spolehlivější a rovněž z nezanedbatelného hlediska EMC mnohem příznivější řešení přináší klasická analogová koncepce. Zde následuje za připojovacími svorkami k síťovému napětí téměř ihned síťový transformátor a vlastní regulační prvek (prvky) jakožto největší zdroj rušení se nachází až na jeho sekundáru. Celková hmotnost a rozměry tohoto druhu nabíječe budou mnohem větší oproti nabíječi s mikroprocesorovým řízením, avšak budeme-li předpokládat jeho použití především u železničních vozidel a nákladních automobilů, ztrácí i tento aspekt poněkud na významu. Také obvod pro řízení regulačních prvků bude složitější a jeho návrhu je třeba věnovat více pozornosti než u mikroprocesorového nabíječe, avšak čas spojený s touto činností je kompenzován tím, že odpadá tvorba programu pro mikroprocesor. Co se týče nastavení parametrů nabíječe pro přizpůsobení jednotlivým akumulátorům a vozidlům (napětí palubní sítě, kapacita a druh akumulátoru apod.), provádí se toto především nastavením potenciometrů v řídicích obvodech nabíječe. Pro jistou optimalizaci nabíjecích procesů a částečné omezení rizika omylu obsluhy lze na ovládací panel nabíječe umístit např. vícepolohový mechanický přepínač, který přestavením do dané polohy pro jednotlivé provozní situace zvolí odpovídající nastavení prvků v řídicích obvodech. Nebo lze provést alespoň automatickou volbu napětí palubní sítě pomocí vstupních komparátorů a relé, která nahradí příslušné polohy přepínače. Obsluha, resp. osoba provádějící montáž nabíječe do vozidla pak zvolí pouze druh akumulátoru, což by pravděpodobně musela učinit i v případě mikroprocesorového řízení.

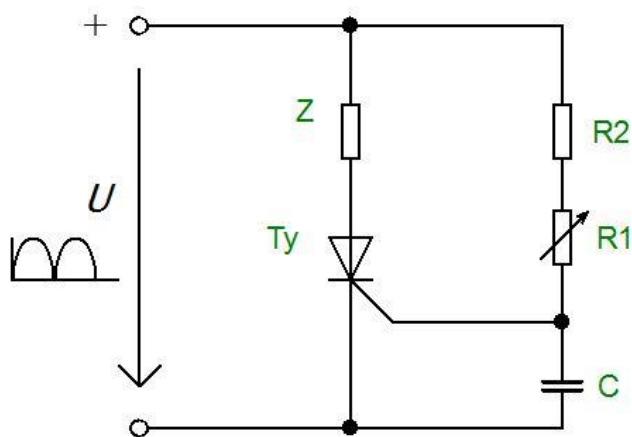
Vzhledem k výše uvedeným požadavkům by měl nabíječ co do výstupních veličin splňovat následující požadavky: výstupní napětí použitelné ve 12 a 24 V, příp. 48 V síti a výstupní proud minimálně 20 A. Ostatní napětí používaná ve vozidlech jsou 6 V – především u starých motocyklů, kde ke spouštění motoru docházelo pomocí lidské síly, a malých starých automobilů zejména východoněmecké výroby [20]. V obou případech se nepředpokládá nutnost udržování akumulátoru v provozuschopném stavu během delšího odstavení. Napětí 48 V se používá u starších elektrických lokomotiv a dosluhujících motorových vozů řady 810, příp. 809 ČD, které jsou vybaveny nezávislým teplovodním topením a oběhovým čerpadlem [21], proto návrh nabíječe počítá s touto napěťovou hladinou pouze jako doplňkovou. V dielelektrických lokomotivách výrobce ČKD Praha se dále používalo napětí 110 V. Vzhledem k masivní likvidaci těchto strojů navrhovaný nabíječ s touto hladinou již nepočítá. Pokud by přesto vznikl požadavek na možnost nabíjení akumulátorů 110 V, především ze strany soukromých provozovatelů těchto lokomotiv (několik málo strojů přežívá v různých spolcích zaměřených na železniční nostalgii), lze tento splnit výměnou síťového napájecího transformátoru a úpravou řídicích obvodů, případně pro provoz s omezeným výkonem použít sériového spojení sekundárních vinutí stávajícího transformátoru. Výstupní proud 20 A byl zvolen jako dostačující vzhledem k odběru řídicích obvodů nezávislých topení a oběhových čerpadel, příp. ventilátorů, jakož i k požadavku optimálního nabíjecího proudu rovnému v ampérech hodnotě desetiny jmenovité kapacity v ampérhodinách u vybitých olověných akumulátorů (v nákladních automobilech se používají akumulátory se jmenovitou kapacitou okolo 200 Ah).

Pro napájení silového obvodu byl při stavbě prototypu použit toroidní transformátor 800 VA se dvěma sekundárními vinutími 40 V/10 A určený původně pro stavbu nízkofrekvenčního zesilovače. Každé sekundární vinutí napájí polořízený usměrňovací můstek osazený dvěma diodami a dvěma tyristory, tvořící říditelný zdroj stejnosměrného tepavého napětí s frekvencí 100 Hz. Každý z těchto zdrojů je přes svoji pojistku vyveden do společné sběrnice, z níž se odvádí přes výstupní svorky proud do palubní sítě vozidla (akumulátoru). Schéma silového obvodu je na obr. 11.



Obr. 11 Silový obvod nabíječe

Výstupní napětí a nabíjecí proud jsou nastaveny fázovým řízením tyristorů v usměrňovacích můstcích. Je zřejmé, že vzhledem k poměrně vysokému sekundárnímu napětí (maximální napětí naprázdno je až 60 V) bude ke spínání tyristorů především při použití ve 12 a 24 V palubní síti docházet ve druhé polovině periody, tedy pro $\alpha \in (\pi/2; \pi)$, kde α je tzv. řídicí úhel tyristorového spínače. V analogové technice se používá několik typických zapojení umožňujících fázové řízení tyristoru. Nejjednodušší je použití zpožďovacího RC obvodu, jak je patrné z obr. 12. Obvod je napájen rovněž jednocestně či dvoucestně usměrněným střídavým napětím. Při nárůstu napájecího napětí s příchodem nové periody se tyristor dostává do blokovacího stavu, neboť jeho sepnutí je prozatím blokováno vybitým kondenzátorem C, který v tomto okamžiku zkratuje řídicí elektrodu G s katodou K tyristoru (nulovým potenciálem). Kondenzátor C se však postupně nabíjí přes rezistory R1 a R2, až napětí na něm dostoupí hodnoty nutné k „otevření“ PN přechodu v obvodu G-K tyristoru. Jakmile se tento přechod otevře, umožní průchod vybíjecího proudu z kondenzátoru, a je-li tento proud dostatečně velký a působí dostatečně dlouho, způsobí zapnutí tyristoru. Zpoždění, se kterým se tak stane, odpovídá velikosti řídicího úhlu α . Změna řídicího úhlu α je možná v tomto obvodu pouze změnou parametrů RC obvodu, proto je jeden z rezistorů proměnný. Tyristor pak dále zůstává sepnutý po celou dobu trvání periody, prochází-li jeho hlavním obvodem (A- K) pracovní proud větší než tzv. proud vratný, charakteristický pro daný tyristor.

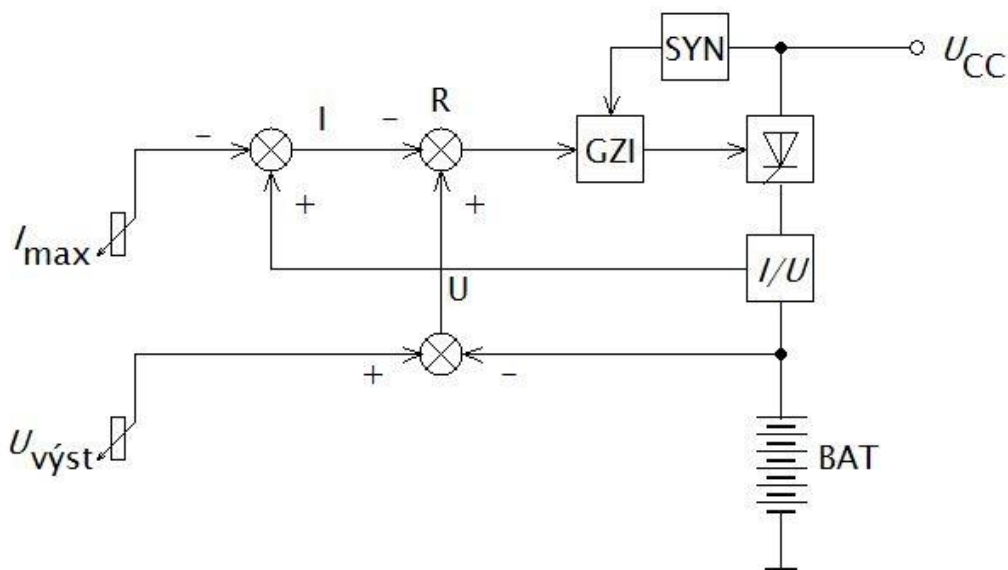


Obr. 12 Jednoduchý obvod pro fázové řízení tyristoru

Je zřejmé, že takto zkonstruovaný obvod vyhoví pouze pro nenáročné aplikace, typickou oblastí použití je regulace výkonu malých domácích spotřebičů jako žárovek či malých motorků. Spínacím prvkem bývá však většinou triak. Při větších spínaných výkonech vyvstává již nutnost použití elektrolytického kondenzátoru, který se však vyznačuje nejen poměrně velkým svodovým proudem, ale hlavně změnou svých parametrů v průběhu své životnosti a tím negativním vlivem na spolehlivost regulace. Další nevýhodou je nutnost vnějšího zásahu obsluhy, má-li dojít k omezení či obecně regulaci proudu a napětí na zátěži. Má-li zařízení pracovat zcela automaticky, tedy nepřipustit průchod většího než nastaveného proudu, bude nutné použít zcela jiný způsob fázového řízení.

Pro návrh požadovaného (zadaného) nabíječe je nutné vyjít ze základního regulačního schématu, znázorněného na obr. 13. Nabíjený akumulátor, jakož i celou palubní síť vozidla v něm představuje symbol akumulátoru s označením BAT. Ten je připojen přes převodník proud – napětí

I/U plní funkci snímače velikosti nabíjecího proudu a tyristorový blok k napájecímu usměrněnému napětí U_{cc} . Činnost tyristorového bloku je řízena generátorem zapalovacích impulzů GZI, do kterého vstupuje jednak požadavek na okamžik sepnutí, který je dán výstupním signálem z regulátoru R, a jednak synchronizační signál z bloku SYN, jehož funkce bude objasněna v dalším textu. Regulátor vysílá požadavek na okamžik sepnutí tyristoru na základě vyhodnocení nastaveného a skutečného napětí na akumulátoru BAT (signál U) a na vyhodnocení signálu z podřízené proudové regulační smyčky (signál I). Signál U vzniká sloučením resp. odečtením naměřeného napětí na akumulátoru BAT od nastaveného referenčního napětí obsluhou $U_{výst.}$. Podobně signál I je rozdílem napětí, které odpovídá nastavenému proudovému limitu I_{max} a napětí z převodníku I/U , které je úměrné proudu procházejícímu hlavním obvodem.

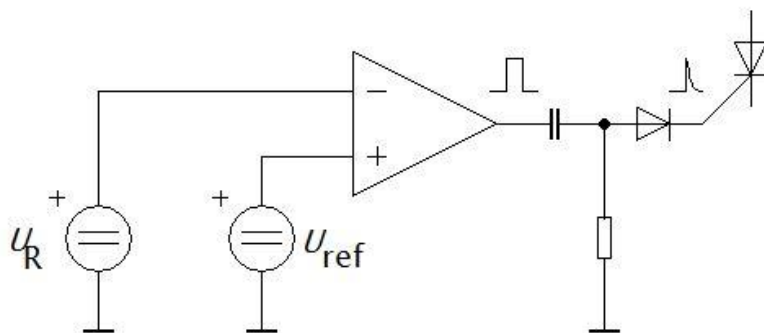


Obr. 13 Regulační schéma nabíječe

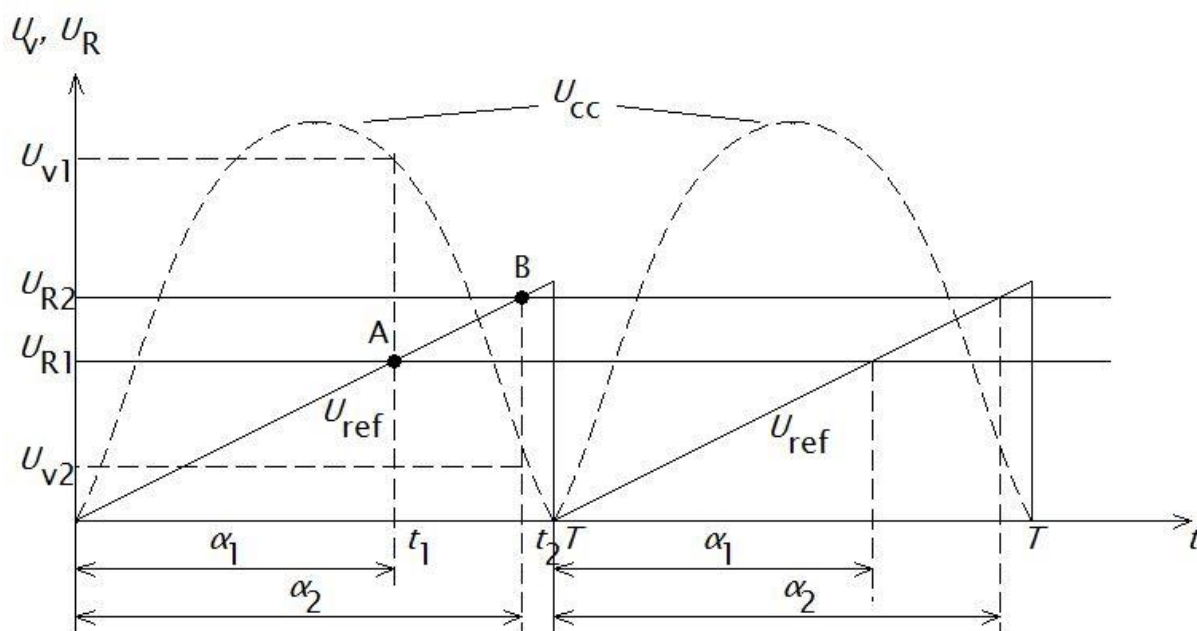
Z předchozího textu vyplynulo, že velikost nabíjecího napětí a tím nabíjecího proudu je jednoznačně dána okamžikem sepnutí tyristorů v měnič – usměrňovači. Je tedy třeba poměrně přesně určit řídicí úhel α vzhledem k provozním podmínkám, ba dokonce s ohledem na měnící se zatížení výstupu tento měnit a navíc musejí tyto regulační pochody probíhat zcela samočinně, tj. bez zásahu obsluhy. Jelikož všechny vstupní i výstupní signály v soustavě dle obr. 13 mají charakter elektrických napětí, a má-li být splněn požadavek na samočinnou změnu řídicího úhlu α přímo pomocí těchto signálů, nabízí spolehlivé řešení určení okamžiku sepnutí tyristorů v usměrňovači metoda komparace referenčního pilového signálu a napětí daného výstupem regulátoru R. Pouhou změnou tohoto napětí pak lze v širokých mezích měnit řídicí úhel α a tím výstupní napětí, potažmo proud při dané zátěži.

Princip regulace je naznačen na obr. 14 a 15. Na obr. 14 je principiální schéma zapojení. Do invertujícího vstupu komparátoru se přivádí řídicí napětí U_R , zatímco neinvertující vstup je připojen ke zdroji referenčního pilového napětí U_{ref} . Věnujme nyní pozornost obr. 15. Předpokládejme, že na invertujícím vstupu komparátoru se nejprve nachází napětí U_{R1} . Na počátku periody je tedy na tomto vstupu větší napětí než na neinvertujícím, neboť na něm napětí lineárně stoupá od nuly. V tomto okamžiku se komparátor nachází v tzv. záporné saturaci, a pokud je napájen nesymetricky proti kostře, bude na jeho výstupu napětí blízké 0 V. Tento stav setrvá až do

času t_1 , který odpovídá řídicímu úhlu α_1 , kdy lineárně se zvyšující napětí na neinvertujícím vstupu o málo překročí hodnotu napětí U_{R1} na invertujícím vstupu (bod A) a překloupí tak komparátor do tzv. kladné saturace, tj. kdy se na jeho výstupu objeví kladné napětí, blížíci se napájecímu. Tento skok projde derivačním členem připojeným k výstupu komparátoru, kde se vytvoří úzký jehlový impulz, který je pak přiveden přes oddělovací diodu na řídicí elektrodu tyristoru. Hlavní obvod tyristoru je připojen k napájecímu napětí U_{CC} , jehož průběh je na obr. 15 naznačen čárkovaně a v čase t_1 se na něm nachází napětí U_{v1} , které se po zapnutí tyristoru objeví coby výstupní napětí na zátěži.



Obr. 14 Principiální schéma zapojení pro změnu řídicího úhlu tyristoru (měniče)

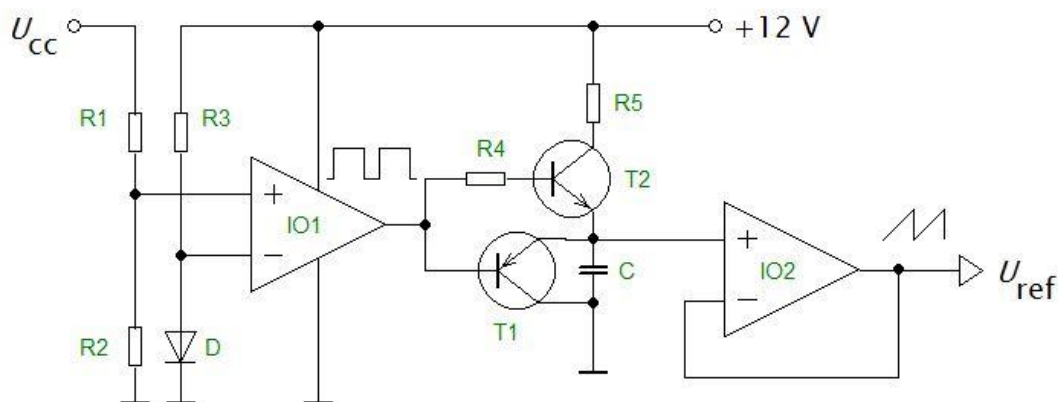


Obr. 15 K vysvětlení principu regulace tyristorového měniče

Bude-li nyní potřeba napětí na zátěži například zmenšit, stane se tak na základě pouhého zvýšení řídicího napětí U_{R2} . Okamžik přepnutí komparátoru, nyní bod B, se přesune do času t_2 , tedy dojde ke zvětšení řídicího úhlu na α_2 , kterému pak odpovídá výstupní napětí U_{v2} . V obr. 15 jsou hodnoty výstupních napětí pro přehlednost odečteny pouze z první periody.

Jednou ze základních podmínek pro spolehlivou regulaci je použití referenčního pilového signálu přesně synchronizovaného s napájecím napětím tyristorového usměrňovače. V opačném případě by při kmitočtové nestabilitě generátoru nebo při kolísání kmitočtu v síti dříve nebo později

docházelo ke spínání tyristorů v měniči ve zcela nevhodných či dokonce nebezpečných situacích. Jako zdroj pilového referenčního signálu synchronizovaného s napájecím napětím poslouží obvod podle obr. 16.



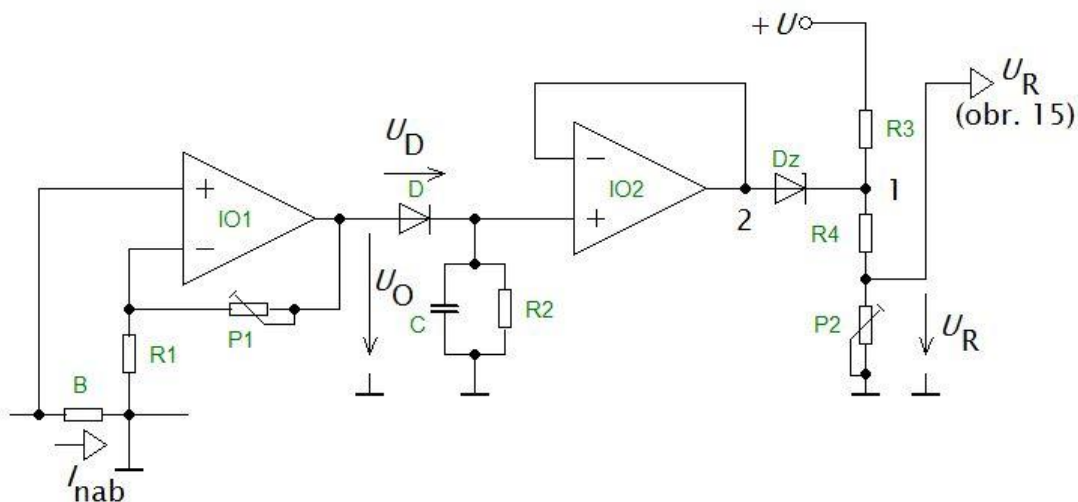
Obr. 16 Generátor synchronizovaného referenčního pilového signálu

Operační zesilovač IO1 pracuje jako tvarovač usměrněného tepavého napětí U_{CC} , které je odvozeno od střídavého napětí, kterým se napájí polořízený usměrňovač (tyristorový měnič). To je přivedeno přes odporový dělič R1-R2 do neinvertujícího vstupu IO1. Invertující vstup je připojen k napěťové referenci sestávající z děliče R3-D. Kdykoliv je napětí na neinvertujícím vstupu větší než asi 0,7 V, nachází se výstup tvarovače v kladné saturaci a přes rezistor R4 otevře tranzistor T2. Ten připojí kondenzátor C ke kladnému napájecímu napětí přes rezistor R5, který se počne nabíjet. Je-li časová konstanta tohoto RC obvodu dostatečně dlouhá vzhledem k frekvenci usměrněného napětí U_{CC} , bude se kondenzátor nabíjet lineárně na určitou hodnotu napětí. Při poklesu napětí na neinvertujícím vstupu IO1 pod hodnotu 0,7 V se obvod překlápí do záporné saturace, na svém výstupu, tedy vzhledem k nesymetrickému napájení, vytvoří napětí přibližně 0 V, které způsobí uzavření tranzistoru T2 a naopak otevření tranzistoru T1, který je opačné vodivosti než T2 a který způsobí mnohem rychlejší vybití kondenzátoru, než tomu bylo v případě jeho nabíjení, neboť v tuto chvíli je vybíjecímu proudu vřazen do cesty pouze diferenciální odpor tranzistoru T1 v saturaci, který je v porovnání s odporem rezistoru R5 velmi malý. S dalším vzestupem napětí na neinvertujícím vstupu IO1 se celý cyklus opakuje. Průběhy napětí na kondenzátoru C jsou snímány napěťovým sledovačem realizovaným operačním zesilovačem IO2 v zapojení tzv. impedančního převodníku, vykazujícím vysokou vstupní a velmi nízkou výstupní impedanci. Toto oddělení je vhodné použít, aby připojením dalšího obvodu na výstup generátoru nedošlo k jeho přetížení a tím ke znehodnocení výstupního signálu.

O okamžiku sepnutí v souladu s regulačním schématem z obr. 13 rozhoduje jednak požadované výstupní napětí, a jednak velikost proudu procházející hlavním obvodem, přesněji velikost proudu zasahuje do regulace až po překročení nastaveného limitu. Nejjednodušším a patrně také nejspolehlivějším způsobem snímání protékajícího proudu je snímání úbytku napětí, který vytvoří svým průchodem na malém rezistoru, tzv. bočníku. Nevýhodou tohoto způsobu měření bývá při větších proudech nutnost použít bočníku s velmi malou hodnotou odporu a velkým ztrátovým výkonem, která klade specifický důraz na konstrukci bočníku, a dále též snížení napětí na výstupních svorkách zařízení, neboli zvětšení výstupního odporu zdroje. Určitým

kompromisem, avšak za cenu větší složitosti obvodu, je použití zesilovače úbytku napětí, který dále umožní snadnější kalibraci měřicího zařízení (obvodu). Pokud by se pro následující měřicí či vyhodnocovací obvody použil přímo úbytek napětí zmařený na bočníku, kladlo by to o to větší důraz na jeho konstrukci. Jinak řečeno, bočník by musel být velice přesně opracován. Naproti tomu při použití zesilovače se dá nastavením jeho zesílení celé měření snadno kalibrovat. Důležité však je, aby pracovní bod zesilovače byl nastaven do lineárních částí jeho charakteristik. Při dodržení konstrukčních zásad, tj. umístění měřicího zesilovače co nejdále od zdrojů ztrátového tepla, použití kvalitních součástek a zabezpečení malých proudů procházejících měřicím obvodem, pak lze v rámci celého navrhovaného nabíječe zanedbat rovněž otázku teplotní kompenzace zesilovače.

Otázku nastavení okamžiku sepnutí tyristorů vzhledem k požadovanému napětí vyřeší jednoduchý obvod se Zenerovou diodou nebo teplotně kompenzovaným zdrojem napětí. Na obr. 17 je principiální schéma celého zdroje řídicího napětí U_R pro komparátor z obr. 14, zahrnující obvod pro nastavení požadovaného výstupního napětí a obvod zpětné vazby pro omezení proudu. V levé části obr. 17 je obvod pro měření nabíjecího proudu I_{nab} a v pravé části obvod zdroje základního stabilizovaného napětí. Funkce obvodu je následující: Procházející proud I_{nab} vytvoří na bočníku B úbytek napětí, který je zesílen operačním zesilovačem IO1, zapojeným jako neinvertující zesilovač, a tak je jeho výstupní napětí U_O ve fázi s napětím vstupním. Je-li výstupní napětí U_O vyšší než prahové napětí diody D (U_D), je tento rozdíl $U_O - U_D$ na určitou dobu zachycen kondenzátorem C. Jelikož má proud I_{nab} impulzní průběh, brání dioda D zpětnému toku náboje do měřicího zesilovače po poklesu proudu I_{nab} . Napětí na kondenzátoru je snímáno napěťovým sledovačem IO2, který na svém výstupu vytvoří (ve schématu na obr. 17 bod 2) stejné napětí jako na svém vstupu a slouží tak impedančním oddělení vstupního a výstupního obvodu. Podrobněji byla jeho funkce vysvětlena v předchozím textu. Indexování veličin U_R , U_V , t a α odpovídá obr. 15.



Obr. 17 Zdroj řídicího napětí U_R

Neprochází-li žádný nabíjecí proud I_{nab} nebo je-li jeho velikost taková, že po zesílení úbytku napětí na bočníku B je $U_O < U_D$, je kondenzátor vybit a v bodě 2 je proti kostře napětí 0 V. Zde je nutné učinit malou odbočku. V následujících schématech, jakožto v celém zařízení je symbolem kostra míněn společný napěťový uzel, kterému je v rámci celého zařízení přiřazena napěťová hladina 0 V (tzv. vnitřní kostra přístroje), tedy nikoli chassis přístroje. Důvody k tomuto

řešení budou vyjasněny v následujícím textu a ve schématech je tak učiněno pro jejich lepší čitelnost.

Zenerova dioda D_z je katodou připojena přes rezistor R_3 ke kladnému stejnosměrnému napětí U a anodou je opřena o tzv. plovoucí zem, mající v tomto okamžiku napětí společného uzlu všech řídicích obvodů, tedy také obvodu komparátoru z obr. 14. V bodě 1 na obr. 17 tak vznikne proti společnému uzlu (společné napěťové hladině 0 V) napětí $U_{(1)}$ dané Zenerovým napětím diody D_z (U_Z):

$$U_{(1)} = U_Z \quad (10)$$

a po jeho vydělení děličem R_4 - P_2 získáváme řídicí napětí U_{R1} :

$$U_{R1} = U_Z \frac{P_2}{P_2 + R_3}, \quad (11)$$

které je pak přivedeno do invertujícího vstupu komparátoru na obr. 14. Zde se porovná s referenčním pilovým signálem přiváděným do neinvertujícího vstupu a obvod reaguje tak, jak bylo popsáno v odstavci k obr. 14. Na výstupu tyristorového měniče se tak v čase t_1 od začátku periody objeví požadované výstupní napětí U_{v1} a při připojené zátěži (akumulátoru) bude obvodem protékat odpovídající proud I_{nab} .

Bude-li po zapnutí tyristoru v čase t_1 (na obr. 15) nabíjecí proud I_{nab} tak velký, že po zesílení zesilovačem IO1 na obr. 17 splní podmínku $U_o > U_D$, bude v souladu s výše uvedeným tento rozdíl zachycen kondenzátorem C a objeví se v bodě 2, čímž přizdvihne tzv. plovoucí zem, která je na anodě Zenerovy diody o napětí na kondenzátoru C , které se přičte k napětí v bodě 1, neboť to je měřené přímo proti vnitřní kostře přístroje (společnému napěťovému uzlu 0 V). V bodě 1 bude nyní tedy napětí

$$U_{(1)} = U_Z + (U_o - U_D). \quad (12)$$

Tento rozdíl je pak po vydělení děličem R_4 - P_2 a přičten k napětí U_R , takže pro řídicí napětí U_{R2} platí:

$$U_{R2} = \left[U_Z + (U_o - U_D) \right] \frac{P_2}{R_3 + P_2}. \quad (13)$$

Okamžik sepnutí tyristorů se tedy posunul do okamžiku t_2 od začátku nové periody a na výstupu měniče se objeví menší napětí U_{v2} . Tím poklesne také proud I_{nab} .

Aby nedocházelo k trvalému či dlouhodobému omezení nabíjecího proudu, je ke kondenzátoru C paralelně připojen rezistor R_3 , který jej pomalu vybíjí a snižuje tak řídicí napětí U_R , což dále způsobí pozvolný nárůst výstupního napětí U_v a tím nabíjecího proudu, a to až do okamžiku, kdy opět zasáhne proudová regulace a systém se ustaví v nové rovnováze. Po poklesu nabíjecího proudu pod mez, kdy napětí U_o již neotevře diodu D , je na výstupu měniče stále napětí U_v , které se již nemění a s rostoucím svorkovým napětím na akumulátoru i dále klesá nabíjecí proud. Akumulátor je tak udržován v nabitěm stavu neomezeně dlouhou dobu. Je zřejmé, že maximální proud se nastavuje trimrem P_1 a požadované výstupní napětí trimrem P_2 .

Základní principy řízení výkonu dobíječe byly vysvětleny a k výkladu dalších funkcí bude lépe vyjít z celkového schématu zapojení, které je uvedeno na obrázku v příloze 1. Zde jsou patrné jednotlivé dílčí skupiny tak, jak byly podrobně vysvětleny v předchozích odstavcích, doplněné o další součástky, zaručující správnou činnost obvodu. Dále jsou zde uvedeny obvody pomocné, kterým bude věnována zvláštní kapitola.

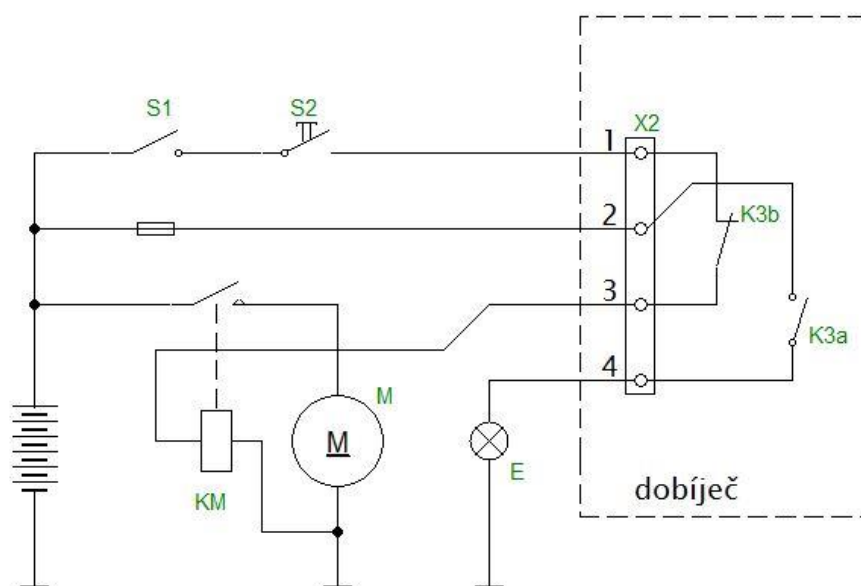
Prívod síťového napětí 230V/50Hz je do dobíječe proveden svorkovnicí (konektorem) X1. Přes pojistku F1 je fázové napětí vedeno přímo k transformátoru TR2 230V/2×12V, který slouží k napájení řídicích, pomocných a ochranných obvodů, a dále přes výkonový rezistor R20 do toroidního transformátoru TR1 230V/2×40V 800 VA, sloužící k napájení silového obvodu. Rezistor R20 má funkci tzv. soft-startéru, omezujícího proudový ráz vznikající po připojení transformátoru TR1 k síti. Po cca 3 až 5 sekundách je rezistor R20 přemostěn pracovním kontaktem zpoždovacího relé K1. Cívka tohoto relé je napájena z transformátoru TR2, a dále ze zdroje stabilizovaného napětí +12V a je spínána tyristorem Ty5, který je řízen časovacím RC obvodem sestávajícího z R19 a C23, jehož časová konstanta je volena tak, aby tyristor Ty5 sepnul právě po 3 až 5 sekundách.

Silový obvod sestává ze dvou polořízených usměrňovačů Ty1, Ty2, D1 a D2 a Ty3, Ty4, D3 a D4 tak, jak byl popsán v předchozím textu. Paralelně ke každému tyristoru v můstku jsou zapojeny RC členy R1-C1, R2-C2, R3-C3 a R4-C4, mající za úkol omezit napěťové špičky vznikající při spínání tyristorů [1]. Výstupní napětí z usměrňovačů je přes pojistky F2 a F3 vedeno k bočníku R5 a dále přes pojistku F4 do výstupního silového konektoru X3. Sem je připojen přímo akumulátor vozidla. Odpojovač Q1 je součástí původní instalace vozidla (nákladní automobily a lokomotivy jsou jím vybaveny). Symboly + a – v kroužcích je naznačena palubní síť vozidla. Mezi bočníkem R5 a pojistkou F4 je naznačeno spojení s vnitřní kostrou. Chassis přístroje musí být od tohoto bodu galvanicky odděleno, neboť většina vozidel má ukostřen záporný pól akumulátoru. Spojení se chassis přístroje je provedeno pouze u přívodu síťového napětí u konektoru X1 a je vyobrazeno symbolem uzemnění. Toto řešení vyžadují zapínací obvody tyristorů, galvanicky spojené s řídicími obvody. Tyristory Ty1-Ty4 jsou řízeny ze zesilovače zapalovacích impulzů realizovaným tranzistorem T5 přes ochranné diody D17-D20 a rezistory R1-R4.

Sekundární vinutí pomocného transformátoru TR2 má vyvedeno střed, který je galvanicky spojen vnitřní kostrou. Opačné konce sekundárního vinutí jsou pak přivedeny na vstup můstkového usměrňovače, sestávajícího z diod D5-D8, případně diodového usměrňovacího můstku (ve schématu v příloze 1 není zakreslen). Na jeho výstupu se nachází usměrněné pulzující napětí. Z kladného pólu usměrňovače je toto napětí vedeno do děliče R14-R15 a současně přes oddělovací diodu k filtračním kondenzátorům C9-C12. Na výstupu pak vzniká stejnosměrné napětí ± 16 V, symetrické proti vnitřní kostře. To je dále vedeno do monolitických stabilizátorů 7812 a 7912 na jejichž výstupech získáváme stejnosměrné symetrické stabilizované napětí ± 12 V, dodatečně filtrované dvojicí kondenzátorů C13, C14, sloužící pro napájení všech pomocných a řídicích obvodů. Z nestabilizované sítě +16 V je dále napájen zesilovač zapalovacích pulzů pro tyristory Ty1-Ty4.

Ihned po vytvoření stabilizovaného napětí ± 12 V spíná blokovací relé K3, které má pracovní a klidové kontakty vyvedeny na svorkovnici X2. Tyto kontakty představují průchozí

signály např. pro spouštěče spalovacích motorů, případně pro signalizaci připojení vozidla ke stacionárnímu zdroji napětí. Příklad takového zapojení je na obr. 18.



Obr. 18 Příklad zapojení blokování spouštěče a signalizace připojení dobíječe k síti

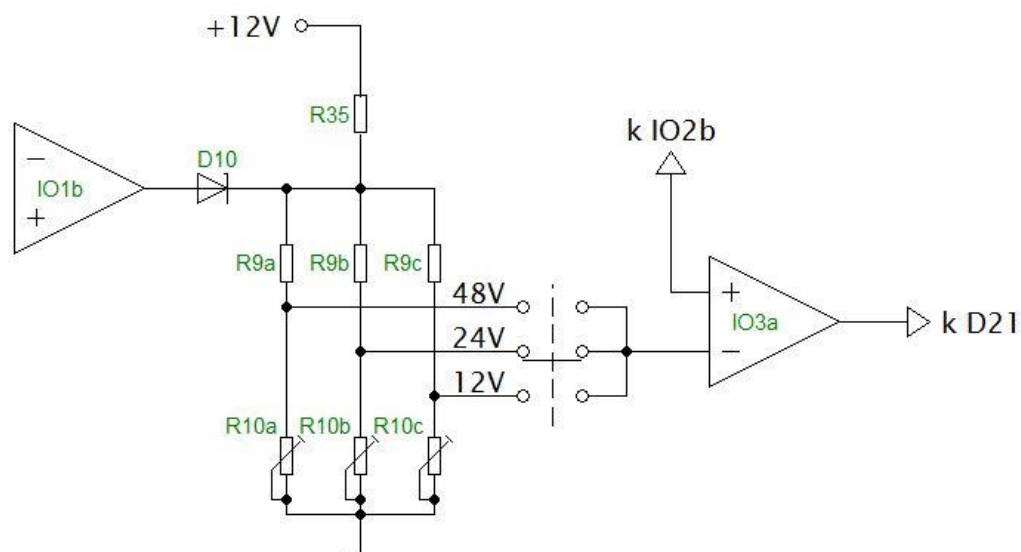
Ve vozidle se provede zapojení dle schématu na obr. 18, tj. přívod k ovládací cívce KM spouštěče spalovacího motoru se provede přes spínač zapalování S1 (příslušné kontakty ve spínací skříňce), spínač spouštěče S2 (poloha start ve spínací skříňce) a nově přes kontakty 1–3 konektoru X2 dobíječe, kam jsou připojeny klidové doteky relé K3 (K3b), které jsou při provozu dobíječe rozpojeny a znemožní start spalovacího motoru. Dále je možné například na panel přístrojů v kabině umístit kontrolní žárovku E, která je přes kontakty 2–4 konektoru X2, kam jsou vyvedeny pracovní doteky K3a připojena ke kladnému pólu baterie ve vozidle. Žárovka tak signalizuje provoz dobíječe, tedy že vozidlo je připojeno ke stacionárnímu zdroji elektrické energie a upozorňuje tím na zákaz jeho pohybu.

Vraťme se však k celkovému schématu zapojení v příloze 1. Ihned po zapnutí napájení se rozbíhá generátor referenčního pilového signálu tvořený zesilovači IO2a a IO2b, tranzistory T1 a T2, rezistory R11-R15, kondenzátorem C6 a diodou D12. Ostatní součástky slouží pro správnou funkci obvodu – kondenzátory C7, C8 dodatečně filtrují napájecí napětí a zabraňují rozkmitání zesilovačů, Zenerova dioda D11 vytváří záporné předpětí, aby výstupní pilový signál vycházel z nulové hodnoty napětí. Pokud by toto předpětí nebylo, a záporný pól operačního zesilovače byl připojen přímo k nulovému potenciálu vnitřní kostry, nevycházel by výstupní signál v důsledku saturačních napětí koncových tranzistorů operačního zesilovače z nulové hodnoty. Jak bylo popsáno v odstavci, ve kterém byla podrobněji vysvětlena činnost generátoru pilového signálu, je nutná jeho přesná synchronizace s napájecím síťovým napětím, přesněji s napětím, které slouží k napájení silového obvodu. Jelikož jsou oba transformátory TR1 i TR2 připojeny ke stejnému zdroji, lze k odvození synchronizace přímo použít pulzující usměrněné napětí, které se nachází na výstupu usměrňovače D5-D8. Jelikož řídicí obvody však ke své činnosti potřebují vyhlazené

stejnoseměrné napětí, došlo by po připojení filtračních kondenzátorů přímo na výstup usměrňovače ke znehodnocení synchronizačního signálu. Problém řeší oddělovací dioda D13.

Dále se s přítomností napětí ve stabilizované síti ± 12 V začíná nabíjet zpoždovací kondenzátor C23 přes rezistor R19. Po vytvoření potřebného napětí spíná tyristor Ty5 relé K1, jak již bylo uvedeno, a dále se otevírá tranzistor T3, neboť tranzistor T2 je uzavřen (prozatím chybí signál přerušení xp, který generuje obvod v příloze 2) a spíná tak relé K2. To má své klidové doteky K2a zapojené v obvodu sběrného kondenzátoru proudového omezení C5. Po připojení síťového napětí je relé K2 odpadlé, takže se kladné napětí dostane přes jeho klidové doteky z odporového děliče R17-R18, na kondenzátor C5, který se tak nabije na napětí dané poměrem obou rezistorů a uměle tak nasimuluje nadproud v hlavním obvodu. Po sepnutí relé K2 se však kladné napětí z děliče R17-R18 odpojí a kondenzátor C5 se pak vybíjí do odporu R8, čímž na něm zvolna klesá napětí. Při zapnutí dobíječe tak dochází k postupnému zvyšování výstupního napětí U_v a tím k pozvolnému nárůstu nabíjecího proudu. Nárůst výstupního napětí U_v trvá až do dosažení nastavené jmenovité hodnoty, případně dokud nezasáhne obvod proudového omezení.

Maximální výstupní nabíjecí proud I_{nab} je dán zesílením neinvertujícího zesilovače IO1a, které lze měnit změnou hodnoty odporu R7 ve zpětné vazbě. Tento rezistor je tak proveden jako proměnný, aby bylo možné přesné nastavení maximálního proudu I_{nab} . Podobně výstupní napětí U_v se bude zřejmě měnit s poměrem velikostí odporů v děliči R9- R10. Rezistor R10 je tedy rovněž realizován jako proměnný a slouží k nastavení výstupního napětí U_v . Bude-li se v zapojení takto nacházet pouze jeden dělič napětí pro nastavení výstupního napětí U_v , bude nutné při konstrukci dobíječe, příp. při jeho montáži do vozidla výstupní napětí nastavit přímo trimrem R10. Z důvodu zkrácení doby potřebné k instalaci do vozidla a v neposlední řadě také k omezení (vylovení) omylu při nastavování výstupního napětí vyvstává požadavek na použití předvoleb, kdy na vhodné místo na skřínce přístroje bude vyveden vícepolohový přepínač, který bude spínat různou kombinaci velikostí odporů R9 a R10, příslušnou ke každému jmenovitému výstupnímu napětí. Situaci zachycuje obr. 19.



Obr. 19 Způsob zapojení přepínače úrovní výstupních napětí

Původní napěťový dělič R9-R10 byl rozdělen na tři a to R9a-R10a, R9b-R10b a konečně R9c-R10c. Každý dělič bude při sestavování dobíječe nastaven tak, aby výstupní napětí U_v odpovídalo příslušné hodnotě. Prototyp dobíječe, který bude pro účely této práce zkonstruován a proměřen však s touto možností nepočítá, neboť bude trvale instalován v historickém nákladním automobilu Tatra T 813, a jeho obvodové řešení tak bude zcela odpovídat schématu v příloze 1. Výstupní napětí U_v bude odpovídat palubní síti 24 V.

6 Pomocné a ochranné obvody

K pomocným obvodům navrhovaného nabíječe patří obvod soft-startu, který již byl popsán v předchozí kapitole. Dále obvod blokování startu spalovacího motoru, který byl rovněž popsán tamtéž. Do obou kategorií, tedy jak pomocných tak ochranných obvodů, lze zařadit schéma na obrázku v příloze 2. Jedná se o obvod vyvolávající přerušované nabíjení, a je-li k akumulátoru navíc připojena zátěž např. ve formě oběhového čerpadla teplovodního topení, lze tento způsob nabíjení prohlásit za cyklický (reverzní), mající blahodárny vliv na samotný akumulátor, především na jeho životnost [1]. Zejména starší akumulátory lze takto udržet v provozuschopném stavu mnohem déle, než kdyby byly trvale připojeny k dobíječi. Doplňující funkcí je odstranění rizika přebíjení akumulátoru, ačkoliv samotná konstrukce dobíječe tak, jak byla popsána v předchozí kapitole, toto riziko při správně nastaveném výstupním napětí takřka vylučuje. Tato funkce bude vypínatelná a vhodná především pro dlouhodobější odstavení vozidla, nikoli tedy pokud je potřeba nabít napůl nebo zcela vybitý akumulátor.

Základem obvodu je astabilní klopný obvod generující obdélníkový signál s velmi dlouhou periodou, určující dobu provozu a dobu přerušení a paměťový člen. Ten je realizován jako klopný obvod D. Časovač tvoří integrovaný obvod 555, zapojený jako astabilní klopný obvod (tzv. multivibrátor). Doba provozu je nastavena zhruba na 120 sekund a doba přerušení na 30 sekund. Perioda obdélníkového signálu a tím doba jednoho cyklu je tedy 150 sekund. Takto dlouhé časy jsou již téměř hraniční, s ohledem na vlastnosti součástek. Zejména zde vyvstává nutnost použití elektrolytických kondenzátorů velkých kapacit se všemi jejich nevýhodami a rezistorů s velkými hodnotami odporu. Nicméně se současnou součástkovou základnou již lze tento problém spolehlivě vyřešit právě bez nutnosti použití více časovačů, nebo dokonce navrzení zcela jiné topologie zapojení.

Nabíjecí proud I_{nab} tedy bude procházet po dobu asi 120 sekund a v následujících 30 sekundách bude jeho průchod blokován. Během této doby se bude měřit napětí na akumulátoru, a pokud na konci této doby bude napětí akumulátoru menší než nastavená mez, bude po dobu dalších 120 sekund akumulátor dále dobíjen. V opačném případě bude nabíjení minimálně po dobu následujícího cyklu blokováno. Blokování nabíjecího proudu I_{nab} je provedeno signálem xp. Je-li třeba průchod nabíjecího proudu přerušit, je nutné přivést kladné napětí do báze tranzistoru T4 (ve schématu v příloze 1), čímž se T4 otevře a odebere buzení tranzistoru T3 tím, že vyzkratuje k vnitřní kostře, tedy k nulovému potenciálu, bázi tranzistoru T3. Ten se uzavře, čímž ihned odpadá relé K2, a sepne tak své klidové doteky K2a, zapojené v obvodu proudového omezení. Tím připojí dělič R17-R18 ke kladnému napětí +12 V, a dojde tak k nabití sběrného kondenzátoru C5 a tím k vyvolání fiktivního nadproudu v hlavním obvodu podobně, jako je tomu při připojení dobíječe k síti. Zvýší se tak úroveň řídicího napětí U_R , zvětší se řídicí úhel α tyristorů a okamžik jejich sepnutí se posune do doby, kdy napájecí napětí hlavního obvodu kleslo hluboko pod úroveň připojeného akumulátoru.

Pohledme nyní zpět na obrázek v příloze 2. Jak bylo uvedeno v předchozím odstavci, cílem je pro přerušování nabíjecího procesu vytvořit signál xp. Na výstupu časovače 555 je po dobu určenou k nabíjení logická úroveň H, trvající 120 sekund. Ta je negována invertorem NOT na úroveň L a přivedena na vstup hradla OR, plnící funkci logického součtu, generující signál xp, a dále na vstup CLK klopného obvodu D. Do druhého vstupu klopného obvodu označeného D

přichází signál z komparátoru IO3b, resp. z katody diody D16. Výstup klopného obvodu je přiveden na druhý vstup hradla OR. Pravdivostní tabulka klopného obvodu D je v tab. 1.

Tab. 1 Funkční tabulka D klopného obvodu

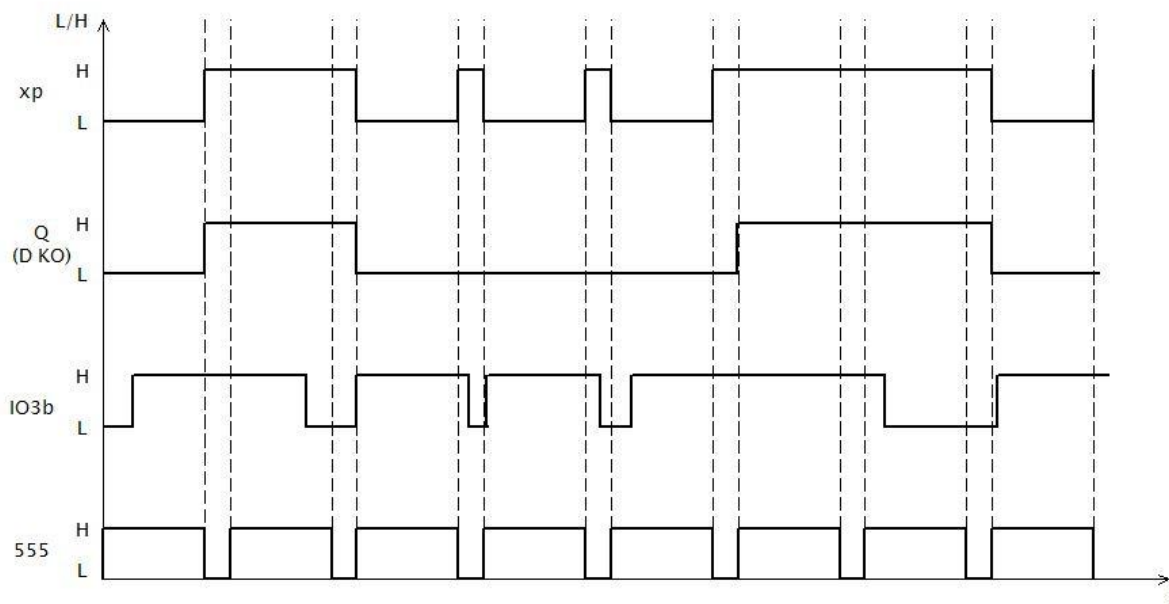
vstupy		výstupy	
D	CLK	Q	\bar{Q}
L	L	L	H
H	L	L	H
H	H	H	L
L	H	H	L
L	L	H	L
L	H	L	H

Po uplynutí 120 sekund se mění na výstupu časovače 555 úroveň z H na L. Invertor NOT ji změni na H, která se dostává na vstup hradla OR a tím se na jeho výstupu objevuje úroveň H, která se jako signál xp dostává na bázi tranzistoru T4 ve schématu v příloze 1 se všemi důsledky tak, jak byly popsány v předchozím textu. Dále se výstupní úroveň L z výstupu časovače 555 dostává na vstup CLK klopného obvodu, kde zatím nezpůsobí žádnou odezvu, neboť klopný obvod D reaguje až na vzestupnou hranu signálu na vstupu CLK. Napětí baterie hlídá komparátor IO3a, který má v invertujícím vstupu zapojen napěťový dělič složený z R21 a R23, který určuje hodnotu napětí rozhodnou pro další činnost nabíječe. Je-li napětí na neinvertujícím vstupu nyní větší než nastavené napětí na vstupu invertujícím, nachází se IO3b v kladné saturaci, tj. na jeho výstupu je kladné napětí, blízké napájecímu napětí, které se přes diodu D16 přenesse jako logická úroveň H na vstup D klopného obvodu.

Pokud se v tomto okamžiku vymění na výstupu časovače opět úrovně z L na H, přenesse se úroveň H ze vstupu D na výstup Q klopného obvodu a tím na vstup hradla OR, čímž je zaručena přítomnost blokovacího signálu xp po dobu následujících dvou minut. Průchod nabíjecího proudu akumulátoru je tak blokován. Může se však stát, že během této doby poklesne napětí na akumulátoru pod rozhodovací úroveň komparátoru IO3b, který se tak překloupí do záporné saturace. Připojením vstupů logických obvodů k zápornému napětí však zabráni dioda D16, která je nyní polarizována v závěrném směru a *pull-down* rezistor R25 nyní zabezpečí úroveň L na vstupu D klopného obvodu. Jelikož však, jak bylo uvedeno, reaguje klopný obvod pouze na vzestupnou hranu signálu na vstupu CLK, zůstává jeho výstup Q stále ve stavu H a tím stále trvá přítomnost signálu xp.

Situaci snad názorněji osvětlí obr. 20. Na vodorovné ose je nanášen čas a na svislé ose jsou průběhy výstupních úrovní důležitých prvků obvodu. Odspodu je nejprve taktovací signál z výstupu časovače 555, nad ním je výstup z komparátoru IO3b, snímaný na katodě diody D16, nad tímto průběhem se nachází obraz signálu výstupní svorky Q klopného obvodu D a konečně zcela nahoře je vynesena průběh signálu xp. Při analýze průběhů je patrné chování celého obvodu. Vidíme například, že během první periody došlo k nabití akumulátoru na napětí, které komparátor IO3a vyhodnotil jako dostačující a překloupil svůj výstup do stavu H. Klopný obvod na to však zareagoval až se změnou úrovně L na H výstupu časovače 555. Zablokovala se tak také přítomnost signálu přerušeni xp, který by jinak v tomto okamžiku zanikl. Takto však trvá po celou druhou periodu taktovacího signálu časovače 555 na obr. 20, ačkoliv během jejího trvání napětí

akumulátoru již pokleslo (IO3b se překlopil do stavu L). Na počátku třetí periody došlo ihned po spuštění nabíjecího proudu k nárůstu napětí na akumulátoru, načež zareagoval komparátor, ovšem výstup klopného obvodu je stále ve stavu $Q = L$. Chování generátoru signálu x_p také v dalších periodách odpovídá nastavené logice a jednotlivé průběhy zde není třeba podrobněji analyzovat.



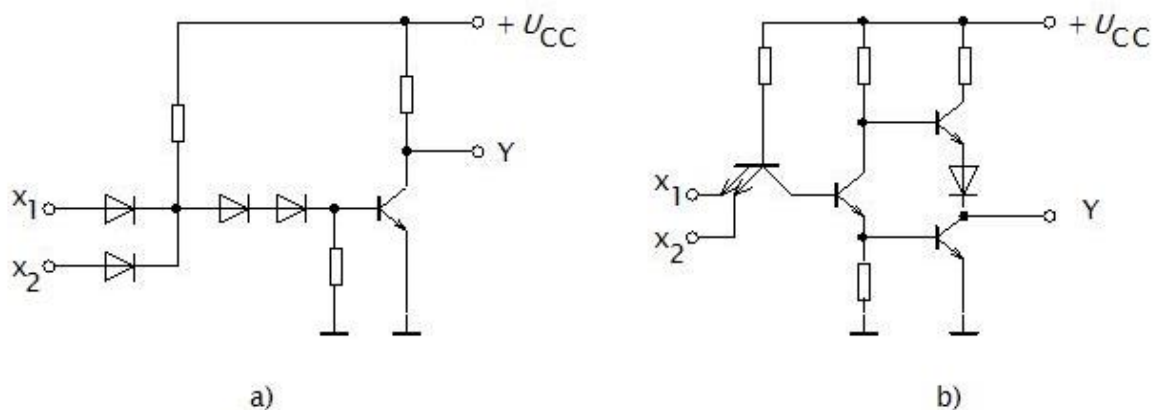
Obr. 20 Možné průběhy signálů na výstupech důležitých částí generátoru přerušení

Jednotlivé logické prvky budou realizovány z hradel DTL (tzv. diodově-tranzistorová logika), která má při této aplikaci oproti klasickým hradlům TTL (tzv. tranzistorově-tranzistorová logika) řadu předností. Především se jedná o možnost použití vyššího napájecího napětí. Výrobce hradel použitých v prototypu udává, že obvody lze napájet stejnosměrným napětím až 13,5 V, takže v porovnání s obvody TTL, které lze napájet napětím pouze 5 V (platí pro klasické bipolární provedení), odpadá nutnost dalšího zdroje stejnosměrného napětí 5 V. Dále tedy není třeba napětíového přizpůsobení vstupních a výstupních signálů probíhajících mezi generátorem přerušení a zbytkem dobjíječe.

Další významnou výhodou DTL obvodů je jejich vysoká odolnost proti rušení v porovnání s obvody TTL. Při konstrukci a ožiování tohoto generátoru se ukázalo, že zejména paměťový R-S klopný obvod sestavený z prvků TTL je velice náchylný k rušení. Postačilo například pouhé zapnutí stolní lampy v blízkosti zkušebního přípravku, aby obvod zareagoval změnou svého stavu. Tento problém se poměrně obtížně odstraňuje, nutné je správné konstrukční řešení, například vhodné stínění, použití velmi dobře filtrovaného a stabilizovaného napájecího napětí, neboť obvod reaguje také na poměrně malé výkyvy v napájení a je též nutná filtrace vstupních signálů. Všechna tato opatření by celou konstrukci značně zkomplikovala. Rozdíly v konstrukci mezi obvody DTL a TTL jsou patrné z obr. 21. Na něm jsou zachycena rozdílná provedení hradla NAND, jako jednoho ze základních prvků součástkové základny jednoduchých logických integrovaných obvodů.

Obě tato hradla splňují logickou funkci $Y = \overline{x_1 x_2}$. Pravdivostní tabulka je v tab. 2. Funkce je zřejmá a v obou případech identická. Dokud bude alespoň jeden ze vstupů x_1 a x_2 ukostřen, přiřadíme tomuto stavu logickou úroveň L, na výstupu Y se bude nacházet napětí blízké

napájecímu (úroveň H). V případě obvodu DTL to zajistí uzavřený tranzistor a v případě obvodu TTL otevřený horní a uzavřený dolní tranzistor. Pokud nyní odpojíme body x_1 a x_2 od nulového potenciálu (přiřadíme jim úroveň H), připojí se u DTL hradla báze tranzistoru přes rezistor a dvojici sériových diod k napájecímu napětí, čímž se tranzistor otevře a propojí výstup Y s kostrou (úrovni L). Podobně je tomu i u hradla TTL. Odpojením bodů x_1 a x_2 od nulového potenciálu se otevře tranzistor v prostřední větvi obvodu, čímž jednak sebere buzení hornímu tranzistoru v pravé větvi a současně otevře spodní tranzistor v téže větvi, čímž propojí výstupní svorku Y s nulovým potenciálem.



Obr. 21 Vnitřní zapojení hradla NAND a) DTL, b) TTL

Tab. 2 Pravdivostní tabulka hradla NAND

x_1	x_2	Y
L	L	H
L	H	H
H	L	H
H	H	L

V době konstrukce prototypu tohoto dobíječe byly k dostání integrované obvody DTL pouze MZH115S z produkce někdejšího n. p. Tesla Rožnov pod Radhoštěm. Jedná se o integrovaný obvod obsahující čtveřici dvouvstupových pozitivních hradel NAND s vysokou šumovou imunitou [19]. Jelikož platí zákony Booleovy algebry, lze jakoukoli logickou funkci sestavit ze základních typů operací (hradel), kterými jsou logický součin AND, logický součet OR a negace NOT [14], [15], [16], [17]. Jednotlivá hradla jakož i paměťový klopný obvod D lze tedy sestavit z hradel NAND, která jsou k dispozici.

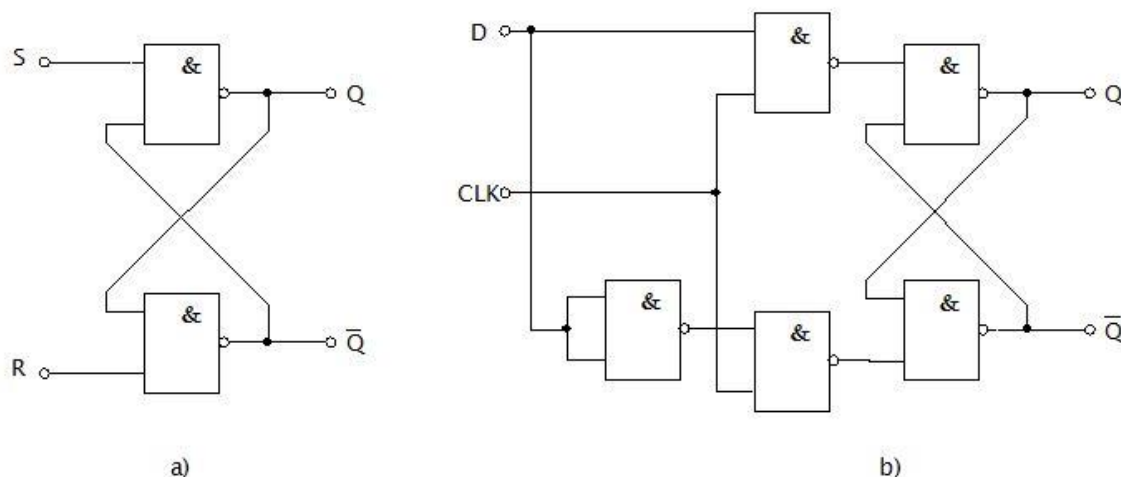
Pro konstrukci hradla OR vyjdeme z platnosti Booleovy algebry a DeMorganových zákonů. Pro logické hodnoty vstupů a a b platí, že $\overline{a+b} = \overline{a} \overline{b}$. Pak pro funkci OR dostáváme

$$a + b = \overline{\overline{a+b}} = \overline{\overline{a} \overline{b}} \quad (14)$$

Z výsledku vztahu (14) je zřejmé, že hradlo OR vznikne negováním vstupů hradla NAND.

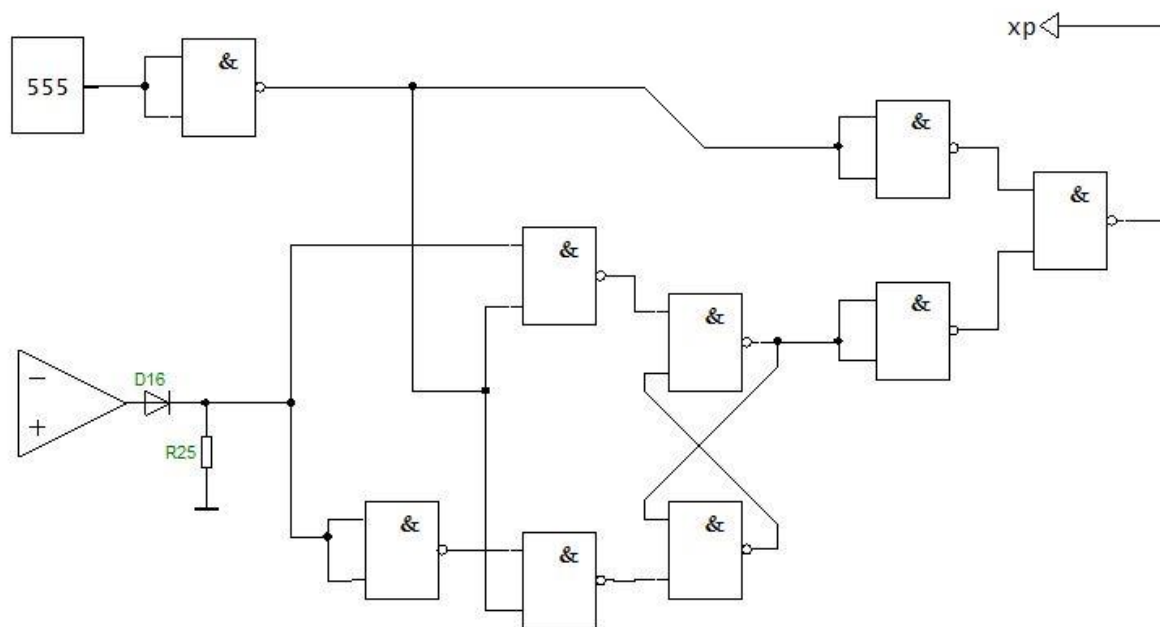
Poněkud složitější je situace u konstrukce klopného obvodu D Ten vychází z konstrukce tzv. R-S klopného obvodu její úpravou a doplněním. Z hradel NAND lze R-S klopný obvod sestavit jednoduše jejich zapojením dle obr. 22 a). Pokud oběma vstupům R-S klopného obvodu

předřadíme další hradla NAND, propojíme dva jejich vstupy a jednomu z nich zařadíme do druhého vstupu inverter podle obr. 22 b), vznikne klopný obvod D [16]. Spojené vstupy se vyvedou a označené jako CLK či jen C slouží pro přívod hodinového signálu. Vstup invertoru a druhý vstup druhého hradla NAND se po propojení označí jako D a slouží k připojení zdroje digitálního signálu, který má být přepsán na výstup Q.



Obr. 22 Realizace klopných obvodů z hradel NAND: a) R-S klopný obvod, b) klopný obvod typu D

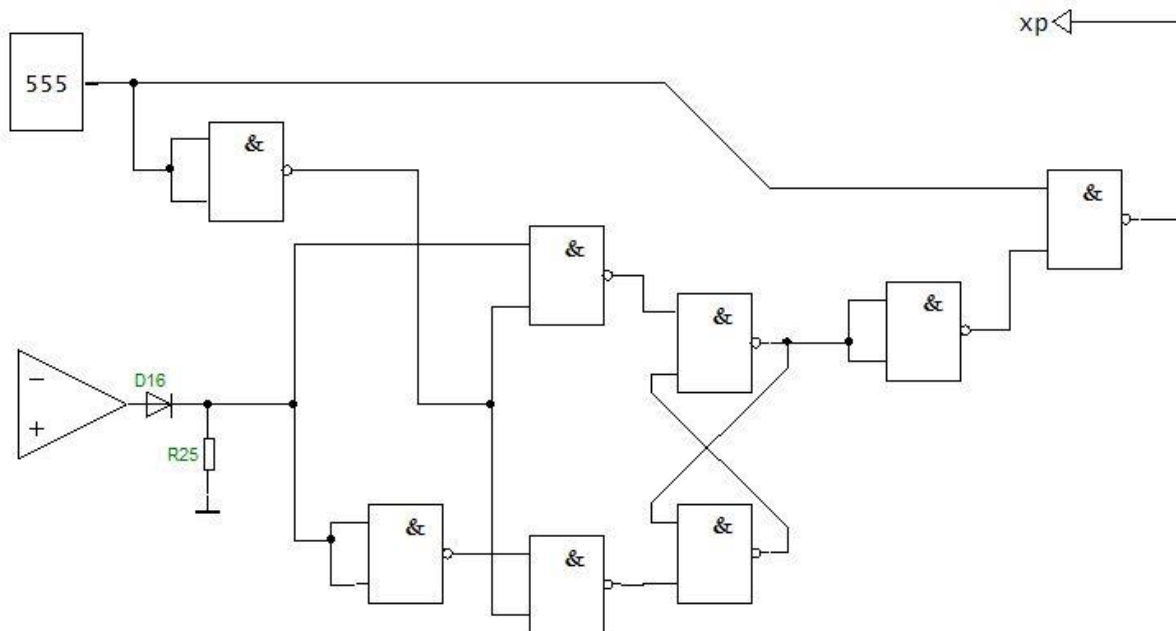
Z předchozích odstavců pak vyplývá technologické schéma generátoru přerušení (signálu xp), které je zobrazeno na obr. 23.



Obr. 23 Základní technologické schéma generátoru přerušení

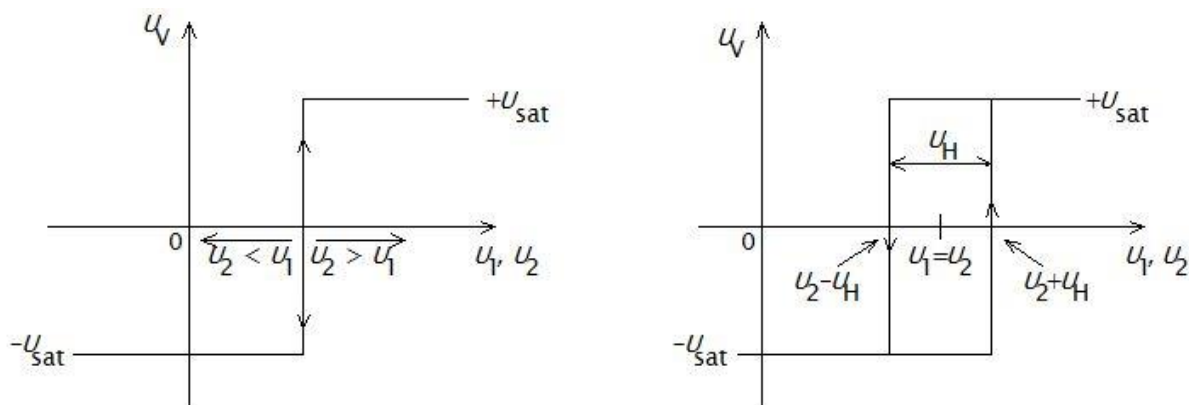
Ke konstrukci generátoru přerušení podle obr. 23 je potřeba celkem devíti hradel NAND, což znamená celkem tři integrovaných obvodů, přičemž v jednom bude zabráno jen jedno hradlo. Při pohledu na obr. 23 je zřejmé, že jedno hradlo lze vypustit, a sice inverter na vstupu posledního

hradla, neboť mezi časovačem 555 a tímto posledním hradlem je signál dvakrát negován. Podle Booleovy algebry je $\overline{\overline{a}} = a$. Vypuštěním jednoho hradla lze tedy celou logiku generátoru přerušeni zkonstruovat dvěma plně využitými integrovanými obvody. Upravené technologické schéma je na obr. 24.



Obr. 24 Upravené technologické schéma generátoru přerušeni

Ve společném pouzdře s komparátorem IO3a na schématu v příloze 1, který slouží ke generaci zapalovacích impulzů pro tyristory v silovém obvodu, je umístěn komparátor IO3b, který rozhoduje o další činnosti nabíječe po uplynutí doby stanovené pro přerušeni dle předchozího textu. Lze jej realizovat buď jako jednoduchý komparátor, tj. bez hystereze, nebo jako komparátor s hysterezí. Podrobněji se popisem činnosti komparátorů zabývá např. [11]. Pro účely této práce postačí zjednodušené vysvětlení. Na obr. 25 jsou průběhy výstupních napětí U_V závislosti na rozdílu vstupních napětí U_1 a U_2 přiváděných do vstupů ideálního komparátoru. U tohoto ideálního komparátoru dochází k přechodu ze záporné do kladné saturace a naopak v nekonečně krátkém čase. U skutečného komparátoru však probíhá tato změna s konečnou rychlostí a závisí mimo jiné na vlastnostech použitého operačního zesilovače, jakož i celého obvodu [10].



Obr. 25 Převodní charakteristiky komparátorů a) bez hystereze, b) s hysterezí

Z průběhů na obr. 25 a) je zřejmé, že v případě komparátoru bez hystereze dochází k překlápní úrovně výstupního napětí U_V vždy při stejné hodnotě napětí na obou vstupech. Jinými slovy přechod ze záporné saturace do kladné nastává při stejném napětí na vstupech jako přechod opačný. Zcela jiná je však situace na obr. 25 b). Předpokládejme, že napětí U_1 je stálé, v čase neměnné. Bude-li platit podmínka $U_2 < U_1$, nachází se výstup komparátoru v záporné saturaci $-U_{sat}$. Budeme-li nyní zvyšovat postupně napětí U_2 pouze do okamžiku, kdy bude platit rovnost $U_2 = U_1$, komparátor svůj výstup nezmění, neboť z výstupu je do neinvertujícího vstupu vedena pomocí rezistoru R3 (obr. 26) kladná zpětná vazba, podporující tento stabilní stav. Napětí na neinvertujícím vstupu musí překročit hodnotu

$$U_2 = U_1 + \frac{U_H}{2}, \quad (15)$$

kde U_H je tzv. hysterezní napětí, aby se výstup komparátoru překlátil do kladné saturace $+U_{sat}$. Podobně při následujícím plynulém poklesu napětí U_2 nedojde k překlacení výstupu zpět do záporné saturace $-U_{sat}$ při dosažení hodnoty $U_2 = U_1$, nýbrž v souladu s obr. 25 b) až při

$$U_2 = U_1 - \frac{U_H}{2}. \quad (16)$$

Pro hysterezní napětí U_H v souladu s [11] platí:

$$U_H = \beta \Delta U_V, \quad (17)$$

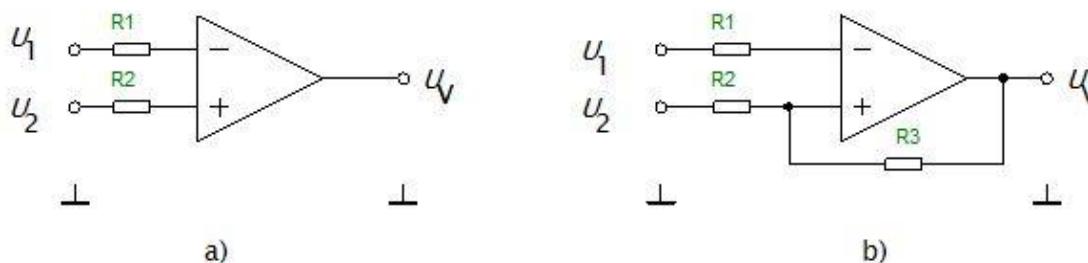
kde β je

$$\beta = \frac{R_2}{R_2 + R_3} \quad (18)$$

a ΔU_V je

$$\Delta U_V = U_{Vmax} - U_{Vmin} = U_{sat} - (-U_{sat}) = 2U_{sat}. \quad (19)$$

Rezistory R2 a R3 uvedené ve vztahu (18) vycházejí ze schématu na obr. 26 b).



Obr. 26 Komparátor a) bez hystereze, b) s hysterezí

Při vhodně nastavené hysterezi bude akumulátor udržován v nabitěm stavu a současně bude vystaven cyklickému procesu nabíjení a částečnému vybíjení, což prodlouží jeho životnost, zejména u vozidel s velmi dlouhou dobou odstavení. Týká se to například záložních vojenských

vozidel nebo některých speciálních vozidel Hasičského záchranného sboru, která jsou využívána pouze výjimečně, přitom však musí být udržována bezpodmínečně ve stavu zaručujícím jejich okamžité nasazení.

Dále lze dobíječ vybavit ochranou tepelnou. Lze ji realizovat například použitím tepelné pojistky tepelně svázané s určitými částmi obvodu, u kterých je třeba jejich oteplení hlídat – především chladiče výkonových polovodičových součástek a vinutí transformátorů. Elektricky je pak možné tyto pojistky vřadit sériově do hlavního (silového) obvodu na vhodná místa, nebo přímo do obvodu primárního vinutí transformátoru. Případně lze tyto způsoby kombinovat – například pojistku hlídající oteplení vinutí transformátoru zařadit do přívodu síťového napětí do primáru a další tepelnou pojistku (pojistky) určenou k ochraně polovodičových výkonových součástek zařadit sériově do jejich hlavních obvodů.

Poněkud sofistikovanější je tepelnou ochranu realizovat tak, že bude snímat teplotu určených prvků zařízení a její účinkování bude zahrnuto do regulační smyčky. V navrhovaném dobíječi se nabízí tímto způsobem chránit výkonové tyristory a k ochraně primárního vinutí transformátoru ponechat rozpínací tepelnou pojistku dle předchozího odstavce. Ke snímání teploty výkonových tyristorů lze použít například obyčejné diody, která bude v těsném tepelném kontaktu s chladičem tyristoru. Za tímto účelem se do chladiče vytvoří otvor o takovém průměru, aby v něm dioda přesně „seděla“, tedy aby byl vytvořen dobrý tepelný kontakt. Pro zlepšení přenosu tepla lze dále pouzdro diody před zasunutím do připraveného otvoru potřít teplovodivým silikonovým gelem.

Princip působení této ochrany spočívá ve využití závislosti prahového napětí polovodičové diody na teplotě PN přechodu. Jak známo, u klasických křemíkových diod, např. 1N4148 je koeficient teplotní závislosti $\alpha_v = -2 \text{ mV/K}$. Bude-li tedy při laboratorní teplotě $\vartheta_0 = 20^\circ\text{C}$ prahové napětí $U_D = 0,65 \text{ V}$, pak při zvýšené teplotě $\vartheta = 80^\circ\text{C}$ bude již prahové napětí $U_D = 0,53 \text{ V}$. Vhodným místem pro zařazení měřicí diody do regulační smyčky navrhovaného nabíječe je obvod zdroje řídicího napětí U_R . Zajistíme-li kladnou teplotní závislost řídicího napětí U_R , pak bude při rostoucí teplotě chladiče ϑ docházet ke zvětšování řídicího úhlu α tyristorového měniče. Jelikož ke spínání tyristorů dochází až ve druhé polovině periody, kdy napájecí napětí již klesá, bude se snižovat výstupní napětí měniče. Při připojené zátěži tak poteče silovým obvodem menší proud a na výkonových tyristorech budou menší tepelné ztráty.

Vzhledem ke skutečnosti, že se dobíječ skládá ze dvou polořízených usměrňovačů (měničů), je zřejmé, že bude použito celkem čtyř výkonových tyristorů (viz. obr. 11) KT 705. Tento typ tyristoru se vyráběl v dracounovém provedení v pouzdře Tr3 se šroubem M6 sloužícím k připevnění na chladič. Zároveň je na pouzdro součástky vyvedena anoda tyristoru. Je tedy zřejmé, že každý tyristor musí být umístěn na svém vlastním chladiči a chladiče musejí být od sebe navzájem, jakož i od chasis přístroje, galvanicky izolovány, nebo je nutné galvanicky izolovat tyristor od chladiče. Budeme-li předpokládat souměrné zatížení všech výkonových tyristorů, postačí pouze jedna měřicí dioda na jednom z chladičů. Vzhledem ke konkrétní konstrukci přístroje je pak vhodné umístění měřicí diody na ten chladič, u kterého je případně ztížen přestup tepla do okolí – například při jeho umístění mimo větrací otvory apod.

Pohledme nyní na zpět na obr. 17. Následující modelový příklad bude platit za určitých zjednodušujících podmínek: 1) všechny veličiny v obvodu nabývají jmenovitých hodnot, 2) odezva

otevření tyristoru v hlavním měniči na výstup komparátoru (GZI) je nekonečně rychlá, 3) nedochází k zásahu obvodu proudového omezení. Zvolme hodnotu napětí v bodě 1 proti společné kostře $U_{(1)} = 6 \text{ V}$ a dále předpokládejme, že na výstupu generátoru pilového signálu se bude hodnota napětí pohybovat v rozmezí 0 až 2 V. Tento interval odpovídá skutečnosti s ohledem na parametry součástek, jak bude probráno později. Je tedy jasné, že do druhého vstupu komparátoru musí přicházet řídicí napětí U_R z intervalu 1 až 2 V, má-li být řídicí úhel měniče $90^\circ < \alpha < 180^\circ$. Zapojíme-li měřicí diodu mezi bod 1 a rezistor R4, nebude na horním konci děliče R4-P2 napětí $U = 6 \text{ V}$, ale $U = 5,35 \text{ V}$ při teplotě $\vartheta_0 = 20^\circ\text{C}$. V souladu s výše uvedenými zjednodušujícími předpoklady, je amplituda napájecího napětí na sekundáru transformátoru přibližně 60 V. Pro výstupní napětí 27 V při nabíjení akumulátorů 24 V dosáhne napájecí napětí na sekundáru transformátoru hodnoty 27 V v čase $t = 8,51 \text{ ms}$ při periodě napájecího napětí $T = 10 \text{ ms}$. Toto tvrzení snadno doloží výpočet. Pro okamžitou hodnotu napětí v čase t u střídavého napětí platí známý vztah:

$$u(t) = U_{\max} \sin \omega t, \quad (20)$$

kde $u(t)$ je okamžitá hodnota střídavého napětí v čase t , U_{\max} jeho amplituda, ω úhlová frekvence střídavého napětí. Pro síťovou frekvenci $f = 50 \text{ Hz}$ platí přibližně $\omega = 314$. Ze vztahu (20) vyjádříme čas

$$t = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{u(t)}{U_{\max}} \quad (21)$$

a po dosazení zjistíme, že hodnoty 27 V dosáhne napájecí napětí ze sekundáru transformátoru v čase $t_a = 1,49 \text{ ms}$ a $t_b = 8,51 \text{ ms}$. Důležitý je čas t_b , neboť ten se nachází ve druhé polovině periody pulzujícího napájecího napětí. Řídicí úhel je tedy v tomto případě $\alpha = 153^\circ 15'$. Pilový referenční signál je analogický k lineární funkci, která prochází bodem 0 systému souřadného a v bodě x má hodnotu y . Pro okamžitou hodnotu napětí v referenčním pilovém signálu U_{ref} tedy platí pro t v ms rovnice

$$u_{\text{ref}}(t) = 0,2t. \quad (22)$$

Ze vztahu (22) pak snadno zjistíme, že v čase $t = 8,51 \text{ ms}$ bude $U_{\text{ref}} = 1,702 \text{ V}$. Toto napětí musí být nastaveno děličem R4-P2 na obr. 17, aby právě v tomto okamžiku došlo k vyslání zapalovacího impulzu na řídicí elektrodu tyristoru. Zvolíme-li hodnotu rezistoru R4 například $10 \text{ k}\Omega$, pak z obecně známé rovnice ze základů elektrotechniky pro napěťový dělič plyne, že potenciometr P2 musí být nastaven na hodnotu

$$P2 = R4 \frac{U_R}{U - U_R} = 10 \frac{1,702}{5,35 - 1,702} \text{ k}\Omega = 4,67 \text{ k}\Omega. \quad (23)$$

Stoupne-li nyní teplota měřeného chladiče na $\vartheta = 80^\circ\text{C}$, bude dělič R4-P2 napájen napětím 5,42 V. Hodnoty odporů v děliči se však nezměnily, a tak řídicí napětí U_R bude

$$U_R = U \frac{P2}{P2 + R4} = 5,42 \frac{4,67}{4,67 + 10} \text{ V} = 1,73 \text{ V}. \quad (24)$$

Z rovnice (22) pak zjistíme, že referenční pilový signál dosáhne hodnoty $U_R = 1,73 \text{ V}$ v čase $t = 8,65 \text{ ms}$. Řídicí úhel je nově $\alpha = 155^\circ 37'$. Tomu odpovídá hodnota výstupního napětí podle (20) $U_V = 24,77 \text{ V}$. Jak vidno, tento způsob omezení nabíjecího proudu v závislosti na teplotě výkonových tyristorů je velmi účinný.

7 Chlazení výkonových součástek

V dobíječi se nachází několik polovodičových součástek, kterým je třeba zajistit řádný odvod tepla. Jak bylo uvedeno na konci předchozí kapitoly, jedná se především o výkonové tyristory Ty1 až Ty4 ve schématu na obrázku v příloze 1, dále diody D1 až D4, výkonovému tranzistoru v zesilovači zapalovacích impulzů T5 a případně integrovaným obvodům 7812 a 7912 ve zdroji stabilizovaného napětí ± 12 V. Podle [12] lze výkonové ztráty ve spínací součástce rozdělit na ztráty v hlavním obvodu a ztráty v řídicím obvodu. Ztráty v řídicím obvodu lze dle tohoto pramenu zanedbat vzhledem ke ztrátám v hlavním obvodu. Ztráty v hlavním obvodu se skládají ze ztrát v zapnutém stavu, pro které platí

$$P_{\text{ON}} = U_{\text{T}} I_{\text{T}}, \quad (25)$$

kde P_{ON} je výkonová ztráta v sepnutém stavu, U_{T} je napětí na sepnuté součástce (např. saturační napětí U_{CESat} u tranzistoru) a I_{T} je proud hlavním obvodem (např. kolektorový proud I_{C} u tranzistoru), dále ztráty ve vypnutém stavu

$$P_{\text{OFF}} = U_{\text{B}} I_{\text{S}}, \quad (26)$$

kde P_{OFF} je výkonová ztráta ve vypnutém stavu, U_{B} je napětí, které spínač (součástka) blokuje – nezaměňovat s blokovacím napětím tyristoru, a I_{S} je svodový proud spínače ve vypnutém stavu, a konečně ztráty přechodné, které se skládají ze ztrát během spínání a ztrát během vypínání, pro které platí

$$P_{\text{P}} = f_{\text{s}} \left[\int_0^{t_{\text{zap}}} u(t) i(t) dt + \int_0^{t_{\text{vyp}}} u(t) i(t) dt \right], \quad (27)$$

kde P_{P} jsou přechodné ztráty, f_{s} spínací frekvence, t_{zap} doba zapnutí a t_{vyp} doba vypnutí spínače. Podle [12] se při běžných výpočtech a činné zátěži v tyristorovém spínači uvažují pouze ztráty v sepnutém stavu

$$P_{\text{T(AV)}} \approx U_{\text{T(AV)}} I_{\text{T(AV)}}, \quad (28)$$

kde $P_{\text{T(AV)}}$ ztráty v hlavním obvodu tyristorového spínače, $U_{\text{T(AV)}}$ napětí v propustném stavu tyristoru při průchodu proudu $I_{\text{T(AV)}}$ a $I_{\text{T(AV)}}$ střední hodnota proudu procházející hlavním obvodem tyristoru. Dále se uvažují tzv. přídavné ztráty, představující zejména přechodné ztráty, které se ovšem dle [12] uplatňují až při spínacích kmitočtech $f_{\text{s}} > 400$ Hz, a které lze tudíž v tomto případě zanedbat.

Pro výpočet ztrátového výkonu je tedy potřeba určit střední hodnotu proudu protékající tyristorem $I_{\text{T(AV)}}$. Je nutné si uvědomit, že každý tyristor v usměrňovacím můstku vede pouze část půlperrody napájecího střídavého napětí, přesně řečeno nejvýše čtvrtperiodu napájecího střídavého napětí. Přesto však bude na místě uvažovat při výpočtu o skutečnosti, že tyristory povedou po celou půlperiodu, neboť při nabíjení akumulátorů v síti 48 V změnou řídicích obvodů by bylo možné výjimečně připustit i řídicí úhly $0^\circ < \alpha < 90^\circ$. Pro střední hodnotu proudu platí vztah

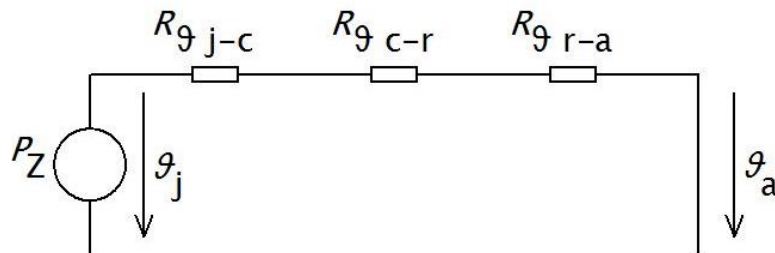
$$I_{\text{T(AV)}} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt, \quad (29)$$

kde T je perioda napájecího střídavého napětí. Pro obecnou frekvenci je po dosazení pak

$$I_{T(AV)} = \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^\pi i(t) dt + \int_\pi^{2\pi} 0 dt \right] = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_m \sin t dt = \frac{I_m}{\pi}. \quad (30)$$

Uvážíme-li amplitudu proudu $I_m = 10$ A, je střední hodnota proudu jednoho tyristoru v usměrňovacím můstku po dosazení do (30) $I_{T(AV)} = 3,18$ A. Při úbytku napětí na sepnutém tyristoru dle katalogu $U_{T(AV)} = 1,7$ V a po dosazení do (28) získáváme ztrátový výkon na jednom tyristoru přibližně $P_{T(AV)} \approx 5,5$ W.

V praxi se pro výpočty chladičů využívá tak zvaných elektrotepelných schémat, které jsou analogií k elektrickým schémátům. Jako zdroje zde vystupují ztrátové výkony chlazených součástek, rezistory představují tepelné odpory prvků obvodu, které kladou průchodu tepla určitý odpor a na kterých vzniká teplotní gradient. Jsou to například styk PN přechod-pouzdro součástky nebo pouzdro součástky-chladič apod. Tepelný odpor tak představuje rozdíl teplot vztažený na jednotku výkonu. Výrobce jej udává ve svém katalogu v jednotkách K/W nebo °C/W. K výkladu teorie počítání s tepelnými odpory poslouží obr. 27. Jedná se o příklad, kdy je součástka umístěna na chladiči. P_Z je ztrátový výkon, $R_{\vartheta_{j-c}}$ je tepelný odpor styku PN přechod-pouzdro součástky, $R_{\vartheta_{c-r}}$ tepelný odpor styku pouzdro součástky-chladič, $R_{\vartheta_{r-a}}$ tepelný odpor přechodu chladič-okolí, ϑ_j je maximální dovolená teplota PN přechodu součástky, kterou výrobce udává ve svém katalogu a konečně ϑ_a je teplota okolí.



Obr. 27 Příklad tzv. elektrotepelného schématu

Z obr. 27 pak lze sestavit rovnici

$$\vartheta_j - \vartheta_a = P_Z R_{\vartheta_{j-a}}, \quad (31)$$

kde $R_{\vartheta_{j-a}}$ je tepelný odpor celé soustavy PN přechod-okolí a je-li použito přídavného chladiče, platí pro něj vztah

$$R_{\vartheta_{j-a}} = R_{\vartheta_{j-c}} + R_{\vartheta_{c-r}} + R_{\vartheta_{r-a}}. \quad (32)$$

Úkolem je zjistit tepelný odpor chladiče $R_{\vartheta_{r-a}}$, takže dosazením (32) do (31) a úpravou získáváme

$$R_{\vartheta_{r-a}} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_a}{P_Z} - R_{\vartheta_{j-c}} - R_{\vartheta_{c-r}}. \quad (33)$$

Pro úplnost nutno dodat, že však tyto rovnice podle [12] platí pouze v ustáleném teplotním stavu, tj. kdy časová konstanta přechodného tepelného děje je dostatečně dlouhá a teploty soustavy se ustálí na určitých hodnotách. Při impulzním spínání součástek však není tato skutečnost splněna,

neboť vlivem tepelných kapacit jednotlivých prvků chladicí soustavy se nemůže teplota ustálit na konečné hodnotě ihned po připojení, resp. odpojení ztrátového výkonu. Zavádí se proto časově závislá tzv. *přechodná tepelná impedance*, která v sobě zahrnuje jak tepelné odpory, tak tepelné kapacity, a kterou výrobce výkonových součástek udávají ve svém katalogu graficky. Platí pro ni vztah

$$Z_{g(t)} = \frac{g_{j(t)} - g_a}{P_Z} \quad (34)$$

kde $g_{j(t)}$ je teplota přechodu a g_a je teplota okolí. Trvá-li působení ztrátového výkonu dostatečně dlouho, je pak číselně rovna velikosti tepelného odporu.

V katalogu součástek Tesla [19] výrobce přechodnou tepelnou impedanci neudává. Vydeme proto z ustáleného tepelného stavu. U tyristoru KT 705 je v [19] uvedena největší přípustná teplota přechodu $g_j = 125^\circ\text{C}$ a tepelný odpor styku přechod-pouzdro $R_{g_{j-c}} = 1,5^\circ\text{C/W}$. Zvolíme-li okolní teplotu $g_a = 60^\circ\text{C}$ (zařízení má být uzavřeno ve skříňce s omezeným přestupem tepla do okolního prostředí) a odhadneme-li tepelný odpor přechodu součástka-chladič na $0,2^\circ\text{C/W}$ (při výpočtu však nutno uvažovat tuto hodnotu dvakrát – mezi součástkou a přípojnici anody a mezi přípojnici – viz. dále – a chladičem; přípojnici jako částečný chladič neuvažujeme), což je při potření styčných ploch teplovodivým gelem dle [13] reálná hodnota, lze dosazením všech známých údajů do (33) určit minimální tepelný odpor chladiče

$$R_{g_{r-a}} = \frac{125 - 60}{5,5} - 1,5 - 0,4^\circ\text{C/W} = 9^\circ\text{C/W} \quad (35)$$

Podobně je tomu u dalších součástek. V usměrňovacích můstcích jsou dále diody D1 až D4 – viz. obrázek v příloze 1, pro jejichž proudy platí stejné předpoklady a vztahy jako pro tyristory Ty1 až Ty4, vysvětlené v předchozím textu. Diody jsou typu KY 719, rovněž z produkce bývalé Tesly Rožnov p. R. n. p. a v [19] jsou pro ně uvedeny hodnoty maximální teploty přechodu $g_j = 155^\circ\text{C}$ a hodnota tepelného odporu $R_{g_{j-c}} = 1,5^\circ\text{C/W}$. Výkonová ztráta na těchto diodách bude vzhledem k $U_{T(AV)} = 1,1\text{ V}$ podle (28) $P_{T(AV)} = 3,5\text{ W}$. Po dosazení známých údajů do (33) získáváme minimální tepelný odpor chladiče $R_{g_{r-a}} = 25^\circ\text{C/W}$. Tyto diody se vyráběly v pouzdrech typu D31, rovněž ve svorníkovém provedení se šroubem M5 sloužícím k připevnění na chladič. Jelikož je na pouzdro součástky vyvedena anoda a při pohledu na silové schéma např. na obr. 11 je patrné, že anody všech diod D1 až D4 jsou na stejném potenciálu, lze je všechny umístit na jeden společný chladič. Ten však bude muset mít čtyřikrát menší tepelný odpor, tedy $R_{g_{r-a}} = 6^\circ\text{C/W}$.

Tranzistor T5 (obrázek v příloze 1) v zesilovači zapalovacích impulzů pro tyristory je typu BC337. Je vyráběn v pouzdře TO-92 s maximálním dovoleným kolektorovým proudem $I_C = 500\text{ mA}$. Ztrátový výkon při průchodu tohoto proudu ve spínacím režimu by mělo být jeho pouzdro schopno vyzářit bez dalších opatření. Pro tyristory KT 705 výrobce zaručuje jejich zapnutí již při proudu řídicí elektrody $I_{GT} = 40\text{ mA}$. S ohledem na určitou rezervu bude zvolen proud $I_{GT} = 100\text{ mA}$ a vzhledem ke skutečnosti, že současně bude procházet zapínací proud vždy jen do dvou tyristorů, neboť přechody G-K u ostatních tyristorů v můstku spolu s ochrannými diodami v obvodech řídicích elektrod jsou pólovány v závěrném směru, bude kolektorový proud tranzistoru

během jedné periody napájecího pulzujícího napětí roven $I_C = 200$ mA. Chlazení tranzistoru T5 tedy netřeba přikládat zvláštní pozornost.

Ve zdroji stabilizovaného napětí ± 12 V jsou dva integrované třisvorkové stabilizátory, obsahující v pouzdře všechny důležité prvky pro správnou činnost obvodu. Jsou to především teplotně kompenzované zdroje referenčních napětí a tepelné a nadproudové ochrany. Jedná se o integrovaný obvod 7812 v kladné větvi a 7912 v záporné větvi. S větším výstupním proudem pracuje obvod 7812 v kladné větvi, neboť kromě napájení ostatních integrovaných obvodů zajišťuje napájení také všech tří relé, která se v doběječi vyskytují. Lze zvolit mezi integrovaným obvodem 78L12 vyráběným v pouzdře TO-92 s dovoleným výstupním proudem 150 mA nebo v pouzdře TO-220 s dovoleným výstupním proudem 1 A, příp. 2 A. Uvážíme-li odběr každého relé přibližně 20 až 30 mA a maximální provozní teplotu obvodu 78L12 $\vartheta_{\max} = 75^\circ\text{C}$, bylo by použití obvodu 78L12 hraniční a v krajním případě by mohlo dojít k jeho nespolehlivé funkci. Po sečtení všech proudů, které odebírají jednotlivé součásti řídicího obvodu, jež jsou napájeny stabilizovaným napětím $+12$ V, dostáváme trvalý proud obvodem 7812 asi 120 mA. Při napájecím napětí $U_n = 15$ V dostáváme výkonovou ztrátu $P_Z \approx 0,4$ W. Maximální teplota čipu v součástce dle [23] je $\vartheta_j = 125^\circ\text{C}$ a tepelný odpor $R_{\vartheta_{j-c}}$ pouzdra TO-220 činí $R_{\vartheta_{j-c}} = 3,13^\circ\text{C/W}$. Dosazením do (33) získáváme minimální odpor chladiče $R_{\vartheta_{j-a}} = 159^\circ\text{C/W}$. Při takto vysoké hodnotě se nabízí otázka, je-li chladič vůbec potřeba. Výrobce ve svém katalogu nebo v [23] také udává hodnotu tepelného odporu v případě, že chladič není použit. Značí se $R_{\vartheta_{j-a}}$ a pro pouzdro TO-220 má hodnotu $R_{\vartheta_{j-a}} = 60^\circ\text{C/W}$. Upravíme tedy přímo rovnici (31):

$$\frac{\vartheta_j - \vartheta_a}{P_Z} = R_{\vartheta_{j-a}}, \quad (36)$$

přičemž porovnáme vypočtenou hodnotu s údajem v katalogu. Je-li vypočtená hodnota větší než katalogová, je pouzdro součástky schopno ztrátový výkon odvést do okolí bez použití přídavného chladiče. Po dosazení známých hodnot pak dostáváme

$$R_{\vartheta_{j-a}} = \frac{125 - 60}{0,4} \text{ }^\circ\text{C/W} = 162 \text{ }^\circ\text{C/W}. \quad (37)$$

Je zřejmé, že u integrovaného obvodu 7812 není třeba použití přídavného chladiče. Pro doplnění lze určit také ztrátový výkon, kterým lze součástku maximálně zatížit při dané teplotě okolí ϑ_a bez nutnosti použití přídavného chladiče, a to vyjádřením P_Z ze vztahu (36) a dosazením katalogové hodnoty $R_{\vartheta_{j-a}}$:

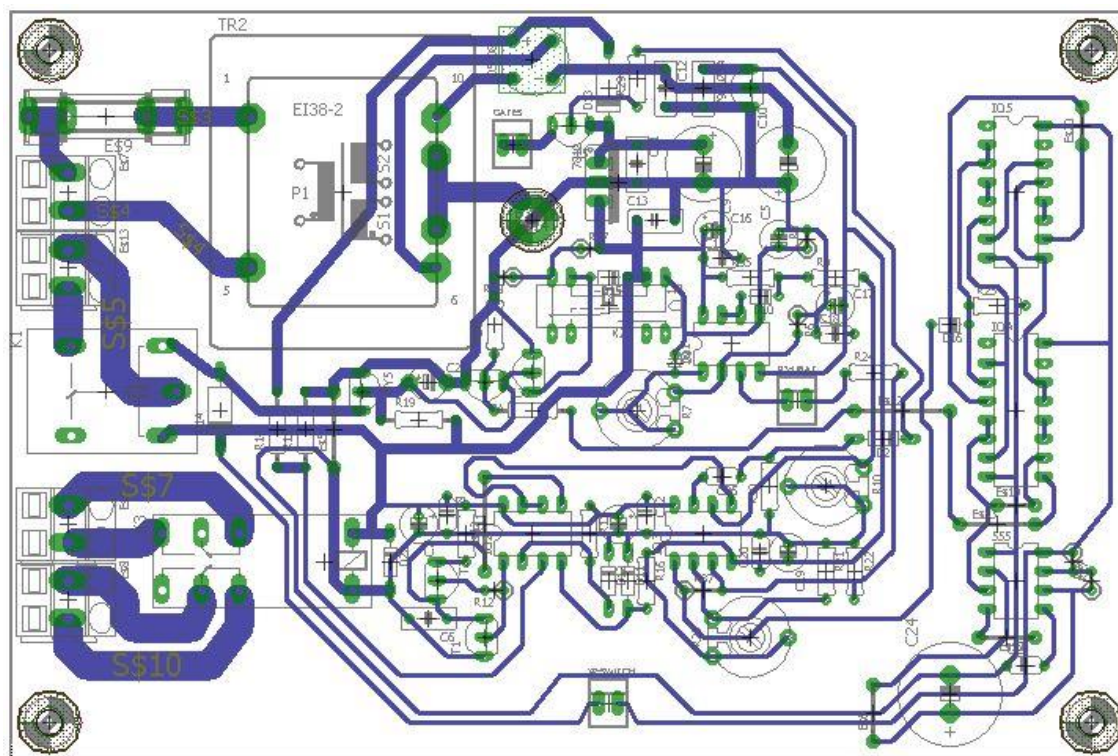
$$P_Z = \frac{\vartheta_j - \vartheta_a}{R_{\vartheta_{j-a}}} = \frac{125 - 60}{60} = 1 \text{ W}. \quad (38)$$

Konečně integrovaný obvod 7912 stabilizující napětí v záporné větvi pokrývá pouze spotřebu operačních zesilovačů. Proud, který jím prochází je velmi malý, v řádu maximálně jednotek miliampér, a tedy také ztrátový výkon bude velmi malý. Použije-li se obvod 79L12, jeho pouzdro TO-92 jej zvládne bez potíží odvést do okolí a chlazení tohoto obvodu 79L12 tedy není třeba věnovat více pozornosti.

8 Konstrukce a měření

Celé zařízení bude umístěno v plechové skřínce, umožňující spolehlivou a bezpečnou montáž ve vozidle. Elektrické propojení s obvody automobilu zajišťují průmyslové konektory. Uvnitř skříňky se nachází hlavní toroidní transformátor Tr1 (viz. schéma v příloze 1), moduly chladičů s výkonovými polovodičovými součástkami a deska plošných spojů (DPS) s řídicími a ochrannými obvody. Na kryt skříňky může být vyveden přepínač pro volbu napětí palubní sítě a dále vypínač přerušovače nabíjení. Dále jsou zde umístěna pojistková pouzdra s některými pojistkami. Při požadavku na vodotěsné provedení dobíječe např. při použití v armádních speciálních vozidlech, je vše umístěno uvnitř přístroje, skříňka je pak vyrobena z masivních hliníkových odlitků, vyráběných na zakázku, zajišťující kvalitní odvod tepla z chladičů výkonových součástek. Spojení s elektroinstalací vozidla je pak provedeno speciálními konektory vodotěsného provedení.

Základem dobíječe je DPS obsahující dle předchozího odstavce řídicí a ochranné obvody, kromě několika prvků, o nichž bude zmínka v dalším textu. Její návrh byl proveden v programu Eagle a je na obr. 28. Deska je jednovrstvého provedení a je osazena součástkami dle rozpisu v příloze 3. Nachází se na ní rovněž síťový transformátor Tr2 sloužící pro napájení všech obvodů kromě silového.



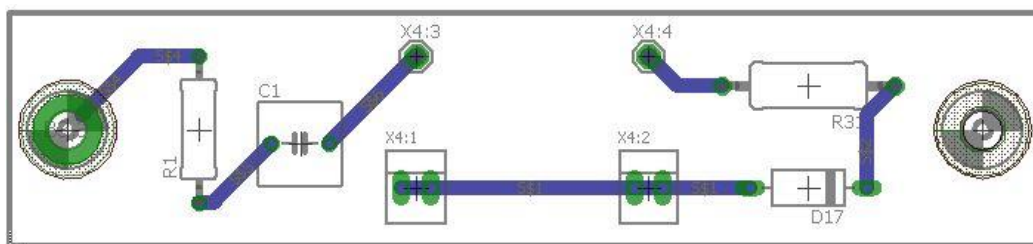
Obr. 28 Deska plošných spojů

Pro její upevnění k chassis přístroje slouží čtveřice otvorů, umístěných v rozích DPS. Vzhledem ke hmotnosti transformátoru TR2, který postrádá upevňovací otvory a je k DPS připevněn pouze připájenými vývody, je nutné pro uchycení DPS k chassis přístroje použít silentbloků, případně gumových podložek, aby se předešlo vytržení transformátoru Tr2 z DPS vlivem vibrací, přenášejících se z chassis vozidla.

Elektrická energie je do přístroje přivedena konektorem X1 (viz. schéma v příloze 1). Z něj je ihned vyveden ochranný vodič na chassis přístroje. Zbylé vodiče vedou do rozvodné svorkovnice nízkého napětí, odkud je vedení rozvětveno k jednotlivým pojistkovým pouzdrům a transformátorům. Dále se zde nachází nárazový rezistor R20 ze schématu v příloze 1 a v případě vodotěsného provedení přístroje jsou zde rovněž umístěny pojistky F2, F3 a F4, které se jinak nacházejí v přístrojové skřínce.

Vzhledem ke konkrétnímu konstrukčnímu řešení celého měniče bylo zvoleno řešení s izolovaným tyristorem. Ten se tedy na chladič připevní tak, aby byl od chladiče galvanicky izolován, s použitím kvalitních teplovodivých izolačních prvků. Jelikož je vzhledem ke konstrukci nutné přivést napětí k anodě tyristoru shora, tedy při pohledu na součástku na chladiči, nikoliv odspodu, tj. při pohledu na její upevňovací šroub, je nutné mezi tyristor a chladič umístit speciální anodovou přípojnicí, o které byla zmínka v kapitole o chlazení. Ta je provedena kusem hliníkového profilu tvaru L. Na jednu hranu dosedá tyristor, druhá je rovnoběžná s osou tyristoru a je opatřena otvorem k upevnění přívodního vodiče. Mezi tuto přípojnicí a chladič se umístí kvalitní silikonová podložka. Všechny styčné plochy se potřou teplovodivým gelem. Dále do otvoru v chladiči, kterým prochází šroub tyristoru, je umístěna silikonová izolační bužírka, odolávající teplotám až 200 °C a konečně pod upevňovací maticí M6 tyristoru se umístí rovněž izolační podložka. Takto je tyristor galvanicky izolován od chladiče, přičemž po provedení konstrukce je nutné izolační stav přezkoušet.

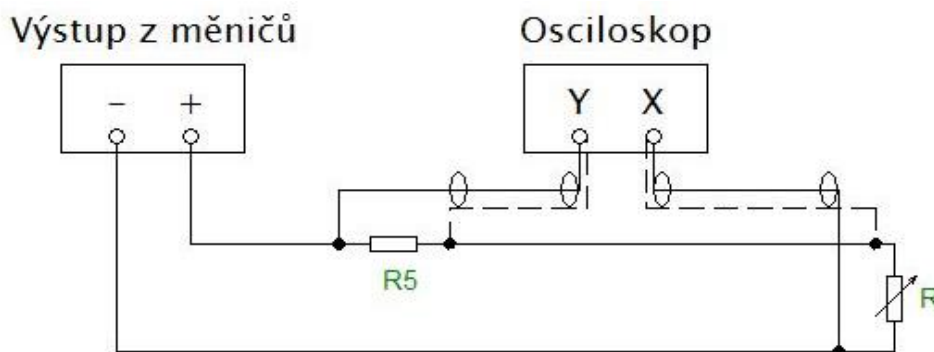
Na chladičích výkonových tyristorů se krom nich nacházejí malé, tzv. modulové DPS (viz. obr. 29), na kterých se nacházejí ochranné a odrušovací RC členy R1-C1 až R4-C4, které jsou připojeny v souladu se schématem v příloze 1 paralelně ke každému z tyristorů, dále jsou zde umístěny součástky obvodů řídicích elektrod, tj. ochranné diody D17 až D20 a rezistory R31 až R34, takže takto osazený chladič tvoří kompaktní modul s výkonovým tyristorem, ochrannými, odrušovacími a budicími prvky. K připojení modulu na výstup zesilovače zapalovacích pulzů (emitoru tranzistoru T5), umístěného na základní DPS a dále k propojení modulů mezi sebou se na modulových DPS nacházejí dva konektory, do kterých se připojí propojovací vedení.



Obr. 29 Modulová DPS prvního modulu (tyristoru Ty1)

Celá silová část vyjma transformátoru Tr1 a pojistek F2, F3 a F4 byla včetně všech chladičů sestavena do kompaktního zařízení – měniče, kterou je pak možné snadno zabudovat do přístrojové skříňky. Tu však vzhledem k současnému nouzovému stavu v České republice možné do uzávěrky této práce opatřit ani vyrobit, bylo celé zařízení sestaveno a odzkoušeno pouze tak říkajíc na pracovním stole. I tak ovšem měření prokázalo správnou jeho funkci a spolehlivost provozu. Fotodokumentace jednotlivých komponentů, jakož i celého zařízení během měření se nachází v příloze 4.

Na obr. 30 je schéma zapojení při měření zkonstruovaného dobíječe. Jako měřicí přístroj byl použit dvoukanalový osciloskop Owon SDS6062E. Měřicí sonda prvního kanálu, ve schématu na obr. 30 označená jako X, byla použita k zobrazení a měření výstupního napětí, přičemž vzhledem ke galvanickému propojení stínění měřicích sond obou kanálů a zapojením dle obr. 30 byl signál invertován. K měření proudu bylo použito snímacího bočnicku R5, který slouží v dobíječi ke snímání pracovního proudu a je rovněž zapojen v souladu se schématem v příloze 1, a úbytek napětí na tomto rezistoru byl přiveden do druhého kanálu osciloskopu, na obr. 30 označen Y.



Obr. 30 Schéma zapojení při měření dobíječe

Místo akumulátoru byla na výstup jako zátěž připojena dvojice laboratorních proměnných rezistorů typu PR 40 P8, $18 \Omega/4 \text{ A}$, výrobce MEZ Krompachy, v paralelním spojení, ve schématu na obr. 30 souhrnně označená proměnným rezistorem R. Odpor bočnicku R5 činí $13,5 \text{ m}\Omega$, takže při průchodu proudu 20 A se na něm vytvoří úbytek 270 mV .

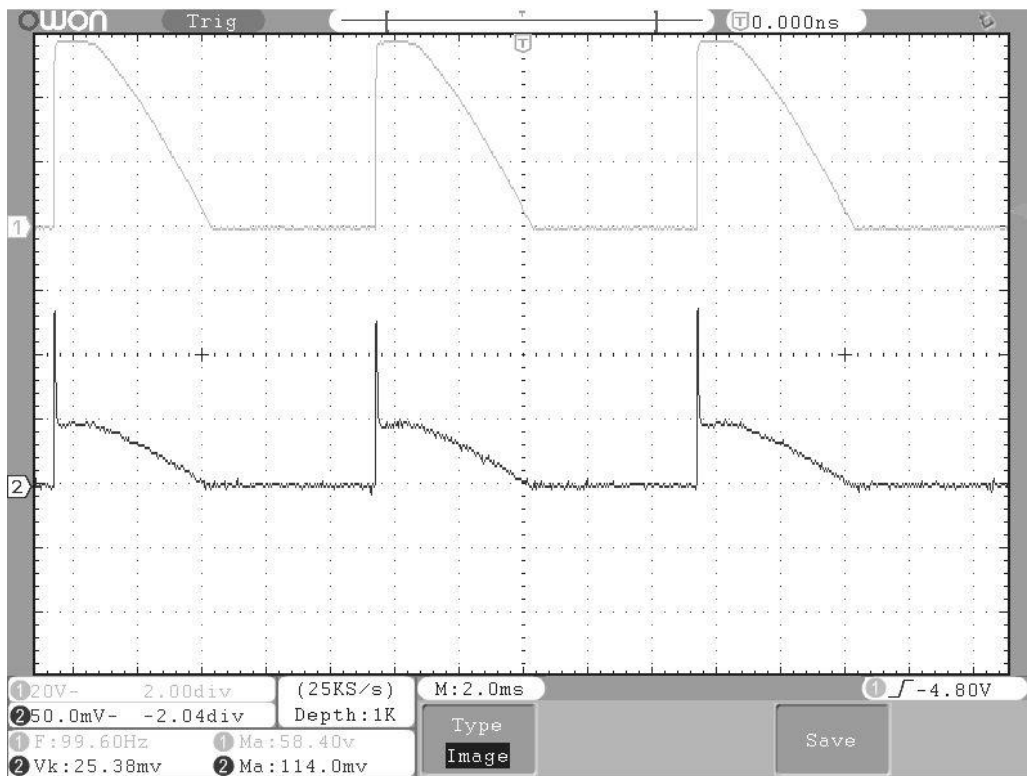
Nejprve bylo při maximálním odporu zatěžovacích rezistorů odzkoušeno nastavování výstupních napětí. obr. 31 zachycuje nastavené výstupní napětí $58,4 \text{ V}$.

Výstupní napětí bylo následně nastaveno pro použití ve 24 V palubní síti, tedy v rozmezí 27 až 28 V , pro nabíjení akumulátoru a proudové omezení s ohledem na proudové zatížení proměnných rezistorů asi na 10 A . Proměnné rezistory byly nejprve nastaveny na maximální odpor, zátěží tedy protékal proud asi 3 A . Situaci dokládá obr. 32.

Z něj je patrná maximální hodnota výstupního napětí $27,6 \text{ V}$, na snímacím bočnicku asi 40 mV , přičemž špičkově při zapnutí tyristoru dosahuje hodnot vyšších, u prostředního impulsu až 84 mV . Úbytek napětí 40 mV odpovídá očekávanému proudu 3 A .

V dalším kroku byla při stejně nastaveném výstupním napětí snižována hodnota odporu zatěžovacích rezistorů. Při dosažení hodnoty úbytku napětí na bočnicku R5 asi 150 mV , tj. proudu asi 11 A , docházelo s dalším snižováním odporu proměnných zatěžovacích rezistorů rovněž k postupnému snižování výstupního napětí. obr. 33 zachycuje výstupní napětí $14,4 \text{ V}$ při proudu asi 11 A . S dalším snižováním hodnoty odporu zatěžovacích rezistorů sice proud nepatrně stoupá, ale stále dochází k poklesu výstupního napětí, až při zkratovaných výstupních svorkách proud téměř neprochází. Objevují se pouze velmi krátké proudové impulzy, opakující se s periodou zhruba 1 s tak, jak se vybíjí kondenzátor C5 (viz. příloha 1), a vykazující hodnotu kolem 15 A . Tento jev však není na závadu, případně jej lze poněkud zmírnit prodloužením časové konstanty RC členu R8-C5.

Je patrné, že proudové omezení dobíjecího proudu pracuje účinně. Jeho hodnota byla následně nastavena na 20 A pro použití v automobilu.



Obr. 31 K odzkoušení nastavení výstupního napětí. Nahoře: průběh napětí na zátěži, 20 V/d; dole: průběh proudu zátěži, 3,7 A/d.



Obr. 32 Průběh napětí a proudu na výstupu dobijče v oblasti dovolených proudů. Nahoře: průběh napětí na zátěži, 10 V/d; dole: průběh proudu zátěži, 3,7 A/d.



Obr. 33 Průběhy napětí a proudu dobíječe při zásahu proudového omezení. Nahoře: průběh napětí na zátěži, 10 V/d; dole: průběh proudu zátěží, 3,7 A/d.

9 Závěr

V předchozích kapitolách byly probrány jednotlivé principy v praxi používaných nabíječů startovacích či záskokových akumulátorů, jakož i akumulátorů samých. Byly vytyčeny základní požadavky na nabíječ nutné nejen pro splnění zadání této práce, ale také pro jeho praktické použití v automobilu nebo v železničním vozidle. V souladu s nimi byla zvolena základní koncepce díla, navržena silová a řídicí část včetně podrobnějšího vysvětlení činnosti jednotlivých konstrukčních prvků, byly navrženy desky plošných spojů a dále celé konstrukční řešení, včetně chlazení součástí, na kterých vzniká ztrátové teplo.

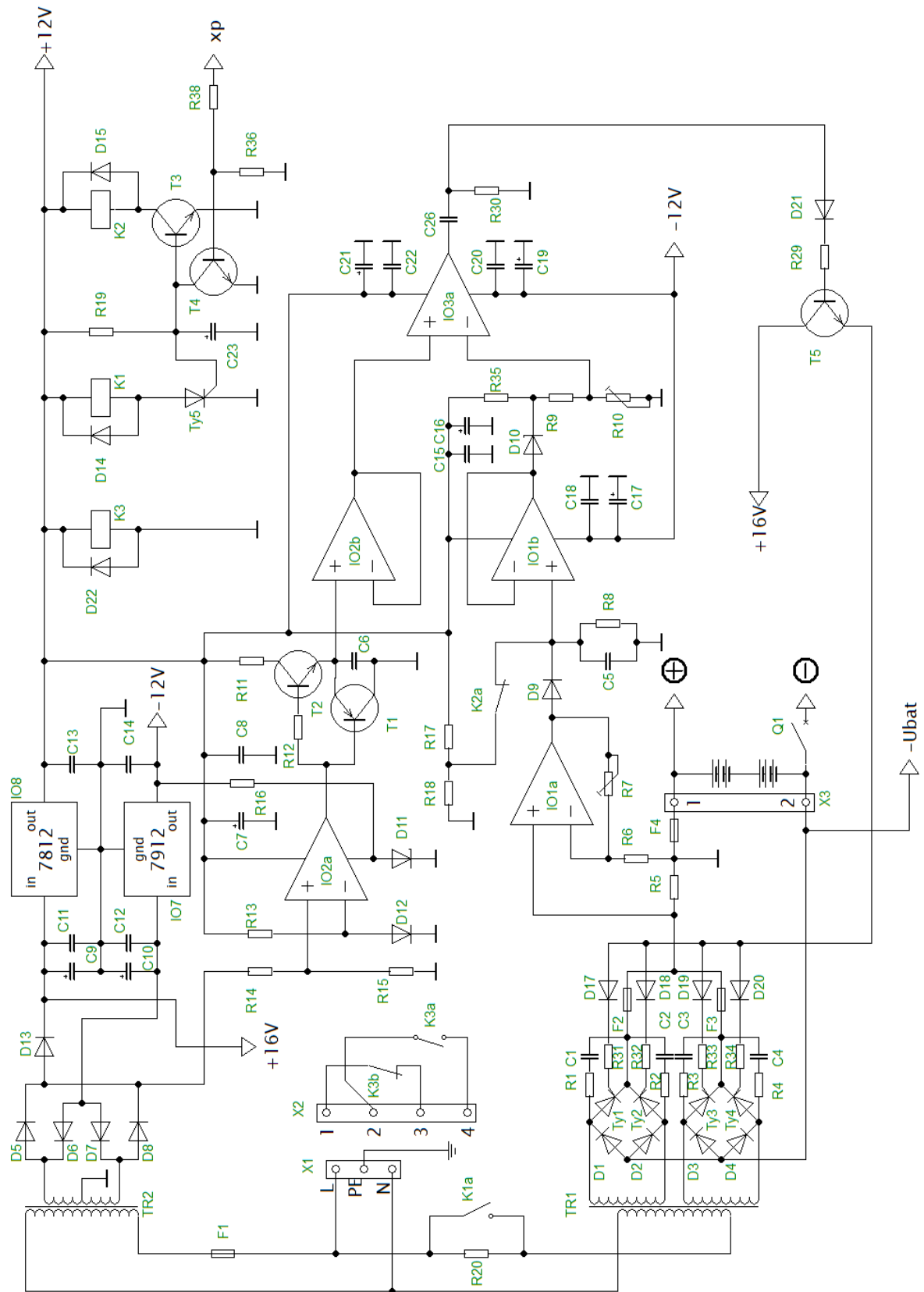
Zařízení bylo zkonstruováno zcela podle předkládaného návrhu a následně odzkoušeno a proměřeno. Jak bylo uvedeno v příslušné kapitole, nebylo možné vzhledem k současné situaci zařízení opatřit přístrojovou skříňkou a vestavět jej do vozidla. Měření tak bylo provedeno pouze v laboratoři, s připojeným proměnným výkonovým rezistorem jako zátěží místo akumulátoru, což ovšem nemělo vliv na ověření funkčnosti ani na relevanci výsledků provedených měření.

Na základě výsledků z měření lze konstatovat, že dobíječ zcela splňuje požadavky v úvodních kapitolách vytyčené a doplněn příslušnými ochranami je schopen zajistit bezpečný a spolehlivý provoz za jakýchkoli podmínek. Navzdory poměrně jednoduché konstrukci umožňuje nastavení takřka libovolného výstupního napětí, což jej činí vhodným k použití téměř ve všech vozidlech používaných v civilní dopravě, v armádě či ve vozidlech integrovaného záchranného systému. Jeho schopnost dodat v plně automatickém provozu výkon dostatečný k obnovení startovací schopnosti akumulátoru u vozidla, u kterého došlo k jeho vybití, během relativně krátké doby, případně zásobovat energií řídicí a vytápěcí systémy během temperování vozidla, jej neomezuje k použití toliko jako konzervačního dobíječe u dlouhodobě odstavených vozidel.

10 Použitá literatura

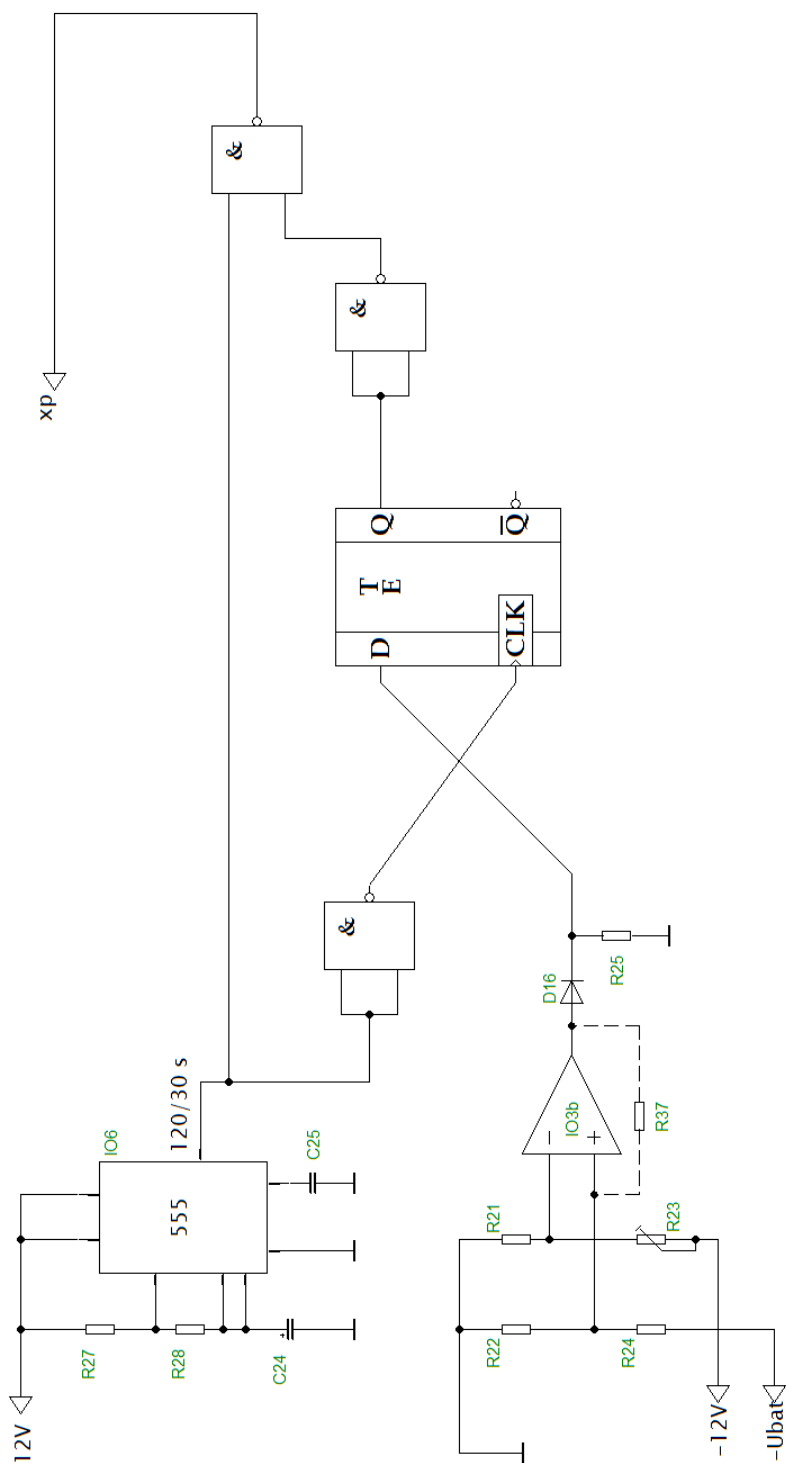
- [1] M. Arendáš, M. Ručka: *Nabíječe a nabíjení*. SNTL, Praha, 1978.
- [2] M. Arendáš, M. Ručka: *Nabíječky a nabíjení*. BEN - technická literatura, Praha, 2002.
- [3] J. Šťastný, B. Remek: *Autoelektrika a autoelektronika*. T. Malina - nakladatelství, Praha, 2003.
- [4] A. Krejčířík: *Napájecí zdroje I*. BEN – technická literatura, Praha, 2000.
- [5] A. Krejčířík: *Napájecí zdroje II*. BEN – technická literatura, Praha, 2000.
- [6] M. Cenek: *Akumulátory od principu k praxi*. FCC Public, Praha, 2003.
- [7] M. Cenek: *Akumulátory a baterie*. Strom, Praha, 1996.
- [8] M. Surovátka: *Navrhování napájecích zdrojů pro elektroniku*. SNTL, Praha, 1977.
- [9] M. Husák: *Návrh napájecích zdrojů pro elektroniku*. Skriptum ČVUT, Česká technika - nakladatelství ČVUT, Praha, 2006.
- [10] J. Dostál: *Operační zesilovače*. BEN – technická literatura, Praha, 2005.
- [11] J. Punčochář: *Operační zesilovače v elektronice*. BEN – technická literatura, Praha, 2005.
- [12] J. Heřman: *Bezkontaktní spínání*. SNTL, Praha, 1983.
- [13] J. Stach: *Výkonové tranzistory v nízkofrekvenčních obvodech*. SNTL, Praha, 1979.
- [14] Z. Sobotka: *Kurs číslicové techniky*. SNTL, Praha, 1974.
- [15] Kolektiv autorů: *Od logických obvodů k mikroprocesorům I*. SNTL, Praha, 1982.
- [16] V. Malina: *Digitální technika*. Kopp nakladatelství, České Budějovice, 2002.
- [17] M. Antošová, V. Davídek: *Číslicová technika*. Kopp nakladatelství, Č. Budějovice, 2002.
- [18] J. Vobecký, V. Záhlava: *Elektronika*. Grada Publishing, a. s., Praha, 2005.
- [19] *Katalog polovodičových součástek TESLA*. 1988.
- [20] J. Tuček: *Auta východního bloku*. Grada Publishing, a. s., Praha, 2009.
- [21] O. Chytilík: *Motorový vůz 810 a 809*. Metis EPV, Blatec, 2008.
- [22] *tzbinfo* [online]. Olověné akumulátory, ©2019 cit. [9.1.2020]. Dostupné z <https://oze.tzbinfo.cz/akumulace-elektriny/20053-olovene-akumulatory>.
- [23] *Electronic Components Datasheet Search* [online]. L7812, L7912, ©2018 cit. [20.3.2020]. Dostupné z <https://www.alldatasheet.com>

Příloha č. 1 – Celkové schéma zapojení



Obr. 34 Celkové schéma zapojení

Příloha č. 2 – Schéma zapojení generátoru přerušení



Obr. 35 Schéma zapojení generátoru přerušení (signálu xp)

Příloha č. 3 – Rozpis součástek

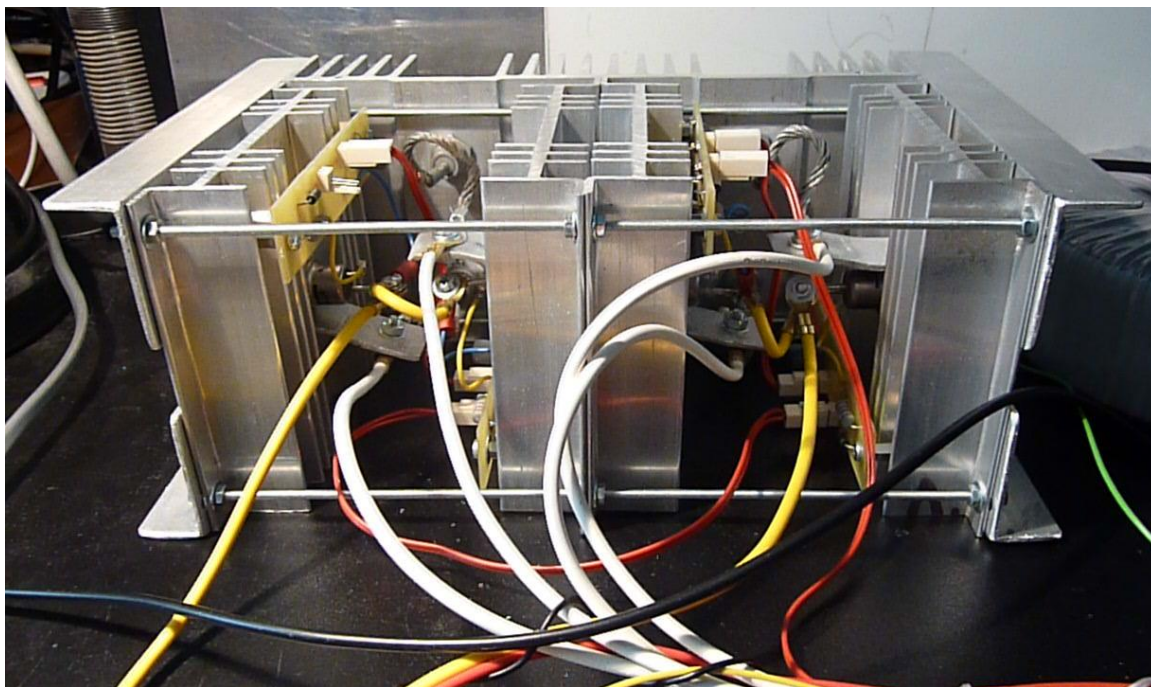
Ty1	KT 705
Ty2	KT 705
Ty3	KT 705
Ty4	KT 705
Ty5	BT169D
D1	KY 719
D2	KY 719
D3	KY 719
D4	KY 719
D5	součást usměrňovacího můstku B250C1500
D6	součást usměrňovacího můstku B250C1500
D7	součást usměrňovacího můstku B250C1500
D8	součást usměrňovacího můstku B250C1500
D9	1N4007
D10	BZX83V005.6
D11	BZX83V003.0
D12	1N4148
D13	1N4007
D14	1N4148
D15	1N4148
D16	1N4148
D17	BA159
D18	BA159
D19	BA159
D20	BA159
D21	1N4148
D22	1N4148
IO1	1458, 2x operační zesilovač, DIP 8
IO2	1458, 2x operační zesilovač, DIP 8
IO3	1458, 2x operační zesilovač, DIP 8
IO4	MZH115, 4xNAND, DTL, DIP 16
IO5	MZH115, 4xNAND, DTL, DIP 16
IO6	časovač 555, DIP 8
IO7	stabilizátor 7812, +12 V, 1 A
IO8	stabilizátor 79L12, -12 V, 0,1 A
T1	BC327
T2	BC337
T3	BC337
T4	BC337
T5	BC337

R1	33R
R2	33R
R3	33R
R4	33R
R5	bočník 13,5 mΩ, viz. text
R6	10k
R7	trimr 100k/N
R8	1M8
R9	10k
R10	trimr 25k/N
R11	56k
R12	150k
R13	4k7
R14	22k
R15	10k
R16	1k8
R17	2k2
R18	2k2
R19	150k
R20	56R/10 W
R21	10k
R22	10k
R23	trimr 25k/N
R24	10k
R25	2k7
R27	56k
R28	22k
R29	12k
R30	10k
R31	120R/2 W
R32	120R/2 W
R33	120R/2 W
R34	120R/2 W
R35	1k2
R36	22k
R38	220k
C1	1u/100 V, foliový, RM 5
C2	1u/100 V, foliový, RM 5
C3	1u/100 V, foliový, RM 5
C4	1u/100 V, foliový, RM 5
C5	1u/25 V, elektrolyt radiální, RM 2,5
C6	1u/100 V, foliový, RM 5

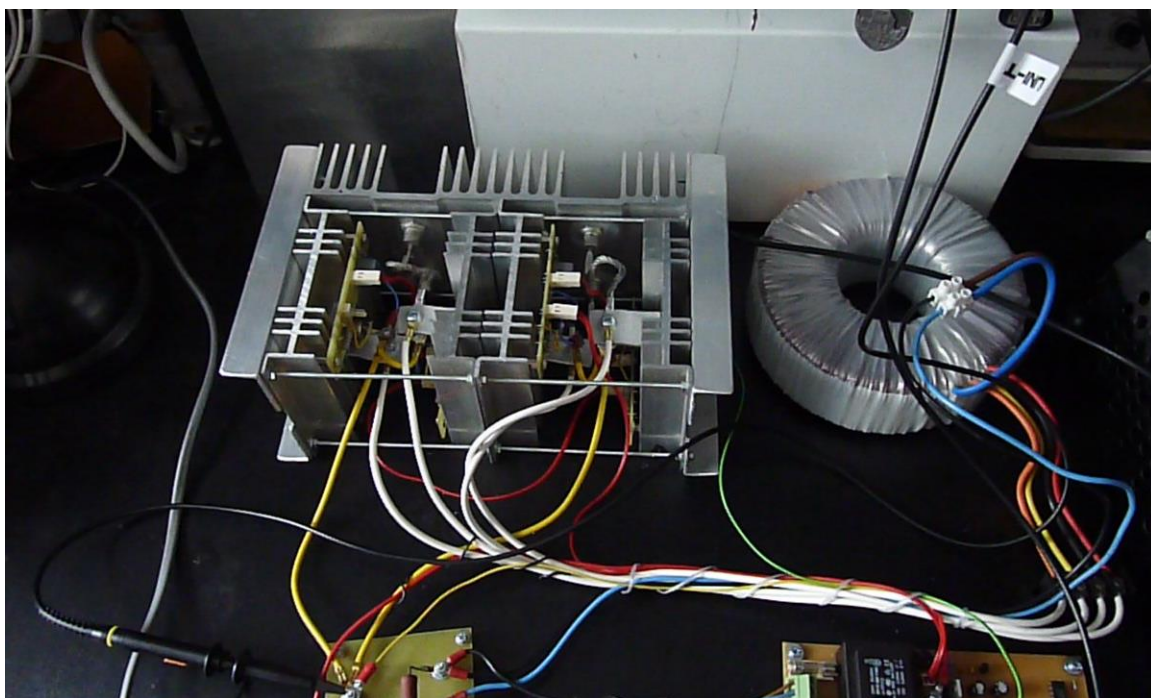
C7	10u/16 V, elektrolyt radiální, RM 2,5
C8	10n/63 V, foliový, RM 5
C9	100u/25 V, elektrolyt radiální, RM 5
C10	100u/25 V, elektrolyt radiální, RM 5
C11	100n/63 V, foliový, RM 5
C12	100n/63 V, foliový, RM 5
C13	100n/63 V, foliový, RM 5
C14	100n/63 V, foliový, RM 5
C15	10n/63 V, foliový, RM 5
C16	10u/16 V, elektrolyt radiální, RM 2,5
C17	10u/16 V, elektrolyt radiální, RM 2,5
C18	10n/63 V, foliový, RM 5
C19	10u/16 V, elektrolyt radiální, RM 2,5
C20	10n/63 V, foliový, RM 5
C21	10u/16 V, elektrolyt radiální, RM 2,5
C22	10n/63 V, foliový, RM 5
C23	470u/16 V, elektrolyt radiální, RM 5
C24	2m2/16 V, elektrolyt radiální, RM 5
C25	10n/63 V, foliový, RM 5
C26	10n/63 V, foliový, RM 5
K1	relé DC 12 V, 1x spínací nebo přepínací kontakt 230 VAC/10 A
K2	relé DC 12 V, miniaturní, 1x přepínací kontakt
K3	relé DC 12 V, 2x přepínací kontakt 30 VDC/8A

Ostatní součásti jako spojovací materiál apod. zde nejsou uvedeny. Všechny rezistory jsou v THT provedení s dovolenou výkonovou ztrátou 0,5 W, pokud není u jejich popisu uvedeno jinak. Bočník R5 je zhotoven z transformátorového plechu, tloušťky 0,5 mm, o rozměrech 41×6 mm.

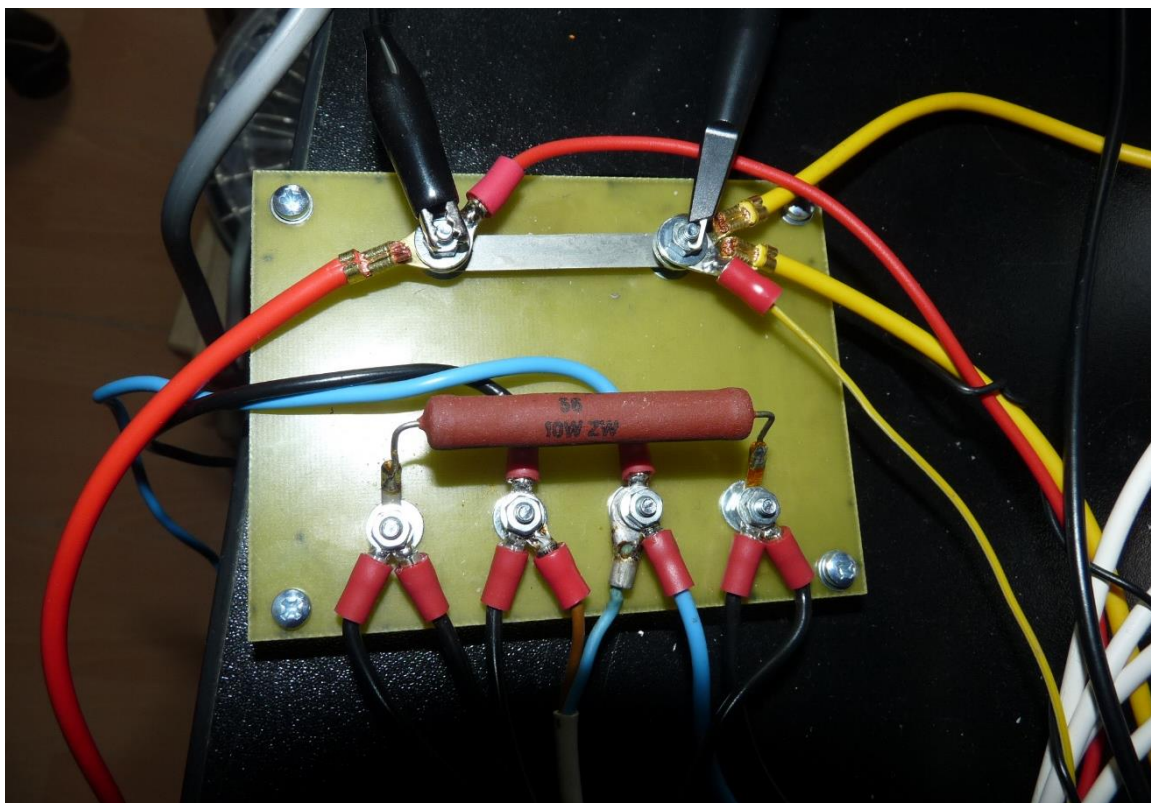
Příloha č. 4 – Fotodokumentace



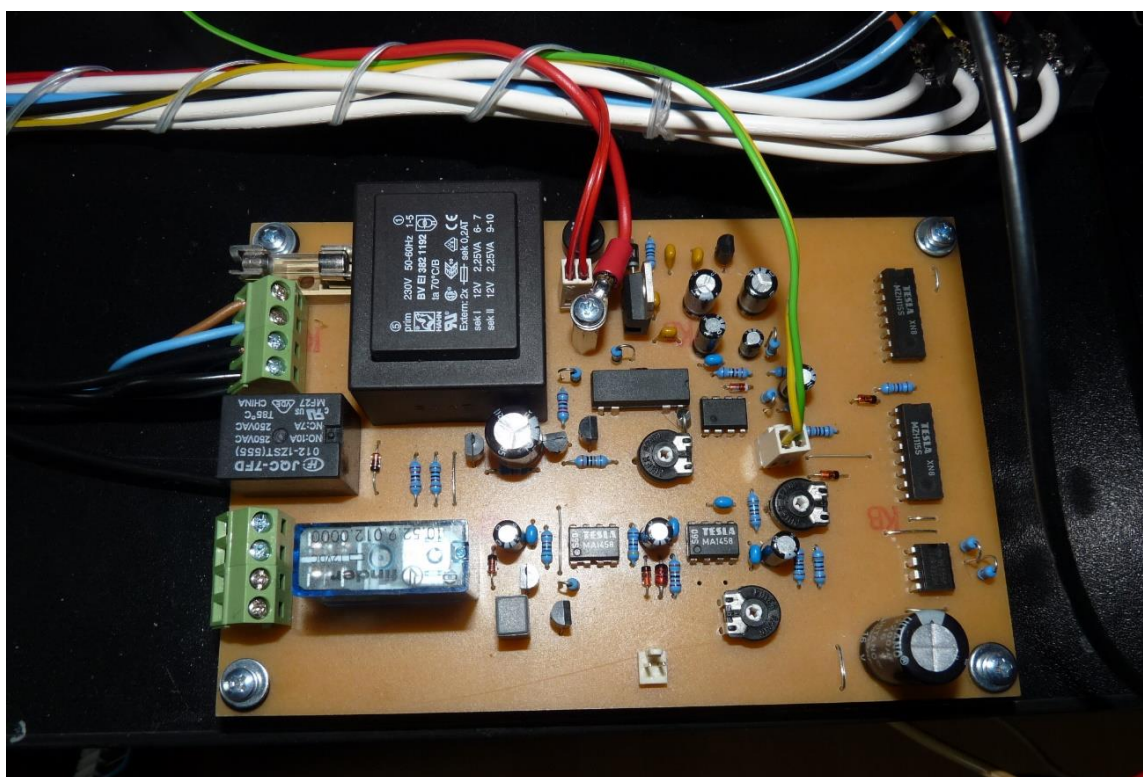
Obr. 36 Pohled na výkonový měnič



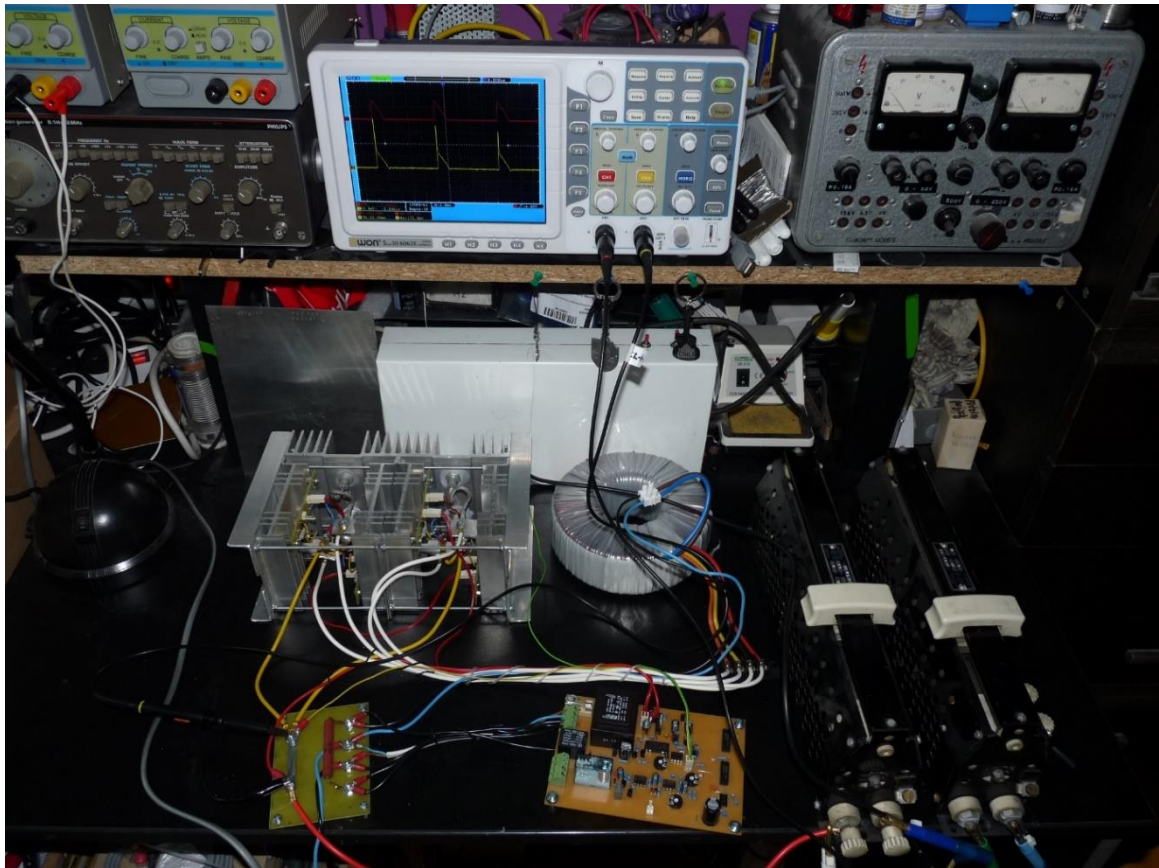
Obr. 37 Silový obvod



Obr. 38 Provedení rozvodu nízkého napětí, nárazový soft-start rezistor a bočník měření nabíjecího proudu



Obr. 39 DPS s řídicími obvody



Obr. 40 Pohled na nabíječ na pracovním stole během měření – v pravé části jsou patrné zatěžovací proměnné rezistory