



Bakalářská práce

Programovatelný napájecí zdroj pro řízení modelové železnice

Studijní program:

Mechatronika

Studijní obor:

Mechatronika

Autor práce:

Jaroslav Havel

Vedoucí práce:

doc. Ing. Milan Kolář, CSs.

Ústav technické mechatroniky a informatiky

Liberec 2022



Zadání bakalářské práce

Programovatelný napájecí zdroj pro řízení modelové železnice

<i>Jméno a příjmení:</i>	Jaroslav Havel
<i>Osobní číslo:</i>	M20000107
<i>Studijní program:</i>	Mechatronika
<i>Studijní obor (specializace):</i>	Mechatronika
<i>Zadávající katedra:</i>	Ústav technické mechatroniky a informatiky
<i>Akademický rok:</i>	2022/2023

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši napájecích zdrojů a jejich parametrů pro modelovou železnici v analogovém řízení.
2. Navrhněte regulovatelný napájecí zdroj pro řízení modelové železnice, který bude mít následující parametry:
 - bude schopen napájet hnací vozidla dle platných modelářských norem NEM,
 - bude poskytovat na svém výstupu stejnosměrné napětí 0-12 V,
 - bude schopen dodávat proud v rozmezí 0 až 2 A,
 - zdroj bude schopen měnit polaritu výstupního napětí (tedy i směr jízdy vlaku),
 - zdroj bude plynule regulovatelný, tj. v reálném provozu bude možné realizovat plynulý rozjezd vlaku
 - zdroj bude možné ovládat bezdrátově za pomoci mobilního telefonu/tabletu.
3. Navržený zdroj realizujte a ověřte jeho parametry

Rozsah grafických prací: Dle potřeby dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: 40 stran
Forma zpracování práce: Tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] MICHALČÍK, Bohumil. Mikroprocesorem řízený regulovatelný zdroj. Brno 2010. Bakalářská práce. FEKT VUT v Brně.
[2] TOMÁNEK, Radek. Laboratorní zdroj. Brno 2017. Bakalářská práce. FEKT VUT v Brně.

Vedoucí práce: doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
Ústav technické mechatroniky a informatiky

Datum zadání práce: 26. září 2022
Předpokládaný termín odevzdání: 15. května 2023

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Josef Černožorský, Ph.D.
vedoucí ústavu

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval/a samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom/a toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom/a povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom/a následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

1. května 2023

Jaroslav Havel

Programovatelný napájecí zdroj pro řízení modelové železnice

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou napájení modelové železnice dle normy NEM 611. Konkrétně jsou popsány možnosti konstrukce napájecích zdrojů pro evropsky nejrozšířenější standard stejnosměrného napájení využívající napětí 0-12 V. Práce jednak mapuje v současné době dostupné výrobky na trhu, bere si rovněž za cíl seznámit s možnostmi konstrukce stejnosměrných zdrojů napětí. Jsou prezentovány lineární stabilizátory, DC/DC měniče (a to jak v podobě STEP UP nebo STEP DOWN) a AC/DC měniče (flyback zapojení). U jednotlivých metod regulace výstupního napětí je provedeno seznámení s vlastnostmi daných zapojení. Obsahem práce je dále konstrukce vlastního zdroje pro napájení modelové železnice. Zdroj využívá k regulaci výstupního napětí měnič MP8862, který je řízen za pomoci mikrokontroléru. Práce obsahuje seznámení s měničem MP8862, který je hlavním konstrukčním prvkem zdroje, a to z důvodu možnosti nastavení výstupního napětí naprogramováním měniče. Mikrokontrolér zvládá rovněž komunikovat bezdrátově s mobilním zařízením, které může zdroj ovládat. Komunikace mezi zdrojem a mobilním zařízením využívá komunikační protokol zkonstruovaný za účelem ovládnutí této aplikace. Je proveden popis toho, jakým způsobem byl tento protokol implementován, a to jak v mobilní aplikaci, tak v mikrokontroléru samotném. Je probráno řešení konstrukce programu v mikrokontroléru s ohledem na fyzickou realizaci jeho periférií tak, aby byla komunikace funkční.

Klíčová slova

programovatelný zdroj napětí, zdroj napětí pro modelovou železnici, programovatelný DC/DC měnič, AVR, MP8862, USART

Programmable power supply for model railway control

Abstract

This bachelor's thesis was created in order to shed light on the issue of powering a model railway according to the NEM 611 standard. Specifically, the possibilities of designing power sources for Europe's most widespread standard direct current power supply using a voltage of 0-12 V are described. It also aims to become familiar with the possibilities of constructing DC voltage sources. High linear stabilizers, DC/DC converters (both in the form of STEP UP or STEP DOWN) and AC/DC converters (fly-back connection) are presented. For the individual methods of output voltage regulation, familiarization with the characteristics of the given connections is made. The content of the work is also the construction of the own source for powering the model railway. The power supply uses the MP8862 converter, which is controlled by a microcontroller, to regulate the output voltage. The work provides an introduction to the MP8862 converter, which is the main structural element of the source, due to the possibility of setting the output voltage by programming the converter. The microcontroller can also communicate wirelessly with a mobile device that can control the source. Communication between the source and the mobile device uses a communication protocol of own design. It is described how this protocol was implemented, both in the mobile application and in the microcontroller itself. The solution to the design of the program in the microcontroller is discussed with regard to the physical implementation of its peripherals so that the communication is functional.

Keywords

programmable power supply, power supply for model railway control, programmable DC/DC converter, AVR, MP8862, USART

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat všem lidem, kteří mě podpořili při psaní této bakalářské práce. Chtěl bych poděkovat vedoucímu svojí práce, panu doc. Ing. Milanu Kolářovi, Csc., za vstřícný přístup a cenné rady při vytváření této práce. Rovněž bych chtěl poděkovat panu Ing. Lubomíru Slavíkovi, Ph. D., za umožnění přístupu do školní bastlírny, stejně jako za umožnění využití školní učebny pro testování a měření. Poděkování dále patří mojí rodině, která mě během vytváření mojí bakalářské práce podporovala, a byla velmi tolerantní k činnostem, které vedly k jejímu sestavení. Na posledním místě si zaslouží poděkování můj spolužák, Ondřej Wiener, který se podílel na vzniku šablony pro sestavení psané podoby této bakalářské práce pro celý ročník.

Obsah

1	Seznam obrázků	9
2	Seznam zkratek	10
	Úvod.....	13
	Teoretická část	15
3	Základní terminologie.....	15
4	Dostupné výrobky na trhu.....	16
5	Teoretické znalosti z elektroniky.....	19
6	Zdroj s lineárním stabilizátorem	25
7	Využití AC/DC měniče, flyback converter.....	28
8	Napájecí zdroj s využitím DC/DC měniče.....	33
9	Měnič MP8862	36
10	Programovatelné obvody použité k vlastní konstrukci.....	37
	Praktická část	40
11	Zapojení zdroje.....	40
12	Komunikační protokol bezdrátového ovládání.....	42
13	Vývoj softwaru řídicí jednotky	48
14	Programování mobilní aplikace.....	52
15	Doplňkové funkce.....	53
	Závěr.....	56
	Použitá literatura.....	58
	Přílohy	60
	A Schémata zapojení.....	60
	A.1 Schéma zapojení zdroje napětí pro regulační část	60
	A.2 Schéma regulační části zdroj.....	61
	B Desky plošných spojů	62
	B.1 Deska zdroje napětí pro regulační část, spodní vrstva mědi	62
	B.2 Deska regulační části výstupního napětí, spodní vrstva mědi.....	63
	B.3 Deska regulační části výstupního napětí, horní vrstva mědi	64
	B.4 Deska zdroje napětí pro regulační část, pohled z vrchu	65
	B.5 Deska zdroje napětí pro regulační část, pohled zespod.....	66
	B.6 Deska regulační části výstupního napětí, pohled z vrchu	67

B.7	Deska regulační části výstupního napětí, pohled zespod	68
C	GUI mobilní aplikace	69

1 Seznam obrázků

Obrázek 1:	Zjednodušené schéma zapojení napaječe PIKO FZ1 M005	18
Obrázek 2:	RL obvod	19
Obrázek 3:	Sepnutý RL obvod	20
Obrázek 4:	Rozpojený RL obvod	22
Obrázek 5:	Maření energie na transilu	24
Obrázek 6:	Principiální schéma zdroje s lineárním stabilizátorem	25
Obrázek 7:	Principiální schéma lineárního regulátoru	26
Obrázek 8:	Flyback zapojení, spínaný zdroj, napájení AC	28
Obrázek 9:	Porovnání velikostí SMPS (65 VA) a síťového transformátoru (24 VA)	29
Obrázek 10:	Blokové schéma zdroje využívajícího STEP UP měniče	33
Obrázek 11:	Principiální schéma STEP UP měniče	34
Obrázek 12:	Blokové schéma zdroje využívajícího STEP DOWN měnič	35
Obrázek 13:	Principiální zapojení STEP DOWN měniče	36
Obrázek 14:	Zapojení měniče MP8862	36
Obrázek 15:	Blokové schéma myšlenky aplikace zdroje	41
Obrázek 16:	Realizace obsluhy komunikace po duplexním rozhraní	42
Obrázek 17:	Struktura datového rámce komunikace	44
Obrázek 18:	Části programu odesílající datové rámce v mobilní aplikaci	45
Obrázek 19:	Vysouvání fronty vysílače mobilní aplikace	45
Obrázek 20:	Bloky řadící datové rámce do fronty vysílače v mobilní aplikaci	46
Obrázek 21:	Programové bloky řešící připojování a odpojování Bluetooth komunikace	52
Obrázek 22:	Obsluha přijímače Bluetooth v mobilní aplikaci	53
Obrázek 23:	Rozložení pásů pohybu potenciometru	55

2 Seznam zkratek

Φ	Magnetický tok [Wb]
ρ	Účinnost [%]
ρ	Měrný elektrický odpor [$\Omega \cdot m$]
AC	Alternating Current = střídavý proud
ACK	Acknowledge = potvrzení přijetí/odeslání dat, obdržení vlastní slave adresy, komunikace I2C
B	Magnetická indukce [T]
d	Průměr [m]
D	Materiálová hustota [$kg \cdot m^{-3}$]
DC	Direct Current = stejnosměrný proud
f	Frekvence [Hz]
FET	Field Effect Transistor = tranzistor využívají principu elektrostatického pole
FIFO	First In, First Out = paměť typu fronta
GUI	Graphic User Interface = grafické rozhraní pro uživatele
I_1	Vstupní proud [A]
I_2	Výstupní proud [A]
I_{OUT}	Výstupní proud [A]
I2C	Komunikační rozhraní, sběrnice
L	Magnetická indukčnost [H]
LED	Light Emitting Diode = svítivá dioda
LDO	Low Dropout Regulator = lineární regulátor s nízkým úbytkem napětí
MOSFET	Metal Oxide Field Effect Transistor = tranzistor využívající vlastnosti přechodu kov izolant (elektrostatické pole)
MSB	The Most Significant Bit = bit s nejvyšší vahou
NEM	Normen Europäischer Modelleisenbahnen = evropské modelářské normy pro modelovou železnici
N_1	Počet primárních závitů [-]
N_2	Počet sekundárních závitů [-]
p	Převodový poměr [-]
P	Výkon [W]
PWM	Pulse Width Modulation = pulzně šířková modulace, bezztrátová metoda regulace výkonu
$R_{DS(ON)}$	Drain Source ON Resistance = odpor mezi vývody Drain a Source v sepnutém stavu [Ω]
RXCIE0	RX Complete Interrupt Enable 0 = bit lokálního povolení přerušení při obdržení dat periférií USART0 u mikrokontroléru Atmega 328P
RXC0	USART 0 Receive Complete = příznakový bit dokončení přijímání 1 bytu periférie USART0 u mikrokontroléru Atmega 328P
RXEN0	Receiver Enable 0 = bit povolení činnosti přijímače periférie USART0 u mikrokontroléru Atmega 328P
RISC	Reduced Instruction Set Computer = počítač s jednoduchými instrukcemi
SCK	Serial Clock = rozvod sériových hodin
SCL	Serial Clock = rozvod sériových hodin
SDA	Serial Data = sériová linka pro data

SMPS	Switching Mode Power Supply = spínaný zdroj
SMT	Surface Mouth Technology = technologie osazování plošných spojů povrchovou montáží
SPDT	Single Pole Double Throw = dvupolohový přepínací kontakt
t_{rr}	Reverse Recovery Time = čas závěrného zotavení [S]
THT	Through Hole Technology = technologie osazování plošných spojů s vývody skrz desku
TWAR	TWI Slave Adress Register = registr sloužící k nastavení vlastní slave adresy mikrokontroléru Atmega 328P
TWBR	TWI Bit Rate Registr = registr sloužící ke konfiguraci komunikační rychlosti periferie TWI u mikrokontroléru Atmega 328P
TWCR	TWI Control Registr = registr ovládající komunikaci periferie TWI mikrokontroléru Atmega 328P
TWI	Two Wire Interface = komunikační rozhraní, obdoba I2C
TWSR	TWI Status Registr = stavový registr uchovávající informaci o průběhu komunikace periferie TWI mikrokontroléru Atmega 328P
TXCIE0	TX Complete Interrupt Enable 0 = bit lokálního povolení přerušení při odeslání dat periferií USART0 u mikrokontroléru Atmega 328P
TXC0	USART 0 Transmit Complete = příznakový bit ukončení odesílání jednoho bytu periferie USART0 mikrokontroléru Atmega 328P
TXEN0	Trnasmmitter Enable 0 = bit povolení činnosti přijímače periferie USART0 u mikrokontroléru Atmega 328P
UART	Universal Asynchronous Reciever Transmitter = komunikační rozhraní, sériová linka v asynchronním režimu
U_{BR}	Breakdown Voltage = průrazné napětí [V]
UDR0	USART 0 I/O Registr = registr pro příjem/vysílání dat periferie USART0 mikrokontroléru Atmega 328P
UCPOL0	Clock Polarity = nastavení odesílání na sestupnou/vzestupnou hranu hodinového signálu periferie USART0 mikrokontroléru Atmega 328P
UCSR0A	USART 0 Control and Status Registr A = řídicí a příznakový registr A periferie USART0 mikrokontroléru Atmega 328P
UCSR0B	USART 0 Control and Status Registr B = řídicí a příznakový registr B periferie USART0 mikrokontroléru Atmega 328P
UCSR0C	USART 0 Control and Status Registr C = řídicí a příznakový registr C periferie USART0 mikrokontroléru Atmega 328P
UCSZ00	Character Size Bit 0 = bit sloužící ke konfiguraci délky přenášených dat periferie USART0 mikrokontroléru Atmega 328P
UCSZ01	Character Size Bit 1 = bit sloužící ke konfiguraci délky přenášených dat periferie USART0 mikrokontroléru Atmega 328P
UCSZ02	Character Size Bit 2 = bit sloužící ke konfiguraci délky přenášených dat periferie USART0 mikrokontroléru Atmega 328P
UMSEL00	USART 0 Mode Select 0 = bit sloužící k nastavení režimu fungování periferie USART0 mikrokontroléru Atmega 328P
UMSEL01	USART 0 Mode Select 1 = bit sloužící k nastavení režimu fungování periferie USART0 mikrokontroléru Atmega 328P
U_{RMS}	Efektivní napětí [V]
U_{RRM}	Reverse Repetitive Maximum = opakovatelné závěrné napětí [V]
USART	Universal Synchronous Asynchronous Reciever Transmitter = komunikační rozhraní, sériová linka

USART Stop Bit Select = bit sloužící k nastavení počtu stop bitů komunikace
periferie USART0 mikrokontroléru Atmega 328P

USBS

Vstupní napětí [V]

Výstupní napětí [V]

U₁

Double USART 0 Transmission Speed =bit sloužící k nastavení dvounásobné
komunikační rychlosti periferie USART0 mikrokontroléru Atmega 328P

U₂

U2X0

Úvod

Největšího průmyslového rozvoje zaznamenal svět v 19. století. Vynález parního stroje a pochopení základních principů elektromagnetismu vedlo k prudkému rozvoji techniky. Parní stroj našel své nejvýznamnější uplatnění v dopravě, a to ať jak v lodní, tak v železniční. Člověk byl jeho pohybem fascinován, stejně jako zvukovými a kouřovými efekty. Železniční doprava, ve které našel parní stroj svého asi nejznámějšího využití v podobě parní lokomotivy, se stala strategicky nejvýznamnějším způsobem vnitrostátní přepravy. Po železnici zpočátku putovalo hlavně zboží, později se železniční doprava začala orientovat i na přepravu cestujících. Atmosféra funících parních lokomotiv, mechanických návěstidel, lanovodů okolo trati, i modrých uniforem železničních zaměstnanců učarovala nejednoho mladého chlapce. Touha po tom mít ve svém dětském pokojíčku vlastní železnici vedla nejprve k výrobě dřevěných hraček, které se nemohly hýbat vlastní silou. Později se objevily elektrické vláčky, které se už svojí vlastní silou hýbaly. Z původně dětské hračky se však stal koníček, který měl za cíl napodobit, pokud možno, co nejdůvěryhodněji reálný železniční provoz. Byla definována měřítko, která měla zajistit to, že se realita přenesla do miniaturního světa co nejdůvěryhodněji. Tak, jak se postupně objevovaly nové technologie a materiály v průmyslu, se postupně dařilo vytvářet stále více zpracované modely železničních kolejových vozidel a i okolí. Ve spoustě velkých měst, které mají svoji historii spjatou s železnicí, vznikly kluby modelářů, které staví svoje velká klubová modelová kolejiště. Vzhledem k tomu, že postavení scénérie zabere spoustu místa, se stalo fenoménem i tzv. modulové modelaření, tzn. každý modelář zpracuje určitý úsek trati, která se sestaví do celku v nějaké velké místnosti (nejčastěji sportovní hale či tělocvičně) při modelářském setkání.

To, aby byla vytvořena miniatura zajímavá, si vyžadovalo i to, aby se modely pohybovaly vlastní silou. Hned v počátku železničního modelářství vznikala spousta standardů pro to, jak kolejová vozidla, osazená elektrickými motorčky, napájet. Tato bakalářská práce pojednává pro pevninskou část Evropy nejtypičtějším standardem ovládání, kdy je hnací vozidlo osazeno stejnosměrným motorkem, který se může napájet napětím v rozmezí -12 V až 12 V, dle směru jízdy vozidla (popsáno v NEM 611, viz [22]). Existují však i standardy využívající střídavé elektromotorky. Ovládání směru a rychlosti hnacího vozidla bylo zpočátku problémem řízení stejnosměrného motoru. Jak se modelářství vyvíjelo, zvyšovaly se požadavky na to, co by měla samotná hnací vozidla umět. Modelářům nestačilo, že trakční vozidla uměla jezdit, přáli si zvukové efekty, u parních strojů možnost vypouštění kouře, dále pak rozpojování souprav a jiné vychytávky. Díky rozvoji mikroelektroniky vznikl nový způsob ovládání, a to ovládání zvané jako digitální. To přesunulo regulaci směru a rychlosti jízdy dovnitř hnacích vozidel, která se začala ovládat přes centrálu. Centrála na napájecí kolejové obvody moduluje příkazy, které si dekodér umístěný v hnacím vozidle demoduluje. Také se může bezdrátově propojit s ovladačem nebo mobilním zařízením. Centrála umožňuje řídit několik hnacích vozidel současně, přičemž kolejové obvody nemusí být rozdělené na izolované úseky jako u analogového ovládání. Digitální ovládání se rozšířilo zejména u modelářských klubů. Tam bylo výhodné takovéto ovládání provozovat, protože na větších kolejištích se do řízení provozu mohlo zapojit více lidí. Nevýhodou digitálního ovládání je vysoká cena za ovládání modelového kolejiště, kdy pořizovací cena hnacího vozidla s digitálním ovládáním je dvojnásobná oproti pořizovací ceně hnacího vozidla s analogem. Pro spoustu modelářů, kteří si chtějí jezdit na svém soukromém modelovém kolejišti, digitální ovládání přináší zbytečné náklady. Při řízení provozu není

komfortní ovládat více vlaků současně, proto volí pro své kolejiště analogové ovládání. To má ale nevýhody v tom, že nedovoluje vzdálené ovládání hnacích vozidel.

Cílem této práce je zabývat se myšlenkou převzetí předností jednotlivých způsobů ovládání a integrování těchto metod do technického řešení, které bude kombinovat výhodu vzdáleného ovládání za pomoci mobilního zařízení při zachování nízkých nákladů na pořizování hnacích vozidel.

Práce se zabývá jednotlivými způsoby možnosti konstrukce zdroje stejnosměrného napětí, který by se mohl použít pro analogové ovládání. A to nejen z hlediska technické náročnosti a možnosti regulace výstupního napětí, které má vliv na rychlost hnacího vozidla. V práci je v poslední řadě zohledněna i efektivita daného konstrukčního typu zdroje, která při jeho dlouhodobém používání má vliv na náklady na jeho provoz. Je rovněž věnována pozornost realizaci komunikačního protokolu pro ovládání tohoto zdroje, zejména opatřením vedoucím k zajištění bezpečnosti této komunikace. Dále musí být zajištěno, že zdroj napětí bude vždy pod kontrolou a nedojde k jeho nepředvídatelnému a nestabilnímu chování.

Teoretická část

3 Základní terminologie

Kolejové vozidlo

Kolejové vozidlo je jakékoliv vozidlo, které se může pohybovat po traťovém úseku za pomoci dvojkolí odvalujících se po kolejnicích.

Hnací vozidlo

Je speciální případ kolejového vozidla, které může vytvářet tažnou sílu, je tedy aktivním zdrojem tažné síly.

Vlak

Vlak je z mechanického pohledu spojení kolejových vozidel do jednoho celku, kdy dochází k přenosu tažné síly mezi jednotlivými kolejovými vozidly za pomoci pevných spojů, spřáhel. Vlak se skládá zpravidla alespoň z jednoho hnacího vozidla a případně dalších kolejových vozidel.

Pohon hnacích vozidel

K pohonu hnacího vozidla se používá stejnosměrný motor, který bývá napájen stejnosměrným napětím v rozmezí 0 až 12 V, s tím, že se používají obě polarity napájecího napětí. Elektromotor bývá usazen v rámu hnacího vozidla, elektricky se napájí z kolejových obvodů, kterými jsou samotné kolejnice. O přenos elektrické energie se starají dvojkolí. Dvojkolí tvoří dvě kola pevně spojená hřídelí. Tato kola musí být od sebe elektricky izolovaná, tedy alespoň jedno spojení kolo-hřídel musí být nevodivé. Pokud je pouze jedno spojení vodivé, mluví se o jednostranně izolovaném dvojkolí. V případě, že jsou obě spojení izolovaná, jedná se o oboustranně izolované dvojkolí. Oboustranně izolovaná dvojkolí nacházejí zpravidla uplatnění při konstrukci hnacích vozidel, kdy hřídel mimo dvou kol obsahuje i ozubené kolo, které je mechanickým převodem spojeno s hřídelí elektromotoru. Naopak jednostranně izolovaná dvojkolí se používají při osvětlování osobních vozů, kdy hřídel bývá elektricky vodivá. Zpravidla se na jeden podvozek řadí dvojkolí s hřídelí izolovanou na jedné straně, druhý podvozek se řadí s dvojkolími izolovanými na druhé straně. Dvojkolí mají elektrický styk se sběrnými kontakty, které bývají uloženy v podvozcích. Sběrné kontakty jsou z elastického kovového materiálu. Za pomoci vodičů se spojují s plošným spojem, který má za účel napájet jednotlivé komponenty hnacího vozidla. Mezi ně patří elektromotor, ale i osvětlení. Samotný stejnosměrný elektromotor je z mechanického hlediska vysokootáčkový motor, jehož rotor se otáčí v rozmezí hodnot 12 000 až 25 000 otáček za minutu v nezátíženém stavu. Pokud je motor použit k vytváření a přenosu hnací síly, klesají otáčky na hodnotu 6 000 až 12 000 otáček za minutu. Motor má oboustrannou hřídel, aby mohl pohánět oba podvozky. Na obou stranách hřídele jsou umístěny převodovky, které snižují otáčky přenášené na hnací dvojkolí. Snižováním otáček se zvýší moment, tedy i velikost tažné síly, kterou může hnací vozidlo dodávat. Používají se například převodovky s dělicím poměrem 16:1. Za pomoci ozubeného převodu se následně mechanický výkon přenáší na hnaná dvojkolí [1].

Ovládané veličiny

Mezi ovládané veličiny patří rychlost hnacího vozidla a směr jízdy. Rychlost hnacího vozidla je závislá převážně na velikosti napájecího napětí přivedeného na kolejnice. Její velikost však ovlivňuje řada faktorů, které lze rozdělit na vlastní parametry hnacího vozidla, vlastnosti traťového úseku, na kterém se hnací vozidlo pohybuje, a vlastnosti vlaku, který veze. K vlastním parametrům hnacího vozidla náleží například převod otáček stejnosměrného motoru na hnací dvojkolí, kvalita kontaktních spojů v elektrické cestě dvojkolí – elektromotor, ale i hmotnost hnacího vozidla, která ovlivňuje schopnost přenášet tažnou sílu. Mezi vlastnosti traťového úseku, na kterém se hnací vozidlo pohybuje, patří sklonové poměry úseku, kvalita povrchu kolejnic (elektrické vlastnosti). Každý vlak, který hnací vozidlo veze, je samozřejmě charakteristický hmotností nebo mechanickým odporem dvojkolí. Směr jízdy závisí na polaritě přivedeného napětí.

Analogové ovládání

Analogové ovládání spočívá z hlediska změny rychlosti hnacího vozidla ve změně velikosti napětí poskytovaného na kolejnicích (rozdíl napětí mezi kolejnicemi). Změna směru jízdy hnacího vozidla se pak realizuje tak, že se změní polarita napětí přiváděného na koleje. Závislost směru jízdy hnacího vozidla na polaritě napětí přivedeného na kolejnice při dvoukolejnicovém napájení udává norma NEM 631 (viz [22]). U analogového ovládání jsou všechny akční členy, regulační ovládací obvody a přidružené komponenty určené k ovládání umístěny mimo hnací vozidlo. Hnací vozidlo obsahuje pouze elektromotor [2].

Digitální ovládání

Digitální ovládání přenáší část ovládacích obvodů dovnitř hnacího vozidla. Kolejnice jsou napájeny pevným napětím. Uvnitř hnacího vozidla se nachází dekodér, který ovládá jednotlivé akční členy sloužící k ovládání hnacího vozidla. Příkaz pro ovládání vzniká uvnitř ovladače nebo mobilního zařízení, které komunikuje s centrálou. Centrála kromě toho, že poskytuje napájecí napětí do kolejových obvodů, moduluje příkazy pro ovládání hnacího vozidla na dané napájecí napětí. Dekodér umístěný uvnitř hnacího vozidla pak příkazy demoduluje a vykonává. Dekodér má na starost ovládací obvody hnacího vozidla, které jsou schopné měnit směr jízdy nebo ovlivňovat rychlost hnacího vozidla [2].

4 Dostupné výrobky na trhu

Současná situace na trhu s napájecími zdroji odpovídá dělení řízení modelové železnice na analogové ovládání a digitální ovládání. Dají se koupit buď digitální centrály nebo analogové ovladače. Na trhu neexistuje žádný výrobek, který by kombinoval výhody těchto metod ovládání. Nedá se koupit napájecí zdroj pro analogové ovládání, který by umožňoval vzdálené ovládání za pomoci mobilního zařízení. Zdroje pro analogové ovládání se dělí na PWM regulátory a klasické regulátory, které poskytují konstantní průběh napětí v čase. PWM regulátory regulují velikost napětí, které se přivádí na elektromotor, za pomoci změny střídy signálu. Rychlost pohybu hnacího vozidla je pak úměrná střední hodnotě napětí PWM průběhu. Naopak klasické regulátory mají spojitý průběh napětí v čase, velikost tohoto napětí se mění pouze v závislosti na otočení ovládacího prvku.

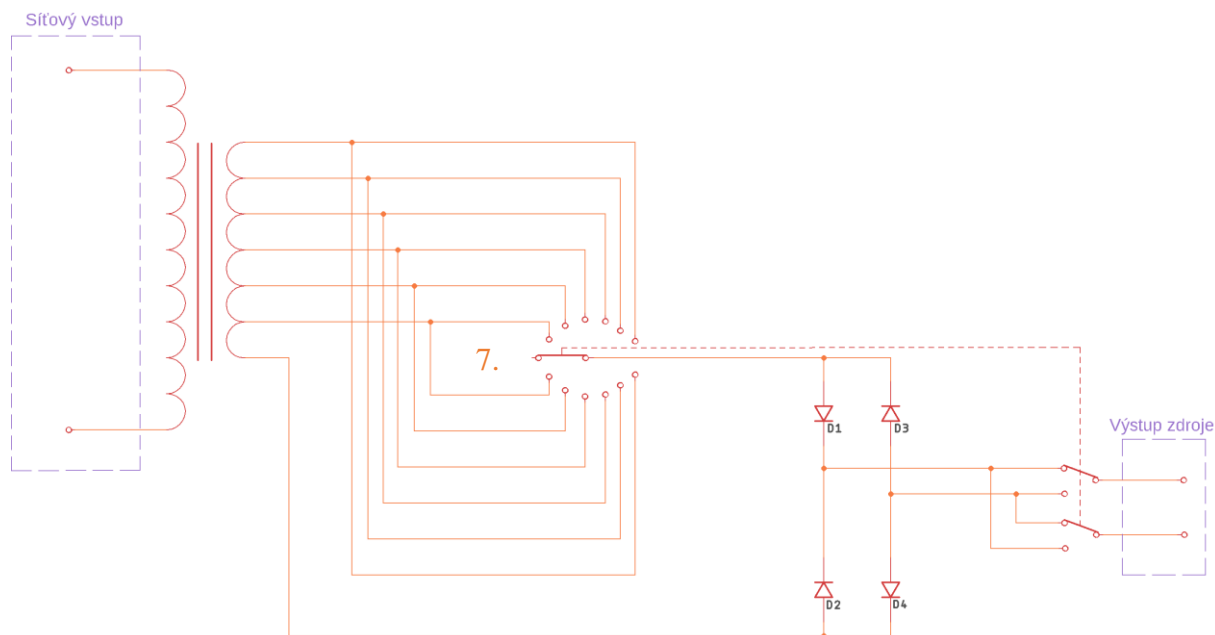
Parametry výrobků

Výstupní napětí napájecích zdrojů se pohybuje v rozmezí 0-12 V, jak určuje norma NEM 611 (viz [22]). Toto napětí může být u některých realizací vyšší, může dosahovat hodnoty až 14 V. Vyšší napětí než 12 V připouští i výrobci hnacích vozidel. Důležitý je však maximální proud, který může napaječ dodávat. Hnací vozidlo odebírá proud 300-350 mA (při napětí o hodnotě 12 V) v závislosti na sklonových poměrech na trati a zátěži, kterou táhne (tažné síle, kterou musí poskytovat). Jako rozumný požadavek se jeví možnost napájet minimálně 2 hnací vozidla z jednoho napaječe. Vzhledem k tomu, že modelová železnice prochází obdobím, kdy se hojně zavádí osvětlení vozů, je důležité rovněž počítat s tím, že k trakčním proudům odebíraným z výstupu zdroje se budou přičítat proudy do osvětlení. Standardní osvětlení se skládá z 8 LED, regulátoru napětí pro LED a usměrňovače na vstupu. Jako etalonové osvětlení pro určení parametrů bylo použito osvětlení pro vůz typu Y. Bude-li se počítat proud jednou LED 20 mA a započítá-li se proud 20 mA pro napájení pomocných obvodů, tak je proudový odběr jednoho osvětlení 180 mA. Osobní vlak, který táhne 5 osobních vozů s osvětlením, může mít odběr až 1 250 mA. Z toho plyne, že rozumný napaječ pro použití při řízení reálného provozu musí zvládat proudový odběr minimálně okolo 1,2 A při napětí 12 V. Při pořizování napaječe pro modelovou železnici je důležité rovněž zohlednit, jestli napaječ má ochranu proti zkratu/nadproudu. Kvalitní napaječe se poznají podle toho, že mají ochranu proti zkratu/nadproudu. Daný bezpečnostní prvek je důležitý z důvodu, že modelovou železnici mohou používat děti, které nedbalostí nebo úmyslem mohou způsobit zkrat, který by napaječ bez ochrany mohl vyřadit z provozu. Následující tabulka představuje nejrozšířenější typy napaječů, které jsou v současné době dostupné na trhu. Tabulka 1 dává do souvislosti to, jaké zdroje se hodí použít pro modelaření a jaké ne. Dělení je provedeno na základě možnosti poskytování proudu. Napaječe, které mají velikost maximálního proudu zvýrazněnou zeleně, jsou vhodné k použití za účelem ovládní modelového kolejiště na základě výše diskutovaných požadavků. V případech, kdy je provedeno červené zvýraznění, se napaječe nehodí použít při ovládní na základě diskutovaných požadavků. V takových případech se jedná o zdroje pro dětskou železnici, povětšinou start sety, u kterých se nepočítá s provozem osvětlených souprav a více hnacích vozidel na vlaku. U žlutého zvýraznění se dá napaječ použít pro ovládní provozu na kolejišti dle diskutovaných požadavků s výhradami a to povětšinou u kolejišť, které nevyužívají osvětlené soupravy.

Tabulka 1: Dostupné zdroje pro ovládní analogové železnice na trhu

Výrobce:	Model:	I _{OUTMAX} :	Bezdrátové ovládní:	Ochrana před zkratem:	Odkaz:
TRIX	T66508	1,5 A	ne	ne	[23]
Fleischmann	6725	0,6 A	ne	ano	[24]
PIKO	55003	0,45 A	ne	ne	[25]
ROCO	10788	0,6 A	ne	ano	[26]
PIKO	55000	1,5 A	ne	ne	[27]
Tillig*	08131	1 A	ne	ano	[28]
Tillig*	08132	1,4 A	ne	ano	[29]
PIKO	FZ1	1,2	ne	ano	

PIKO FZ1 M005



Obrázek 1: Zjednodušené schéma zapojení napaječe PIKO FZ1 M005

Jedná se o jeden z nejrozšířenějších typů napájecích zdrojů pro modelovou železnici, jehož konstrukce není technologicky složitá. Tento typ napaječe našel využití i při ovládání autíček na autodráze. Základem konstrukce je bezpečnostní transformátor, který má na sekundárním vinutí vyvedené odbočky z vinutí. Těchto odboček je celkem 6. Odbočky realizují to, že se dá změnit napětí, které se vyskytuje na výstupu zdroje. Pokud se bude odebírat napětí na celém sekundárním vinutí proti zemi, tak to bude napětí 16 V. Nicméně pokud se bude čerpat napětí na odbočkách, tak čím bude mít odbočka proti zemi méně závitů, tím bude menší napětí na výstupu zdroje. K přepínání odboček vinutí slouží mechanický přepínač, který kromě toho, že přepíná jednotlivá vinutí, přepíná i polaritu napětí. Mechanický přepínač se může nacházet v celkem 13 různých polohách. Prostřední poloha, tedy 7. poloha, přivádí na výstup zdroje nulové napětí. Pro všechny pozice, které jsou od 7. polohy napravo, se pak polarita výstupního napětí přepne na jeden směr. Pro všechny pozice, které jsou od 7. polohy nalevo, se polarita výstupního napětí přepne na druhý směr. Elektricky je mezi přepínač, který přepíná odbočky z vinutí, a přepínač, který přepíná polaritu napětí na výstupu, vložen dvoucestný usměrňovač. Ten má za úkol usměrnit napětí. Napaječe PIKO nepoužívají stabilizaci výstupního napětí (vyhlazení za pomoci kondenzátoru). Aby napětí u starších vozidel tolik nepulzovalo, je zapojen kondenzátor poblíž elektromotoru za účelem stabilizace. K ovládání rychlosti se tedy používá přepínání odboček vinutí. K ovládání směru jízdy slouží přepínač.

Výhody:

Konstrukce napaječe PIKO FZ1 je poměrně efektivní, co se využítí elektrické energie týče. Ztráty v tomto případě vznikají v transformátoru (ztráty ve vinutí, ztráty v železe), část energie zanikne na usměrňovači. Tyto ztráty jsou akceptovatelné. Žádný z principů konstrukce zdroje napětí pro modelovou železnici probíraný dále nepostrádá transformátor a usměrňovač.

Nevýhody:

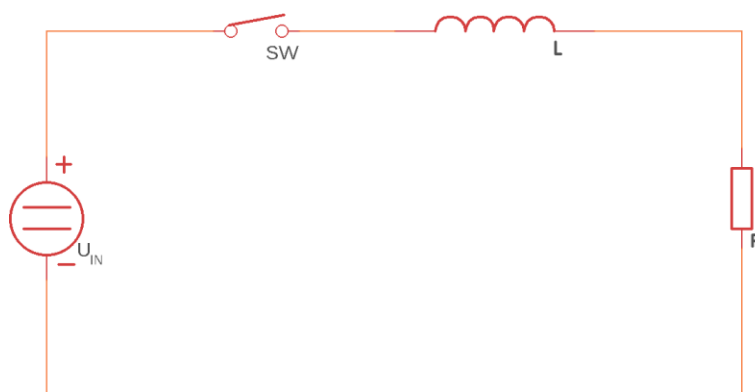
Regulace směru jízdy probíhá za pomoci přepínání odboček vinutí transformátoru pomocí mechanického přepínače. Nejedná se o plynulou regulaci, výstupní napětí laboratorního zdroje může nabývat omezeného počtu hodnot, a to pouze 7 hodnot. To nedovoluje dostatečně jemné nastavení výstupního napětí, a tedy i rychlosti hnacího vozidla. Jakýkoliv zdroj podobné konstrukce narazí na podstatné problémy, mezi které patří velká finanční náročnost konstrukce, a to zejména výroby transformátoru. Transformátor by měl mít větší množství odboček z vinutí. Další podstatnou nevýhodou této konstrukce je mechanický přepínač, který by se musel rovněž specificky konstruovat pro tuto aplikaci. Samotný mechanický přepínač má omezenou životnost a po určité době jeho používání může dojít k jeho poškození. To platí bohužel i při šetrném zacházení. Další nevýhodou je absence stabilizace výstupního napětí, která může zhoršovat jízdní vlastnosti hnacích vozidel nové konstrukce. Není možné provádět bezdrátové ovládání.

5 Teoretické znalosti z elektroniky

Úvod

Může se zdát, že se jedná o nepodstatnou část práce, opak je pravdou. Tato kapitola má za úkol uvést do souvislosti jednoduché principy teoretické elektrotechniky a chování elektrických obvodů, které se používají k regulaci výstupního napětí. V této kapitole zmíněné přechodové děje v RL obvodech mají sloužit k hlubšímu pochopení toho, na jakém principu fungují měniče napětí a spínané zdroje. Oba typy obvodů přechodové děje ke své činnosti hodně využívají. Kapitola má přinést náhled na to, jak se musí volit indukčnost cívky používané v konstrukci měniče při znalosti spínací frekvence a maximální střídý tak, aby nedošlo ke zkratu v obvodu.

Přechodové jevy v RL obvodu



Obrázek 2: RL obvod

Základním obvodem pro vysvětlení přechodového jevu v RL obvodu je obvod tvořený stejnosměrným napájecím zdrojem, ke kterému jsou v sérii zapojeny tři prvky. Jedná se o rezistor, cívku a spínač. Dále se bude uvažovat to, že všechny tři prvky jsou ideální (cívku charakterizuje pouze její indukčnost L , rezistor charakterizuje pouze jeho odpor R , spínač je charakteristický svým nulovým odporem v sepnutém stavu a nekonečným odporem v rozepnutém stavu). Pro pochopení toho, jak funguje rozpojování obvodu s cívkou bude dobré rovněž definovat to, že sepnutí spínače, případně jeho rozepnutí, netrvá nekonečně krátký čas. Jedná se o

měřitelný časový okamžik, neboli derivace napětí na spínači v čase je ve všech okamžicích reálné číslo. Na tomto obvodu (i když bude zavedena drobná úprava) budou prezentovány oba přechodové jevy, které v RL obvodu mohou nastat. Tyto děje jsou sepnutí nebo rozepnutí spínače.

Sepnutí spínače



Obrázek 3: Sepnutý RL obvod

Přechodový jev, který nastane při sepnutí spínače v obvodu, se dá popsat následující rovnicí:

$$U_{IN} - u_L(t) - u_R(t) = 0 \quad (3.1)$$

Při sepnutí se cívka se brání změně proudu. Proto se na cívce naindukují napětí, které bude mít stejnou velikost, ale opačnou polaritu než vstupní napětí. Toto napětí začne klesat podle vztahu:

$$u(t) = -U_{IN} * \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (3.2)$$

Proud roste podle vztahu:

$$i(t) = I_0 * \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right) \quad (3.3)$$

kde I_0 je proud omezený rezistorem a τ je časová konstanta obvodu L/R .

Energie uložená v cívce

Většina zdrojů stejnosměrného napětí v současné době využívá konstrukci měniče nebo spínaného zdroje. Tyto zdroje využívají právě přechodových jevů v RL obvodech. Ještě před tím, než se popíše to, jak se RL obvod chová při přerušení proudu cívkou, je důležité pochopit, že v cívce se ukládá energie. Ukládání energie probíhá v podobě magnetického pole. Zdroje pracující s přechodovými jevy v RL obvodech totiž umí efektivně regulovat velikost energie dodávané na výstup. To oproti starším konstrukcím zdrojů s lineárními regulátory vede k vyšší účinnosti. Lineární regulátory nejsou schopny regulovat energii (výkon) vstupující do regulačního obvodu, a tudíž musejí velkou část energie v rámci zachování požadovaných parametrů regulace (výstupní napětí) zmařit na teplo, což vede k nižší účinnosti. Zdroje využívající přechodových jevů v RL obvodech, při konstrukci s využitím zpětné vazby, samozřejmě zvládají ze vstupu odebrat pouze tolik energie, kolik je potřeba na výstupu. Nevznikají tak zbytečné ztráty při maření přebytečné energie. Ztráty takovýchto zdrojů energie vznikají pouze při

přeměnách formy energie, nikoliv jejím mařením. Energie, která je uložena v cívce se dá vypočítat podle vztahu:

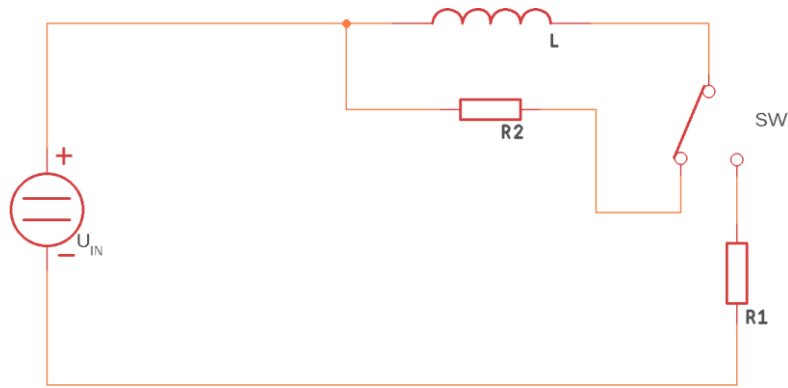
$$E_L = \frac{1}{2} * L * I^2 \quad (3.4)$$

kde L je indukčnost cívky, a I je proud procházející cívku. Jak je patrné, čím je větší proud, který teče cívku, tím je větší energie uložena v cívce. Velikost energie, která se uloží do cívky, se dá nastavit prostřednictvím velikosti proudu, který teče cívku. Většinou se pro spínání cívky používá unipolární tranzistor, který má velmi nízký odpor v sepnutém stavu ($R_{DS(on)}$), proud tekoucí cívku může být značný. Proto pro konstrukci dobrého spínaného zdroje nebo DC/DC měniče hraje velkou roli vhodná volba konstanty τ v závislosti na velikosti spínací frekvence (spínací periody). Změnou střídání spínacího signálu se dá při vhodné volbě časové konstanty τ v kombinaci se spínací frekvencí ovládat velikost proudu cívku, který prochází cívku v případě, kdy dojde k rozeznutí obvodu. Časová konstanta τ by se měla volit tak, aby sepnutým obvodem začal procházet maximální uvažovaný proud zhruba v 60-70 % uplynulého času periody spínacího signálu. Tím, že bude možné ovládat velikost proudu, který prochází cívku v době rozeznutí obvodu, bude možné ovládat velikost energie uložena v cívce, a tedy i velikost energie, která se začne přenášet na výstup zdroje. Se změnou střídání spínacího signálu se pak bude měnit i velikost energie uložena v cívce, a po odečtení ztrát při přeměně forem energie se tedy bude měnit i velikost energie dodávaná na výstup. Vzhledem k tomu, že výstupním členem je kondenzátor, který je převodníkem energie (proudu) na napětí, se pak dá prohlásit i to, že změnou střídání se dá ovládat velikost výstupního napětí. Časová konstanta τ v sobě zahrnuje jak indukčnost cívky L , tak odpor tranzistoru (většinou typu FET) $R_{DS(on)}$. Při návrhu spínaného zdroje (pak se mluví o primárním vynutí) nebo při návrhu DC/DC měniče (pak se mluví o návrhu cívky) je rovněž důležité zohlednit velikost maximálního proudu, který bude procházet indukčností.

Rozeznutí spínače

K vysvětlení rozeznutí RL obvodu je důležité popsat to, co se děje s energií, která se uloží v cívce. Zapojení, na kterém se rozpojení vysvětlí lze vidět na obrázku 4. Toto zapojení se muselo trochu upravit, aby se dalo vysvětlit, co se děje s energií uložena v cívce během rozeznutí obvodu. Spínač bude nahrazen přepínačem, který bude mít dvě polohy, mezi kterými se bude přepínat. V obvodu se nachází dva rezistory, jeden v sérii s cívku s označením R_1 , druhý rezistor R_2 bude zapojen paralelně k indukčnosti L . Pro pochopení toho, co se děje v obvodu při rozeznutí tlačítka, je důležité si uvědomit to, že rozpojení obvodu se neprovede v nekonečně krátkém čase, ale že rozeznutí obvodu trvá určitý časový okamžik, i když velmi krátký. Výchozí stav, ve kterém dochází k rozpojení, je takový, že všechno vstupní napětí je rozloženo na rezistoru R_1 . Obvodem prochází maximální možný proud I_0 ($I_0 = U_{IN}/R_1$). Napětí, které se může naindukovat na cívce v případě, kdy není zapojena paralelní větev k cívce při přepojení přepínače do druhé polohy, má velikost danou vztahem:

$$u = -L * \frac{di}{dt} \quad (3.5)$$



Obrázek 4: Rozpojený RL obvod

Tedy čím bude téct cívku o indukčnosti L vyšší proud, a čím rychleji se tento proud přeruší, tím větší napětí se na cívce indukuje (ale pouze pro případ bez použití paralelní větve, tedy kdy je cívka brána jako výstup naprázdno). Pro nekonečně krátké rozpojení by toto napětí bylo nekonečné. Napětí, které se na cívce indukuje, bude mít takový směr, že se cívka bude chovat jako zdroj energie, tedy polarita napětí bude stejná jako u zdroje vstupního napětí. Je důležité si uvědomit, že v cívce je uložená energie v podobě magnetického pole. Tato energie se musí změnit na energii elektrickou a následně na teplo, nemůže zůstat uvězněná v cívce. Proto pro případ rozpojení obvodu s cívku je důležité mít k dané indukčnosti zapojený paralelně disipativní prvek, který energii uloženou v cívce přemění na teplo. Tímto prvkem může být rezistor, stejně jako jím může být dioda nebo transil. Při navrhování disipativní větve záleží pouze na tom, jak velké množství energie se má zmařit a za jaký čas. V tomto případě je disipativním prvkem rezistor R_2 . Po přerušení proudu cívku se cívka snaží zachovat proud takové velikosti, který jí protékal. Uzavřeným obvodem s cívku L a rezistorem R_2 bude procházet proud s počáteční hodnotou I_1 , což je hodnota proudu cívku v době přepojení obvodu. Tento proud bude klesat s časovou konstantou τ_2 , danou indukčností cívky L a odporem rezistoru R_2 :

$$i(t) = I_1 * \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (3.6)$$

$$\text{kde } \tau_2 = \frac{L}{R_2}$$

Na rezistoru R_2 , a tedy i na cívce L , se objeví napětí, které bude dané vztahem:

$$u_L(t) = u_{R_2}(t) = R_2 * I_1 * \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (3.7)$$

Na rezistoru R_2 se rozloží výkon o velikosti:

$$p_{R_2}(t) = u_{R_2} * i_{R_2} = R_2 * I_1 * \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) * I_1 * \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) = R_2 * I_1^2 * \exp\left(-\frac{2 * t}{\tau_2}\right) \quad (3.8)$$

Energie, která se bude měnit na teplo, se určí podle vztahu:

$$e_D = \int_{t_1}^{t_2} R_2 * I_1^2 * \exp\left(-\frac{2 * t}{\tau_2}\right) dt \quad (3.9)$$

Usměrňovací diody, jejich parametry

Při konstruování měničů DC/DC měničů a AC/DC měničů se často používají za účelem usměrňování průběhů vysokých frekvencí usměrňovací diody. Usměrňovací diody nacházejí uplatnění i v disipativních větvích obvodů mařících energii uloženou v cívce, kde blokují průchod napájecího napětí touto větví. Používají se rovněž pro usměrňování napětí na výstupu spínaných zdrojů nebo pro uzavírání obvodů či blokování odsávání energie z výstupu DC/DC měničů. Ve všech těchto obvodech pracují s průběhy vysokých frekvencí v řádech stovek kHz. Pro správné fungování těchto obvodů je důležité to, aby diody zvládly, pokud možno, co nejrychleji přecházet z otevřeného do uzavřeného stavu. Pro to je důležitý parametr t_{rr} , který určuje, za jak dlouho zvládne dioda přejít z propustného směru do závěrného směru. Tento čas musí být velmi krátký, maximálně v řádech nanosekund. A to z toho důvodu, že periody signálů, které diody v zapojení měničů usměrňují, jsou velmi krátké, a tudíž při použití méně kvalitních součástek s velkým t_{rr} by se diody přestaly chovat jako diody. Tím by přestal fungovat princip dodávání energie na výstup, zapojení měničů by přestala být funkční. Dalším důležitým parametrem je U_{RRM} , zejména u diod, které se používají pro blokování napětí v disipativních větvích chránících primární vinutí transformátorů SMPS (flyback diode). Tento parametr je důležitý rovněž u dvoucestných usměrňovačů.

Transil

Transil je principiálně usměrňovací dioda s vysokým prahovým napětím konstruovaná za účelem krátkého přetížení vysokým výkonem (relativně vysokým výkonem vzhledem k fyzickým rozměrům pouzdra). Jedná se o součástku, která může být konstruována jako bipolární, kdy se jedná o obousměrnou diodu, která má pro oba směry stejné prahové napětí. Nebo může být vyráběna jako unipolární dioda, kdy v jednom směru se chová transil jako usměrňovací dioda s vysokým prahovým napětím, v druhém směru má vysoké závěrné napětí, mnohem vyšší než prahové. Prahové napětí se u transilů pohybuje v řádech desítek až stovek voltů. Jsou konstruované tak, aby se na nich mohl krátkodobě zmařit vysoký elektrický výkon, a to např. v rozmezí 600 W až 1500 W, pro pouzdra, která slouží pro maximální dlouhodobé výkonové zatížení 3 W [8].

Maření energie na transilu

Pokud se použije transil k maření energie, která se uložila v podobě magnetického pole v cívce, tedy zapojí se paralelně k cívce, tak je důležité respektovat konstrukci transilu. Pokud je transil unipolární, musí se zapojit tak, aby blokoval napájecí napětí cívky. Vodivým se může stát pouze pro napětí, které vznikne na cívce při přerušení proudu cívkou. V případě bipolárního transilu je důležité volit takové prahové napětí, případně antisériové zapojení s usměrňovací diodou, aby nedošlo ke zkratu indukčnosti disipativní větvi vlivem otevření transilu vysokým napájecím napětím. Dojde-li k přerušení proudu cívkou, proud začne procházet transilem, na kterém bude rozloženo prahové napětí tohoto transilu U_{BR} . Transilem bude procházet takový proud, který odpovídá proudu cívkou v době přerušení proudu I_1 . Proud bude v čase klesat podle exponencály s tím, že časová konstanta bude dána vnitřním odporem transilu R_T a vlastní indukčností cívky L :

$$i_T(t) = I_1 * \exp\left(-\frac{t}{\tau_L}\right) \quad (3.10)$$

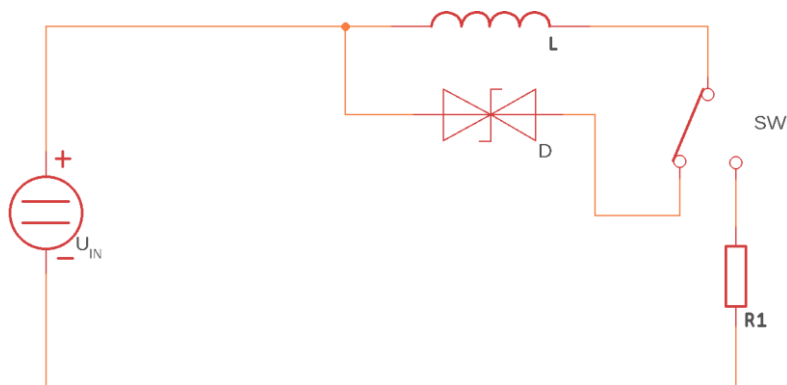
$$\text{kde } \tau_L = \frac{L}{R_T}$$

Na transilu se rozloží výkon o velikosti:

$$p_T(t) = U_{BR} * I_T = U_{BR} * I_1 * \exp\left(-\frac{t}{\tau_L}\right) \quad (3.11)$$

Energie, která se bude měnit na teplo, se určí podle vztahu:

$$e_D = \int_{t_1}^{t_2} U_{BR} * I_1 * \exp\left(-\frac{t}{\tau_L}\right) dt \quad (3.12)$$



Obrázek 5: Maření energie na transilu

Síťový transformátor

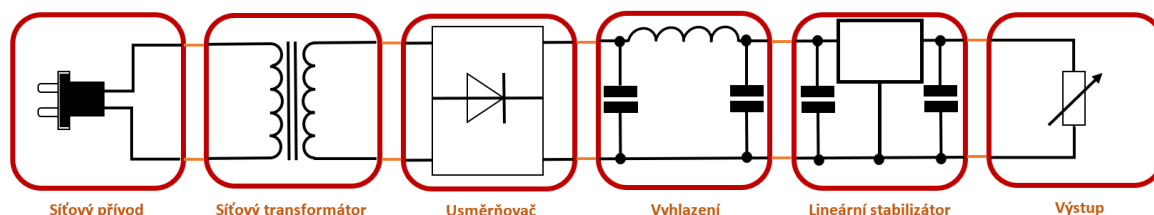
Velká řada konstrukcí zdrojů stejnosměrného napětí, stejně jako zdroje k levnějším spotřebičům, jako jsou postarší adaptéry k nabíječkám, využívají ve své konstrukci síťový transformátor. Proto by v této bakalářské práci bylo dobré věnovat pozornost rovněž síťovému transformátoru. Síťový transformátor je transformátor, který transformuje síťové fázové napětí na nižší napětí, které se dá považovat za bezpečné napětí. Toto napětí se usměrnění a stabilizuje se použitím vhodné metody regulace za účelem napájení elektroniky. Na transformátor by bylo dobré se podívat z energetické stránky, kdy transformátor slouží jako zařízení pro přeměnu forem elektrické energie. Z energetického pojetí je transformátor převodníkem forem elektrické energie, kdy energie v každém časovém okamžiku (okamžitý výkon) je na vstupu transformátoru prezentována určitým napětím a proudem a okamžitý výkon na výstupu je prezentován výstupním napětím a výstupním proudem. Poměr mezi vstupním napětím a výstupním napětím, nebo výstupním proudem a vstupním proudem je důležitým parametrem transformátoru.

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (3.13)$$

Transformátor funguje na principu toho, že primární cívka vytvoří magnetické pole. Toto pole do sebe vtáhne jádro transformátoru. Uvnitř jádra transformátoru se vytvoří magnetický tok. Tok prochází sekundárním vinutím transformátoru, ve kterém indukuje napětí. Elektrická energie se tedy na primárním vinutí nejdříve transformuje na energii uloženou v magnetickém poli, následně se z energie magnetického pole přemění zpět na energii elektrickou. Dochází tedy ke dvěma přeměnám formy energie. Při každé přeměně energie vznikají ztráty, tedy i transformátor je charakterizovaný určitými ztrátami. Ztráty vznikají jak v primárním, tak v sekundárním vinutí průchodem elektrického proudu, to z toho důvodu, že vinutí není charakteristické pouze indukčností, ale i určitým odporem. Takovéto ztráty se nazývají ztráty ve vinutí. Při vytváření

magnetického toku je potřeba změnit orientaci magnetických domén, což rovněž vyžaduje určitou energii. Tedy ztráty energie vznikají i v jádře transformátoru. Souhrnně se nazývají ztráty v železe. Patří do nich ztráty vířivými proudy, ale i ztráty při přemagnetování jader transformátorů. Proto se konstruktéři transformátorů snaží používat jádra, pokud možno, z co nejvíce magneticky měkkých materiálů, které se vyznačují tím, že mají malou plochu magnetizační smyčky. Materiály s velkou plochou magnetizační smyčky, tedy magneticky tvrdé materiály, nejsou vhodné pro konstrukci transformátorů, protože pro jejich přemagnetování je potřeba velké množství energie, což vede ke ztrátě efektivity transformace napětí. Materiály jader by měly mít co největší elektrický odpor, aby nevznikaly vířivé proudy, které jádro ohřívají. Vířivé proudy lze považovat za úniky energie přiváděné do transformátoru.

6 Zdroj s lineárním stabilizátorem



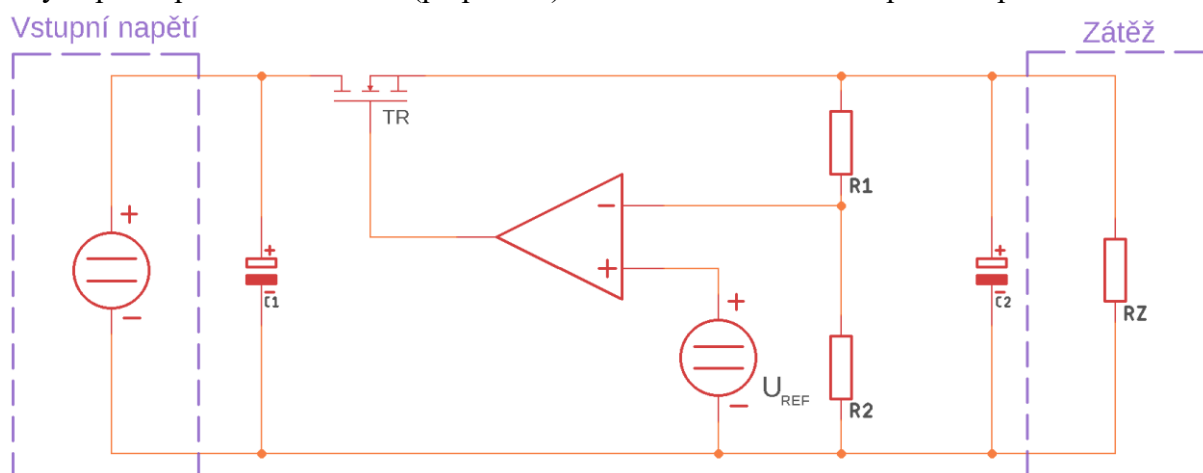
Obrázek 6: Principiální schéma zdroje s lineárním stabilizátorem

Lineární stabilizátor

Lineární stabilizátor je integrovaný obvod, který se používá za účelem stabilizace stejnosměrného napětí na konstantní hodnotu. Jedná se o koncový článek řetězce poměrně hojně rozšířeného principu vytváření stejnosměrného napětí ze síťového napětí. V řetězci je nejprve řazen síťový transformátor, jeho výstupní napětí usměrňuje usměrňovač, následuje vyhlazení tohoto napětí a jeho stabilizace. Síťový transformátor sníží maximální hodnotu střídavého napětí na hodnotu akceptovatelnou pro lineární regulátoru z hlediska rozsahu jeho vstupních napětí. Výstupní napětí transformátoru závisí na požadavku výstupního napětí zdroje. Střídavé napětí je potřeba usměrnit. Usměrnění se klasicky provádí dvoucestně, s využitím můstkového usměrňovače pro standardní typy transformátorů bez vyvedeného středu sekundárního vinutí. Dvoucestné usměrnění má tu výhodu, že obě půlvinny střídavého napětí zvládnou dodávat energii zdroji, což výrazně sníží efektivitu konstrukce, protože z transformátoru nebude téct tak velký proud (i když jen v jedné půlvině) do vyhlazovacího kondenzátoru. Vyhlašovací (nebo také stabilizační) kondenzátor se používá k vyhlazení průběhu na výstupu usměrňovače, protože výstupní napětí usměrňovače roste do maxima a klesá k nule. Takovýto průběh by nedovolil zajistit stabilní regulaci výstupního napětí, kdy stabilizace by nedostávala v potřebný čas dostatek energie k regulaci výstupního napětí, což by se projevilo zvlněním výstupu. Po usměrnění se na vyhlazovacím kondenzátoru objeví sice mírně zvlněné napětí, kdy zvlnění bude dáno proudovými odběry z výstupu. Zvlnění nebude při volbě vhodné vyhlazovací kapacity zase tak velké. Použitím vyšší vyhlazovací kapacity než je nutné, se pouze zlepší dynamické vlastnosti zapojení, zejména reakce na rychlé a velké proudové odběry. Stabilizace výstupního napětí, případně proudu, může fungovat pouze při splnění určitých podmínek, mezi něž patří udržení proudového odběru z výstupu stabilizátoru v konstrukčních mezích stabilizátoru a dostatečná velikost vstupního napětí. U lineární stabilizátorů je potřeba zaručit to, že vstupní napětí bude vždy vyšší než požadované napětí na výstupu, a to o hodnotu v rozmezí 1,25 V až 2,5 V dle konstrukčního typu stabilizátoru. Existují dva typy lineárních stabilizátorů, a to lineární

stabilizátory s možností nastavení výstupního napětí [16] a lineární stabilizátory s pevnou hodnotou výstupního napětí [17][18].

Pevné lineární stabilizátory poskytují na svém výstupu pouze napětí jedné velikosti, zatímco u lineárních regulátorů s možností nastavení výstupního napětí je možné velikost výstupního napětí v daných konstrukčních mezích nastavit. Obvody lineárních stabilizátorů pracují na principu uzavřeného regulačního obvodu (obvodu se zpětnou vazbou), kdy akčním členem je tranzistor. Regulátorem a zároveň rozdílovým členem je operační zesilovač. Hodnota požadované veličiny je zpravidla udávána Zenerovým napětím Zenerovy diody zapojené v závěrném směru (požadované napětí může být též nazývané jako referenční napětí). Na neinverující vstup operačního zesilovače se přivádí referenční napětí. Na invertující vstup se přivádí informace o velikosti napětí na výstupu stabilizátoru (samozřejmě snížena v určitém poměru, ke snížení se používají nejčastěji odporové děliče). Rozdíl těchto napětí zesílený vysokým zesílením operačního zesilovače je akční veličinou. Výstupní napětí operačního zesilovače je tedy akční veličinou, která určuje, jak a jestli se otevře tranzistor, který je regulačním členem. Tranzistor se volí zpravidla Normally-OFF, tedy používá se takový typ tranzistoru, který je při nulovém řídicím napětí uzavřen. Pokud je hodnota regulační odchylky kladná, kladné je i řídicí napětí. Akční člen je zpravidla otevřený díky vysokému zesílení operačního zesilovače. Tento akční člen je zapojen mezi vstup a výstup, na výstupu musí být proti zemi zapojen kondenzátor. Pokud dojde k tomu, že se otevře tranzistor, začne ze vstupu téct proud do výstupu, díky čemuž se začne nabíjet kondenzátor, na kterém roste napětí. V případě, kdy je napětí na výstupu nižší, než je požadovaná hodnota, regulační odchylka je kladná. Tranzistor je otevřený, ze vstupu do výstupu teče proud, který nabíjí kondenzátor, na kterém roste napětí. Pokud dojde k tomu, že výstupní napětí bude stejné, jako je požadovaná hodnota, regulační odchylka bude ideálně nulová nebo se nule bude limitně blížit. Tranzistor se nepodaří otevřít, ze vstupu do výstupu žádný proud nepoteče. Vzhledem k vysokému zesílení operačního zesilovače bude regulace fungovat ve dvoustavovém režimu (tranzistor je buď plně uzavřený nebo plně otevřený). Regulátor se nazývá lineární, protože pokud nedojde k tomu, že jeho vstupní napětí dosahuje požadované minimální hodnoty pro to, aby se podařilo dosáhnout požadovaného napětí na výstupu, tak jeho výstupní napětí roste lineárně (po přímce) v závislosti na růstu vstupního napětí.



Obrázek 7: Principiální schéma lineárního regulátoru

Zdroj napětí, který bude využívat lineární stabilizátor, bude muset mít na svém vstupu transformátor, který bude transformovat síťové napětí 230 V U_{RMS} na střídavé napětí s nižší efektivní hodnotou. Dále bude muset zdroj s lineárním stabilizátorem obsahovat blok usměrňovače a filtrace zvlnění.

Výhoda:

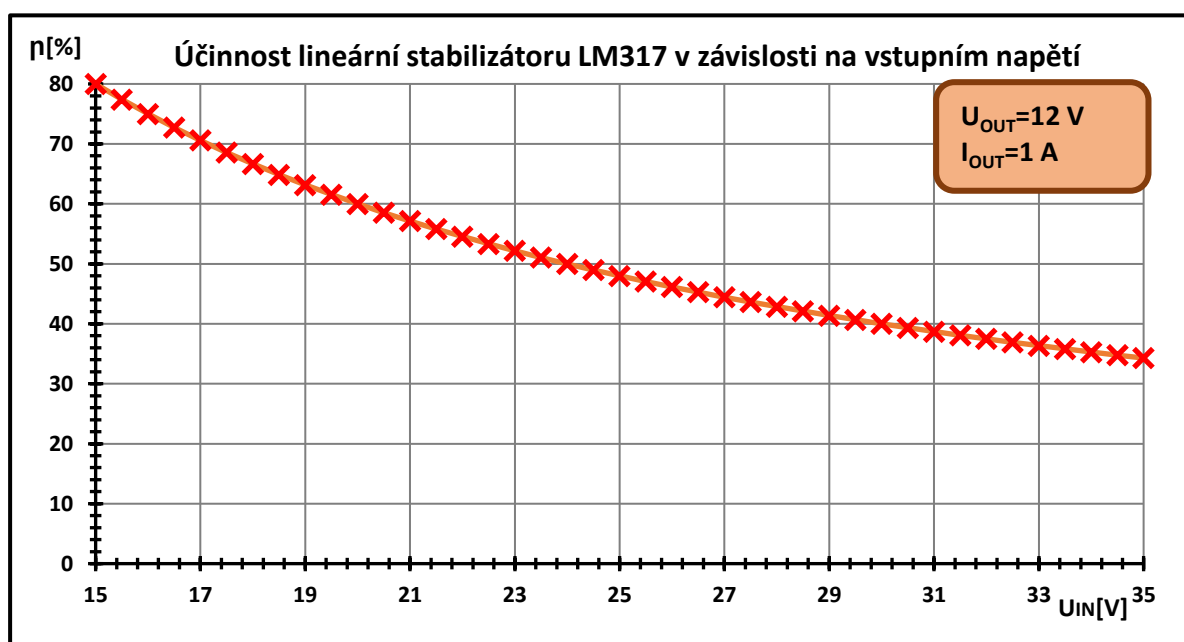
Lineární stabilizátory jsou poměrně snadno dostupné integrované obvody. Dají se koupit ve všech obchodech zabývajících se prodejem elektronických součástek. Pořizovací náklady na jejich zakoupení jsou nízké. Dají se zakoupit různé varianty, lze si vybrat ze stabilizátorů pro různá výkonová zatížení. Stabilizátory se na základě velikosti výstupního výkonu, respektive požadovaného proudového odběru na výstupu, dají pořídit buď v pouzdru TO-92 pro malé výstupní proudy do stovek miliampér nebo v pouzdru TO-220 pro proudové odběry do 2 A. Obvody lineárních stabilizátorů zvládnou pracovat v poměrně velkém rozsahu vstupního napětí. Zpravidla lze získat požadované výstupní napětí od vstupního napětí o 1,5 V vyššího, než je požadované výstupní, do velikosti vstupního napětí o hodnotě 35-40 V.

Nevýhoda:

Lineární stabilizátory nejsou moc výhodné pro případy, kdy se snižuje vstupní napětí z vysoké hodnoty na nízkou hodnotu při vyšších proudových odběrech. Na tranzistoru vzniká úbytek napětí daný rozdílem vstupního napětí a výstupního napětí, navíc tranzistorem prochází proud, který se odebírá na výstupu. To má za následek, že na obvodu lineárního stabilizátoru vzniká úbytek výkonu daný vztahem:

$$P = (U_{IN} - U_{OUT}) * I_{OUT} \quad (4.1)$$

Tento výkon se mění na teplo, které je potřeba odvádět z pouzdra stabilizátoru, aby nedošlo k jeho destrukci vlivem přehřátí. Lineární stabilizátory jsou pro stabilizaci, při které stabilizuje relativně nízké napětí z vysokého napětí, neúčinné, spousta energie se odebírá zbytečně ze vstupu a mění se na teplo. Proto je vždy výhodné celou konstrukci stejnosměrného zdroje za předpokladu využití lineárního stabilizátoru navrhnout tak, aby maximální hodnota výstupního napětí síťového transformátoru byla co nejbližší požadované hodnotě výstupního napětí (samozřejmě s rezervou na pracovní napětí lineárního stabilizátoru). V případě použití lineárního stabilizátoru s nastavitelným výstupním napětím se výstupní napětí často volí za pomoci potenciometrem zapojeného ve zpětné vazbě obvodu. Při využití ke konstrukci zdroje pro napájení

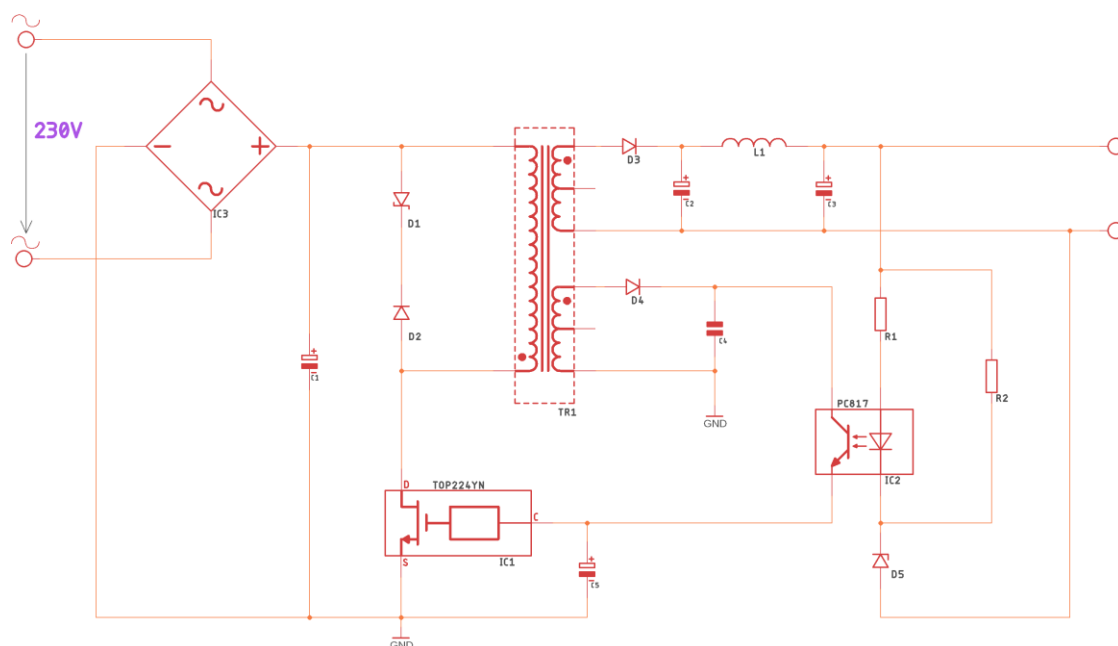


Graf 1: Závislost účinnosti stabilizátoru LM317 V závislosti na vstupním napětí

modelové železnice je důležité si uvědomit, že pro nízká výstupní napětí je účinnost regulace nízká. Navíc platí, že lineární regulátory neumí poskytovat pro jedno fyzické zapojení kladná [17] a záporná napětí [18]. Existují pouze regulátory kladných napětí nebo regulátory záporných napětí, neodpadá nutnost měnit polaritu výstupního napětí mechanickým přepínáním.

7 Využití AC/DC měniče, flyback converter

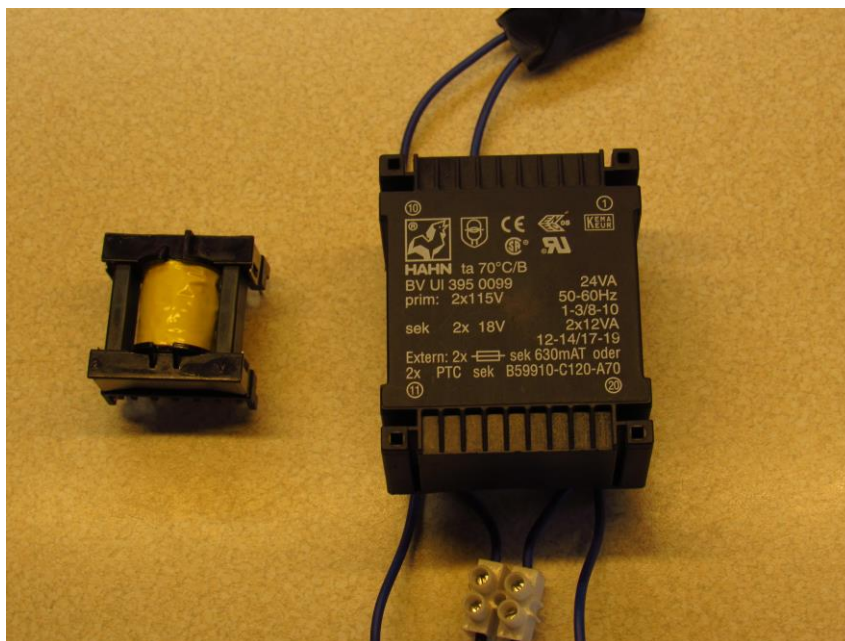
Spínaný zdroj



Obrázek 8: Flyback zapojení, spínaný zdroj, napájení AC

Spínané zdroje přinášejí oproti zdrojům využívajícím lineární stabilizátory podstatnou výhodu, a to v podobě vysoké účinnosti, kterou mohou poskytnout, pokud jsou zkonstruované správně. Spínané zdroje dokáží na rozdíl od zdrojů s lineárními stabilizátory, dávkovat efektivně energii, kterou využívají k dosažení požadovaného výstupního napětí při proudovém odběru z výstupu v konstrukčních mezích spínaného zdroje. Spínaný zdroj je možné si představit jako funkční blok, který se zapojí k síťovému napětí, jedná se tedy o AC/DC měnič, a na výstupu bude poskytovat stejnosměrné napětí požadované velikosti. Základem spínaného zdroje je SMPS transformátor, na jehož primární vinutí se přivádí stejnosměrné napětí, které vznikne usměrněním síťového napětí a následnou stabilizací. Spínaný zdroj můžeme považovat rovněž za DC/DC měnič, protože usměrňovač lze v konstrukci vynechat, a spínaný zdroj je možné napájet stejnosměrným napětím, např. z baterie. I to zapojení, které se nazývá flyback converter, může umožňovat. Spínané zdroje rozhodně nepoužívají na svém vstupu snižující síťový transformátor. Mezi primární vinutí a nulový potenciál se vkládá spínací prvek z řídicího obvodu, nejčastěji tranzistor typu MOSFET s indukovaným kanálem. V obvodu primárního vinutí transformátoru SMPS musí existovat možnost přerušit proud, proto se používají standardně Normally Off tranzistory. Spínané zdroje se hodí většinou pro generování nízkých napětí. Při vytváření nízkých napětí zvládají dodávat poměrně vysoké proudy. Konstrukce spínaného zdroje znázorněného na obrázku 8 není principiálně vhodná pro plynulou regulaci výstupního napětí.

Transformátor SMPS (Flyback Convertor)



Obrázek 9: Porovnání velikostí SMPS (65 VA) a síťového transformátoru (24 VA)

Základním stavebním prvkem zapojení flyback convertor je SMPS transformátor. Ten se v konstrukci pro SMPS liší od klasických síťových transformátorů hlavně použitými materiály pro feromagnetické jádro, fyzickými rozměry a hmotností. Klasické transformátory mají jádra konstruovaná z levných, magneticky měkkých materiálů, povětšinou z válcovaných ocelí s přísadami křemíku. Problém těchto ocelí je, že mají relativně malý elektrický odpor. To vede k tomu, že se uvnitř jader takovýchto transformátorů indukují vířivé proudy. Ty, kromě toho, že ohřívají jádro, znamenají i úbytek energie uložené do transformátoru. Závadou je to, že vířivé proudy jsou frekvenčně závislé, takže s rostoucí frekvencí roste při stejném elektrickém odporu materiálu velikost energie, která se přemění vlivem vířivých proudů na teplo. Energetická ztráta se většinou stanovuje na jednotku hmotnosti. Pro energetickou ztrátu platí vztah [20]:

$$P = \frac{\pi^2 * B^2 * d^2 * f^2}{6 * k * \rho * D} \quad (5.1)$$

kde f je frekvence změny magnetického toku jádrem, B je magnetická indukce v jádru (používá se střední hodnota), k je konstanta závislá na tvaru jádra, D je hustota materiálu jádra, d je průměr materiálu jádra, ρ je elektrický odpor materiálu jádra.

S přihlédnutím k tomu, že spínané zdroje pracují s relativně vysokými frekvencemi, aby zvládly efektivně dávkovat energii na výstup, by při použití nevhodných materiálů docházelo ke vzniku velkých ztrát energie na transformátoru. To by fakticky vedlo k tomu, že na výstup zdroje by se zvládlo dostat jen velmi malé množství energie a spínaný zdroj by byl neúčinný. Proto se ke konstrukci jader transformátorů pro spínané zdroje používají magnetické materiály s vyšším elektrickým odporem, které mají mnohem nižší ztráty vířivými proudy na vysokých frekvencích. Pro konstrukci jader transformátorů SMPS se používají většinou materiály na bázi feritu, tedy železa a uhlíku. Jádra transformátorů SMPS jsou mnohem menší (velikost ztrát závisí mimo jiné i na objemu magnetického materiálu jader), proto transformátory SMPS mají oproti klasickým síťovým transformátorům menší hmotnost [5].

Řídicí obvody pro spínané zdroje

Spínaný zdroj používá pro regulaci výstupního napětí spínání primárního vinutí transformátoru. Toto spínání se realizuje při konstantní spínací frekvenci s proměnnou dobou sepnutí. Doba sepnutí se v rámci jedné periody pohybuje mezi 0 až 70 % či 0 až 80 % jejího trvání. Za tuto dobu by se měla efektivně měnit velikost proudu procházejícího primárním vinutím v rozmezí 0 až I_M , kde I_M je maximální dosažitelná hodnota proudu obvodem při určitém odporu tranzistoru $R_{DS(on)}$ s ohledem na výkonové zatížení spínacího prvku. Díky tomu se dá efektivně měnit velikost magnetického toku jádrem transformátoru SMPS, a tudíž se dá dosáhnout i uložení vyššího objemu energie do transformátoru, přičemž při přerušení proudu obvodem dojde k tomu, že se tato energie přemístí na výstup zdroje. K tomu, aby bylo možné spínat proud primárním vinutím transformátoru SMPS, je potřeba použít spínací prvek, nejčastěji tranzistor. Ten bude typu Normally Off, tedy při nulovém řídicím napětí bude nevodivý. Naopak při přivedení kladného řídicího napětí se tranzistor otevře. Pro řízení spínaných zdrojů se používá nejčastěji tranzistor MOSFET s indukovaným kanálem typu N. Výhodou tohoto typu tranzistoru je to, že se doba jeho otevření bude odpovídat střídě spínacího signálu, který bude generovat řídicí obvod. Řídicí obvod musí být napojený na zpětnou vazbu, která je nositelem informace o velikosti výstupního napětí. Dosažení požadovaného výstupního napětí se projeví vytvořením signálu (nejčastěji sepnutí optočlenu), což vede k vytvoření napětí na řídicí elektrodě (napěťová zpětná vazba) nebo na proudu do řídicí elektrody (proudová zpětná vazba) ovládacího obvodu. V závislosti na velikosti proudu nebo napětí zpětné vazby se pak upravuje velikost střídě spínacího signálu. Je důležité zmínit, že zpětná vazba se používá s galvanickým oddělením, to z toho důvodu, aby nedocházelo k přenosu vysokonapěťových špiček ze vstupu na výstup, kde může být zapojena citlivá elektronika. Pro konstrukci spínaného zdroje může sloužit např. ovládací obvod TOP224YN [15] pocházející z rodiny obvodů TOP SWITCH druhé generace od firmy POWER INTEGRATIONS. Tento obvod není zmíněný náhodou, byl použit při testování konstrukce stejnosměrného zdroje pro regulaci výstupního napětí. Tento obvod má řízení střídě spínacího signálu řešené na základě proudové zpětné vazby. Dle velikosti proudu, který teče do řídicí elektrody CONTROL, se nastavuje střída spínacího signálu. Pro velikost proudu 6 mA a vyšší klesá střída spínacího signálu k 0 %, naopak pro proud o hodnotě 0 mA roste střída spínacího signálu k hodnotě 70 %, což je maximální střída spínacího signálu, které lze dosáhnout. Všechny hodnoty proudu v rozmezí 0 až 6 mA pak odpovídají určité střídě spínacího signálu, čím vyšší hodnota proudu, tím menší střída [5]. To, že se používá maximální hodnota střídě 70 %, je způsobené tím, že je potřeba určitý čas, během něhož se energie uložená v transformátoru SMPS převede na výstup zdroje. Zároveň se maří energie uložená v cívce primárního vinutí tak, aby mohlo dojít k dalšímu sepnutí. Je důležité si uvědomit, že řídicí obvod je schopný regulovat výstupní napětí pouze v případě, pokud dojde k správnému zapojení zpětné vazby. V situaci, kdy nebude zpětná vazba fungovat, se na výstupu spínaného zdroje objeví maximální možné napětí, které zvládne daný transformátor SMPS poskytnout. Samotný řídicí obvod v sobě má integrovanou ochranu před vysokým napětím. Ta zvládne zastavit spínání v případě problému. Obvody TOP SWITCH jsou rovněž vybaveny proudovou limitací, která zvládne reagovat na průchod vysoké proudu spínacím prvkem, což může značit problém v obvodu primárního vinutí transformátoru. Řídicí obvody z rodiny TOP SWITCH druhé generace mají v sobě implementovaný auto-restart, který se uplatní v případě, kdy není řídicí obvod ovládan zpětnou vazbou, protože se na výstupu spínaného zdroje nenachází dostatečné množství energie, tudíž ani ve zpětné vazbě není energie.

Ochrana primárního vinutí

Průchodem proudu primárním vinutím se přes transformátor přenáší energie ze vstupu na výstup. K přenosu dochází pouze tehdy, když dochází ke změně magnetického toku obvodem. Změna magnetického toku nastává tehdy, kdy se mění proud primárním vinutím. Vzhledem k tomu, že spínací tranzistor má určitý odpor mezi vývody drain a source, primární vinutí v kombinaci s tranzistorem tvoří RL obvod, ve kterém probíhá přechodový děj. Proud v takovém obvodu je rostoucí podle vztahu:

$$i(t) = I_0 * \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right) \quad (5.2)$$

Jelikož pro výstupní napětí transformátoru platí vztah:

$$u(t) = -N * \frac{d\Phi}{dt} \quad (5.3)$$

změna proudu, od které se odvíjí změna magnetického toku, je kladná, objeví se na výstupu transformátoru SMPS záporné napětí. Toto napětí má opačný směr proti uvažovanému směru výstupního napětí zdroje. Z toho důvodu je na sekundárním vinutí provedeno oddělení za pomoci rychlé usměrňovací diody, které má za úkol zamezení odčerpávání energie z výstupu zpět přes sekundární vinutí (které se chová jako zkrat pro stejnosměrné napětí) zpět na vstup. Brání rovněž tomu, aby dané záporné napětí začalo odčerpávat energii z výstupu. Naopak v případě, kdy dojde k přerušení proudu primárním vinutím, bude změna proudu záporná, tudíž bude záporná i změna magnetického toku. Na výstupu se objeví záporné napětí. Tak, jak probíhá růst proudu primárním vinutím, se v tomto vinutí ukládá energie v podobě magnetického pole. Dojde-li k přerušení proudu obvodem, dochází k tomu, že se daná energie snaží uvolnit, což vede ke vzniku napětí na primárním vinutí. Toto napětí je nebezpečné pro spínací tranzistor i transformátor samotný. Proto se paralelně k primárnímu vinutí zapojuje antisériová kombinace diody a transilu s tím, že dioda se zapojuje v závěrném směru vůči vstupnímu napětí spínaného zdroje. Jedná se o to, co bylo výše popsáno jako disipativní větve. Je to větev, která maří energii uloženou v podobě magnetického pole na teplo s přeměnou na energii elektrickou. Dojde-li k rozepnutí proudu obvodem primárního vinutí, tak se na primárním vinutím objeví napětí takové polarity, že otevře diodu. Přes tuto diodu a transil, k jehož otevření v závěrném směru dojde, začne téct proud. Tím se uzavře obvod, kterým začne proudit energie uložená v primárním vinutí. To, že se v zapojení použije transil, má pozitivní účinek na dobu, během níž se energie začne měnit v teplo. Nevýhodou polovodičové diody je to, že nezvládne zmařit na teplo dostatečné množství energie za jednotku času. Zvládne sice zabránit vzniku vysokého napětí na primárním vinutí, ale nezvládne energii přeměnit na teplo. Ta zůstane v obvodu uzavřená. Při následujícím sepnutí primárního obvodu pak tato zbytková energie výrazně omezí možnost regulace množství energie přenášené transformátorem.

Usměrnění signálu na sekundárním vinutí

Jak již bylo řečeno, dioda na sekundárním vinutí transformátoru má za úkol zabránit tomu, aby se záporné napětí připojilo na výstup zdroje, kde se nachází stabilizace za pomoci kondenzátorů. To by mělo nežádoucí účinek v podobě jejich vybíjení a poklesu výstupního napětí. Pro případy, kdy sekundárním vinutí je bez napětí, se toto vinutí chová jako zkrat pro výstup, tudíž by se přes něj odčerpávala výstupní energie. Díky tomu, že se provede toto usměrnění, během sepnutí spínacího tranzistoru nedochází ke ztrátám energie na sekundárním

vinutí. Energie se přemístí do transformátoru (bude kumulovaná prostřednictvím magnetického toku v jádře), nicméně nezvládne se přeměnit na energii elektrickou. Aby toto usměrnění mělo smysl, musí být dioda použita k usměrnění rychlá. Dioda, aby byla vhodná k použití pro usměrnění průběhu napětí na sekundárním vinutí SMPS transformátoru, musí mít nízký čas závěrného zotavení t_{rr} . PN přechodu polovodičové diody trvá určitý čas, než se polarizuje z propustného směru do závěrného směru. V případě, kdy je tento čas již relativně velký v poměru k době trvání periody, dioda ztrácí usměrňovací účinky. Vzhledem k tomu, že spínané zdroje pracují v řádech stovek kHz, je dobré, aby čas závěrného zotavení byl v řádech jednotek až desítek nanosekund. U spínaného zdroje se v zapojení flyback používá jednocestné usměrnění.

Zpětná vazba

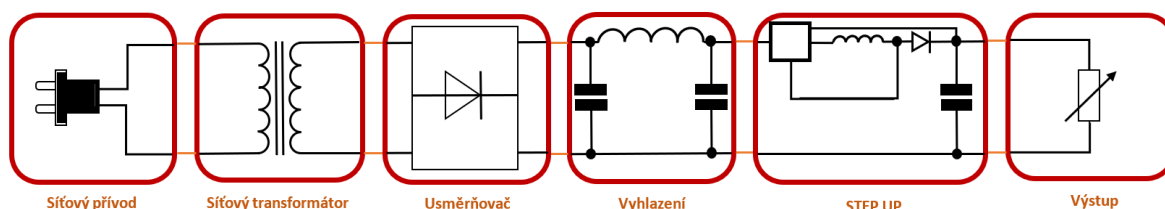
Vzhledem k tomu, že na výstup spínaného zdroje se zapojuje citlivá elektronika, je zapotřebí zajistit to, aby se na jeho výstup nemohly dostat žádné špičky vysokého napětí, které by mohly elektroniku poškodit. Proto se zpětná vazba, která má vliv na regulaci výstupního napětí, používá s galvanickým oddělením. Ke galvanickému oddělení se používá optočlen, nejčastěji s fototranzistorem na výstupu. Zpětná vazba může být realizovaná jako napěťová nebo proudová. Nejčastěji se však používá proudová zpětná vazba. Pro spínaný zdroj, jehož řídicí obvod využívá proudovou zpětnou vazbu, platí rovněž, že se galvanicky oddělí výstup od vstupu, i když se energie pro zpětnou vazbu odebírá z druhého pomocného výstupu. Zpětná vazba se navrhuje tak, aby docházelo k tomu, že se střída spínacího signálu omezí pouze v případě, kdy dojde k nárůstu výstupního napětí nad povolenou mez. Proto se zapojuje budič řídicího proudu (proudu řídicí elektrody) tak, že se do série s LED optočlenu zapojuje Zenerova dioda v závěrném směru. V sérii s LED je pak ještě na výstup zdroje zapojen rezistor, který má za úkol omezit proud obvodem tak, aby nedocházelo k výkonovému přetížení LED při otevření Zenerovy diody. Pokud výstupní napětí dosáhne takové hodnoty, že bude dostatečně velké, aby otevřelo Zenerovu diodu v závěrném směru a zároveň zvládlo splnit i tu podmínku, že je dostatečně velké pro to, aby na LED v pouzdře optočlenu bylo dostatečně velké napětí k tomu, aby začala svítit (vyšší než prahové). Dojde k sepnutí fototranzistoru na výstupu optočlenu, čímž se propojí obvod mezi druhým sekundárním vinutím transformátoru SMPS a řídicí elektrodou obvodu pro ovládání spínaného zdroje. Transformátor SMPS má většinou konstrukčně dvě rovnocenná sekundární vinutí, která nejsou galvanicky spojena. Druhé sekundární vinutí se používá právě pro zpětnou vazbu. K druhému sekundárnímu vinutí se stejně jako v případě prvního sekundárního vinutí připojí rychlá usměrňovací dioda. Za ní se připojí stabilizační kondenzátor, který slouží k uchování energie. Výstup druhého zdroje napětí se pak spojí přes fototranzistor v optočlenu s řídicí elektrodou obvodu. Dojde-li k tomu, že výstupní napětí spínaného zdroje přesáhne požadovanou velikost (otevře se Zenerova dioda, je překročeno prahové napětí LED v optočlenu), fototranzistor sepne a spojí druhý výstup s řídicí elektrodou obvodu, díky čemuž začne téct do řídicí elektrody proud. Řídicí obvod reaguje snížením střídavého signálu, zmenší se množství energie odesílané na výstup spínaného zdroje. Tím se sníží i velikost výstupního napětí při určitém proudovém odběru. Poklesne-li napětí na výstupu pod požadovanou hodnotu, proud do řídicí elektrody přestane téct. Na toto reaguje řídicí obvod zvýšením spínací střídavé, tedy začne dodávat na výstup větší množství energie.

8 Napájecí zdroj s využitím DC/DC měniče

DC/DC měniče

Měníčů napětí existuje velká řada konstrukcí. Existují měniče s převodem z napětí střídavého na střídavé napětí (AC/AC converters), měniče s převodem střídavého napětí na napětí stejnosměrné (AC/DC converters), měniče s převodem stejnosměrného napětí na stejnosměrné napětí (DC/DC converters). Byly zkonstruovány měniče s převodem stejnosměrného napětí na napětí střídavé (DC/AC converters). Tato kapitola bakalářské práce se bude zabývat měniči, které mění napětí ze stejnosměrného na stejnosměrné, tedy rodinou DC/DC converters. Tato rodina se dá dále rozdělit z pohledu poměru vstupního napětí a výstupního napětí poskytovaného měničem na zvyšující měniče (boost converters nebo také STEP UP) a snižující měniče (buck converters nebo také STEP DOWN). Nicméně měnič nemusí být nutně konstruován tak, že bude vstupní napětí pouze zvyšovat nebo bude pouze snižovat. Měníče můžou fungovat jak v režimu boost, tak i v režimu buck, měnič může mít interně přepínatelnou konfiguraci. Základním stavebním kamenem každého měniče je pasivní prvek, který v sobě může kumulovat energii, a to buď v podobě magnetického pole (cívka) nebo v podobě elektrického náboje (kondenzátor). Mnoho konstrukcí kombinuje oba tyto pasivní prvky, kdy kondenzátor se řadí na výstup měniče, na kterém je potřeba uchovávat dávkovanou energii ze vstupu. DC/DC měniče fungují jako spínané měniče ve většině případů, kdy se využívá elektronického spínacího prvku, nejčastěji unipolárního tranzistoru MOSFET, k přerušování proudu cívkou. Cívka se používá jako převodník proudu na napětí, kdy dochází k periodickému spínání cívky (spínání proudu cívkou). To, po jakou dobu se nechá téct proud cívkou, má vliv na to, jaká energie se do ní zvládne uložit v podobě magnetického pole. Tato energie se následně při přerušení proudu cívkou přemění na energii elektrickou, která se začne přemisťovat z cívky do kondenzátoru na výstupu, na kterém se začne měnit na napětí (spojení cívky s kondenzátorem se chová po krátký čas jako spojení proudového zdroje, jehož poskytovaný proud klesá, a kondenzátoru). Pro správné fungování měniče je důležité zajistit správně fungující zpětnou vazbu, která má za úkol reagovat na proměnné proudové odběry tak, že mění střídu spínacího signálu pro tranzistor. Spínací signál pro tranzistor má konstantní frekvenci v řádech stovek kHz, mění se pouze střída spínacího signálu v závislosti na tom, jestli je potřeba zvýšit výstupní napětí nebo snížit výstupní napětí. Střída se nemění v plném rozsahu 0 až 100 %. Je důležité si uvědomit, že je nutné přerušit proud cívkou (pokud nedojde k přerušení, přenos energie ze vstupu na výstup se neuskuteční), navíc je nutné energii akumulovanou v cívce přemístit do kondenzátoru na výstupu.

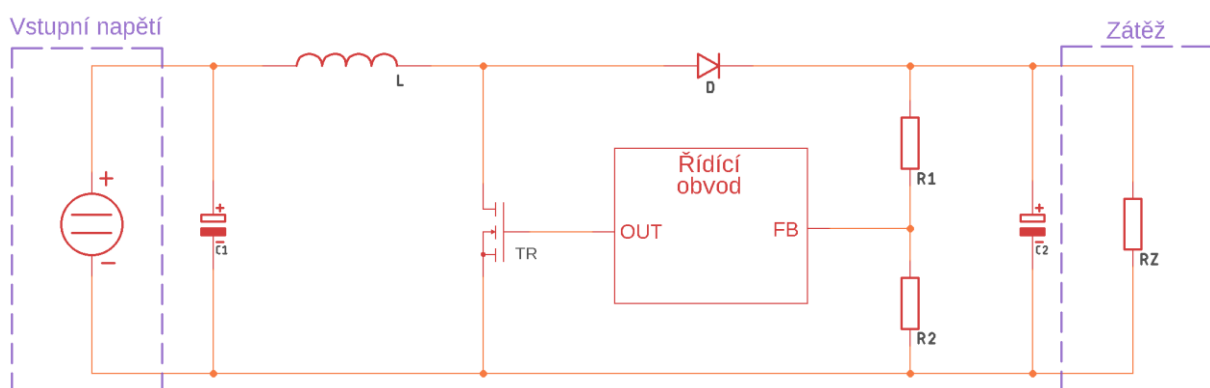
STEP UP měnič (boost converter)



Obrázek 10: Blokové schéma zdroje využívajícího STEP UP měniče

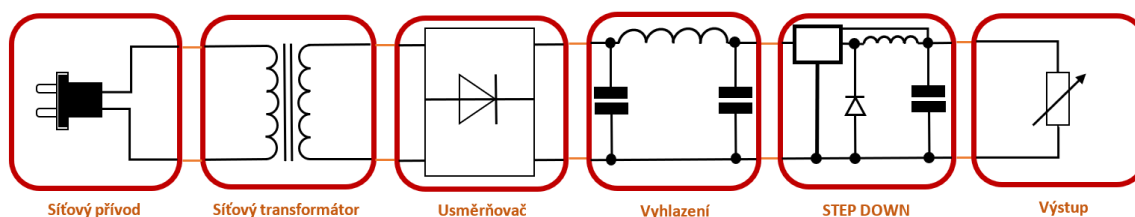
Jedná se o měnič, který zvyšuje vstupní napětí. Tedy tento typ měniče je konstruovaný tak, že na výstupu vytváří vyšší napětí, než je vstupní napětí. Na základě této vlastnosti je potřeba zajistit to, že při požadavku na konkrétní výstupní napětí bude vstupní napětí nižší než

požadované výstupní napětí. Měníč STEP UP je konstruován tak, že v podélné větvi má v sérii s výstupním kondenzátorem zapojenou cívku. Mezi cívku a kondenzátor je ještě vložena rychlá usměrňovací dioda, která má za úkol oddělit vstup od výstupu v případě, kdy dojde k sepnutí tranzistoru. Rychlá spínací dioda je zapojena v propustném směru vzhledem ke vstupnímu napětí. Tranzistor se zapojuje do příčné větve mezi cívku a diodu, spojuje vstup přes cívku se zemí. Na základě požadavku toho, aby bylo možné přerušit proud cívku, je použit tranzistor typu Normally Off. Tedy tranzistor, který je při nulovém řídicím napětí zavřený. Standardně se používá tranzistor MOSFET s indukovaným kanálem N. Kondenzátor na výstupu má za úkol převádět elektrický proud na napětí, slouží k akumulaci energie na výstupu. Rovněž má pozitivní vliv na stabilizaci výstupního napětí. Když dojde k sepnutí tranzistoru, tak se na cívce objeví skokově napětí stejné velikosti, jako je vstupní napětí, polarita tohoto napětí bude však opačná. Napětí na cívce začne exponenciálně klesat, proud cívku začne růst. V cívce se začne ukládat energie v podobě magnetického pole. Dobu sepnutí je důležité omezit vzhledem k indukčnosti cívky a odporu tranzistoru v sepnutém stavu tak, aby nedošlo ke zkratu mezi vstupním napětím a zemí (obvod pro řízení STEP UP měničů mají tuto funkci v sobě integrovanou). Sepnutím dojde k akumulaci energie v cívce. Poté, co se tranzistor rozeptne, se cívka bude snažit zachovat proud, který jí procházel (cívka se bude bránit změně). Na cívce se objeví napětí, které bude mít stejnou polaritu jako vstupní napětí. Obě napětí se k sobě přičtou a začnou nabíjet kondenzátor. Jak se energie z cívky začne měnit na elektrický proud, klesá napětí na cívce, a to podle exponenciály. V určitý okamžik dojde k tomu, že se kondenzátor přestane nabíjet, protože napětí na něm bude vyšší než vstupní napětí. Jak již bylo zmíněno, dioda má za úkol oddělit výstup při sepnutí od vstupu. Dojde-li k sepnutí tranzistoru, tak se připojí cívka k nulovému potenciálu. Kdyby nebyla do cesty vložena dioda, která je zapojená z pohledu cesty proudu z kondenzátoru zpět do vstupu v závěrném směru, tak by se energie z výstupu vracela zpět do vstupu. Zvýšit napětí by se nepodařilo. Navíc by sepnutí tranzistoru znamenalo i odvod energie z výstupu, což by znamenalo pokles výstupního napětí. STEP UP měnič, jako každý zdroj napětí se stabilizací, potřebuje pro svoji činnost zdroj referenčního napětí, jehož velikost se porovnává s napětím převedeným z výstupu za pomoci zpětné vazby. Na základě jejich rozdílu se pak upravuje střída spínacího signálu tak, aby výstupní napětí odpovídalo požadované hodnotě [19].



Obrázek 11: Principiální schéma STEP UP měniče

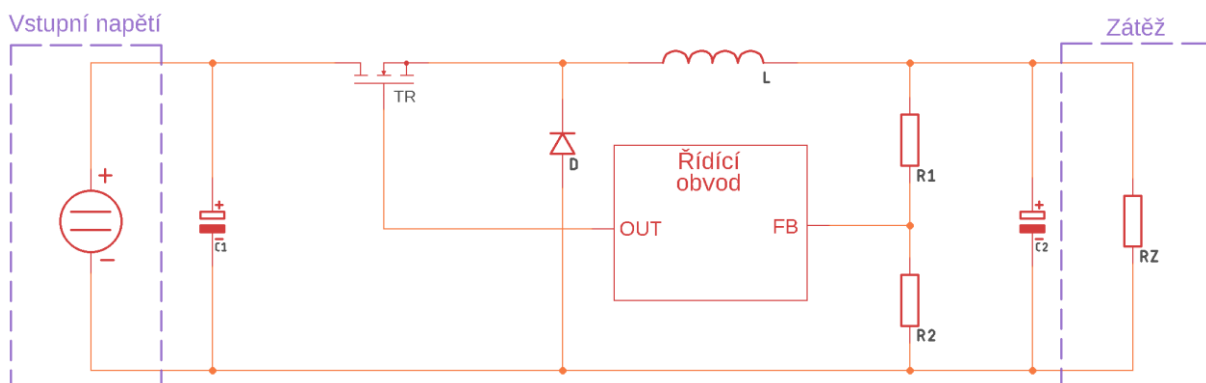
STEP DOWN měnič (buck converter)



Obrázek 12: Blokové schéma zdroje využívajícího STEP DOWN měnič

Tento typ měniče se používá ke snižování vstupního napětí. Principiálně má na svém vstupu vyšší napětí než na svém výstupu. Aby mohl STEP DOWN měnič poskytnout na svém výstupu požadované napětí, tak vstupní napětí musí být o něco vyšší, než je požadovaná hodnota výstupního napětí. STEP DOWN měnič je svojí konstrukcí zdánlivě podobný STEP UP měniči, podstatný rozdíl je ale v tom, že spínací prvek se nachází v podélné větvi. Spínacím prvkem bývá ve většině případů Normally Off tranzistor, nejčastěji typu MOSFET s indukovaným kanálem typu N. Tranzistor je doplněn o řídicí obvod, který se stará o generování spínacího PWM signálu s proměnnou velikostí střidy závislé na rozdílu požadovaného výstupního napětí a skutečného výstupního napětí. Pokud dojde k rozepnutí spínacího prvku, vstup se galvanicky odpojí od výstupu. Naopak v případě STEP UP měniče dochází k tomu, že vstup je neustále galvanicky spojen s výstupem. Ke vstupnímu napětí se přičítá napětí indukované na cívce, STEP DOWN má výstupní napětí dané pouze napětím indukovaným na cívce. V příčné větvi je tentokrát zapojena dioda, a to tak, že je vzhledem ke vstupnímu napětí zapojena v závěrném směru. Zapojení doplňuje samozřejmě kondenzátor, který je zapojen paralelně k výstupu, jeho úkolem je uchovávat energii dodávanou na výstup. Kondenzátor na výstupu slouží rovněž jako stabilizační prvek, který snižuje zvlnění napětí na výstupu. Na výstupním kondenzátoru se elektrický proud převádí na napětí, kondenzátor tedy v zapojení plní roli převodníku proudu na napětí. V případě, kdy dojde k sepnutí spínacího prvku, začne cívkou protékat proud, který teče na výstup, do zátěže. Proud cívkou nezačne růst okamžitě, růst je exponenciální, záleží na indukčnosti cívky a odporu spínacího prvku. Tak, jak roste proud cívkou, roste energie uložená v cívce. Při sepnutí proudu cívkou se na cívce objeví napětí stejné velikosti, ale opačné polarity, než je vstupní napětí. Toto napětí klesá, jak roste proud cívkou. Ve vhodný okamžik dochází k přerušení proudu cívkou, čímž se v cívce indukuje napětí, jehož polarita je shodná s polaritou výstupního napětí. Spínací prvek rozpojil obvod, proto vstupní napětí je odpojené, k výstupu se připojí cívka přes diodu, která se pro danou polaritu napětí stane propustnou, dioda uzavře obvod. Energie uložená v cívce v podobě magnetického pole se začne měnit na elektrický proud, který bude téct do kondenzátoru na výstupu, který se bude nabíjet. Velikost výstupního napětí bude závislá na velikosti střidy spínacího signálu a velikosti proudového odběru z výstupu. Měnič musí být konstruován tak, aby byl schopný dodávat na výstup dostatečné množství energie za jednotku času, aby se zvládlo na výstupu udržet konstantní napětí při daném proudovém odběru. Pokud bude proudový odběr mimo uvažované konstrukční meze měniče, měnič nebude schopný na svém výstupu udržet požadované výstupní napětí. Střída spínacího signálu za předpokladu, že časová konstanta obvodu je navržena vzhledem k spínací frekvenci tak, aby maximální proud cívkou začal procházet ideálně až v čase odpovídajícímu 70 % až 80 % periody spínacího signálu, určuje velikost energie, která se uloží v cívce. Určuje i velikost výstupního napětí. Opět platí, že střída spínacího signálu nesmí překročit určitou mez, která má i v tomto případě hodnotu 70 % - 80 % periody, protože je nutné rovněž zajistit to, aby se energie uložená v cívce přesunula do kondenzátoru. K regulaci výstupního napětí se

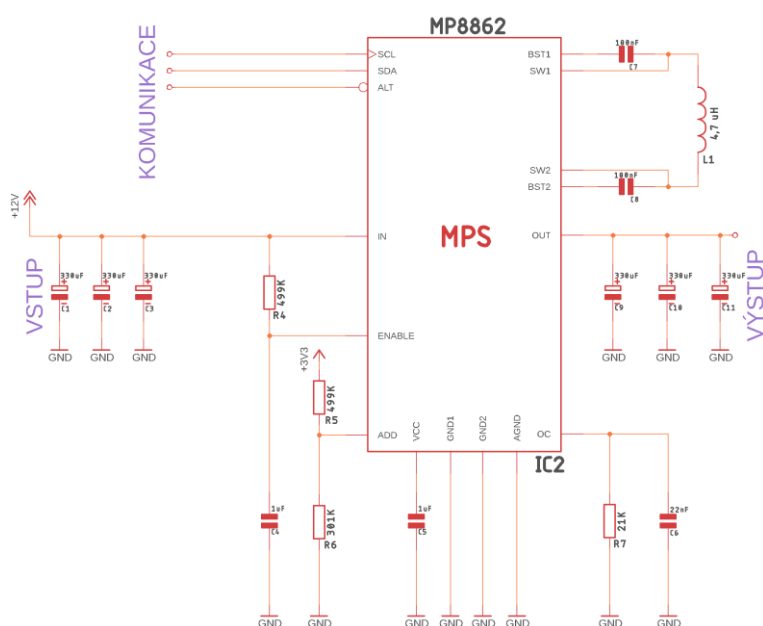
používá samozřejmě zpětná vazba, která do řídicího obvodu pro spínací tranzistor přináší informaci o velikosti výstupního napětí. Samotný měnič napětí má vlastní zdroj referenčního napětí, které slouží k výpočtu odchylky regulačního procesu, která se do regulačního obvodu promítne v podobě velikosti středy spínacího signálu [14].



Obrázek 13: Principiální zapojení STEP DOWN měniče

9 Měnič MP8862

Integrovaný obvod MP8862 v sobě kombinuje funkci STEP UP měniče a STEP DOWN měniče, vstupní napětí může jak zvyšovat, tak snižovat. To, jestli se měnič chová jako STEP UP nebo jako STEP DOWN, závisí pouze na jeho interní konfiguraci, kterou si obvod sám přepíná podle potřeby. To je výhodné oproti ostatním řídicím obvodům pro konstrukci měničů. Ty často dovolují konstrukci pouze jednoho typu měniče, buď STEP UP měniče, nebo STEP DOWN měniče. Případně existují obvody, které umožňují obě konstrukce, ale nelze mezi těmito konstrukcemi přepínat, fyzická zapojení pasivních součástek k řídicím obvodům jsou velmi rozdílná. Integrovaný obvod MP8862 navíc nabízí výhodu oproti ostatním typům obvodů pro řízení DC/DC měničů, a to tu, že je programovatelný. Tento obvod umožňuje nastavení výstupního napětí měniče v rozmezí 1 až 20,47 V s citlivostí 10 mV, kdy nastavení probíhá za pomoci rozhraní I2C. Na vstup měniče je možné přivést stejnosměrné napětí v rozmezí velikosti 2,8 V až 22 V. Neplatí, že pro libovolné napětí na vstupu zvládne měnič poskytnout na



Obrázek 14: Zapojení měniče MP8862

výstupu požadované napětí. Je důležité brát v potaz volbu indukčnosti jeho induktoru a mnoho jiných parametrů jako např. proudový odběr na výstupu. Obecně platí, že ve STEP DOWN režimu nejsou problémy. Méně vyhovující to bývá ve STEP UP režimu, kde na svém výstupu zvládne měnič poskytovat napětí asi jen o 4 V vyšší, než je vstupní napětí při použití induktoru osazovaného na demonstrační kit [10].

10 Programovatelné obvody použité k vlastní konstrukci

Mikrokontrolér Atmega 328P

Integrovaný obvod Atmega 328P, který byl použit ke konstrukci řídicí jednotky, je světově nejznámější mikrokontrolér z rodiny mikrokontrolérů AVR. Mikrokontroléry AVR, které v současné době vyrábí firma Microchip, jsou 8bitové mikrokontroléry harvardské architektury. Tato architektura je charakteristická tím, že má oddělenou paměť dat od paměti programu. Jedná se o výpočetní zařízení, které má pouze jednu aritmeticko-logickou jednotku, proto může vykonávat pouze jeden příkaz v daný časový okamžik. Atmega 328P může být taktována hodinovým signálem s frekvencí až 20 MHz, a to v případě použití externího krystalového rezonátoru. Většinou se používá interní krystalový rezonátor, který má taktovací frekvenci 8 MHz. Mikrokontrolér je vybaven řadou periférií, které mohou obsluhovat jeho jednotlivé fyzické vývody. Periferie jsou samostatné hardwarové jednotky nezávislé na činnosti aritmeticko-logické jednotky. Přičemž aritmeticko-logická jednotka může s perifériemi komunikovat na základě interní sběrnice, může číst jejich interní obsah a může je konfigurovat. Některé periferie pomáhají řídit chod programu, šetří výpočetní kapacitu mikrokontroléru (čítače/časovače, které umožňují časování výpočetních úloh). Jiné se používají pro komunikaci s ostatními zařízeními (USART0, SPI, TWI), další periferie umožňují rozšířit možnosti mikrokontroléru o obsluhu dalších zařízení (A/D převodník). Všechny periferie mají v paměti dat vstupně-výstupní registry, za pomoci nichž se dají tyto periferie konfigurovat, navíc za pomoci některých z těchto registrů poskytují periferie informace o své činnosti.

Sériová linka (USART)

Rozhraní USART je komunikační rozhraní, které se používá pro komunikaci mezi dvěma zařízeními na krátkou vzdálenost. Jedná se o sériové rozhraní, tedy data se přenášejí bit po bitu na jedné datové lince. Rozhraní používá dvě datové linky, kdy jedna datové linka slouží pro komunikaci v jednom směru, tedy k přenosu dat od zařízení 1 do zařízení 2. Druhá linka se používá pro komunikaci opačným směrem, tedy od zařízení 2 do zařízení 1. Přenos dat může být realizován jako synchronní nebo jako asynchronní. V případě synchronní komunikace se k datovým linkám přidává linka s hodinovým signálem, která řídí synchronizaci komunikace, tedy přístup jednotlivých bitů na datovou linku. Hodinová linka bývá ovládána jedním zařízením, které přebírá roli master zařízení, druhé zařízení musí akceptovat ovládání přes hodinovou linku. Nazývá se proto slave. Synchronní komunikace je však velmi nepraktická z hlediska toho, že není možné zařídit obsluhu asynchronních jevů, jako je například událost přerušování slave zařízení. Slave zařízení, které může být nějaký periferní obvod, například A/D převodník, potřebuje zahájit odesílání dat v určitý okamžik, kdy dokončilo nějakou akci. Nemůže čekat na to, až bude chtít master inicializovat komunikaci. Proto se častěji používá asynchronní způsob komunikace. Při daném způsobu komunikace je důležité konfigurovat obě zařízení tak, aby měla stejnou komunikační rychlost, stejnou délku přenášených dat, případně využívala stejnou paritní kontrolu a při komunikaci se používal stejný počet STOP bitů. Obě zařízení mají interní

časovače, které řídí přístup jednotlivých přenášených bitů na datovou linku. Komunikace se zahájí tak, že se odešle START bit, pak se začnou odesílat datové bity. Zpravidla mají přenášená data délku 8 bitů. Poté, co se odešlou data, se odešle paritní kontrola a STOP bit (případně dva STOP bity). STOP bit se odešle tak, že se ponechá datová linka ve vysoké logické úrovni delší dobu. Vysoká logická úroveň je klidová logická úroveň na datové lince, proto START bit znamená přivedení datové linky do nízké logické úrovně. Je důležité zajistit správné elektrické zapojení tohoto rozhraní. Tedy vysílač Rx jednoho zařízení musí být spojen s přijímačem Tx druhého zařízení, v druhé datové lince platí to samé. Při fyzické realizaci nesmí dojít ke spojení dvou vysílačů a dvou přijímačů, v takovém případě komunikace nebude fungovat. Spojuje se vždy vysílač a přijímač.

Periferie USART0 u mikrokontroléru Atmega 328P

Mikrokontrolér Atmega 328P umožňuje komunikaci po rozhraní USART. Ke komunikaci po daném rozhraní slouží periferie USART0. Tato periferie se skládá ze dvou částí, a to vysílače a přijímače. Komunikace je založena na tom, že vysílač i přijímač komunikují stejnou komunikační rychlostí, využívají stejnou délku přenášených dat, stejnou paritní kontrolu i stejný počet bitů. Periferie má v paměti dat pracovní registry, které slouží ke konfiguraci jejího chování, jeden registr slouží pro odesílání a přijímání dat. Registr má symbolický název UDR0 a je spojen s vyrovnávací pamětí vysílače a přijímače. Jak vysílač, tak přijímač rozhraní USART0 má dvoubytovou vyrovnávací paměť. V případě, kdy se zapisuje do registru UDR0, se odesílají data vysílači. V případě, kdy se čte z registru UDR0, se čtou data z vyrovnávací paměti přijímače. Při obsluze jak vysílače, tak přijímače je důležité ohlídat, aby nedocházelo k přepisování dat ve vyrovnávací paměti. Aby k tomu nedocházelo, je potřeba vyhodnocovat příznakové bity událostí přijetí dat do vyrovnávací paměti přijímače, odeslání dat z vysílače a uvolnění bytu ve vyrovnávací paměti přijímače. Dané příznakové bity, jejichž nastavení do logické jedničky nastane v případě uskutečnění hlídané události, hrají velkou roli v systému přerušování. Příznakové bity se nacházejí v registru se symbolickým názvem UCSR0A, bit se symbolickým názvem RXC0 slouží k indikaci toho, že došlo k přijetí dat do vyrovnávací paměti přijímače. Naopak příznakový bit se symbolickým názvem TXC0 slouží k identifikaci toho, že došlo k odeslání bytu z vyrovnávací paměti vysílače. Bit se symbolickým názvem UDRE0, který se nachází rovněž v registru UCSR0A, nese informaci o tom, že byl uvolněn byte ve vyrovnávací paměti vysílače. Další důležitý bit v registru UCSR0A je bit se symbolickým názvem U2X0, který slouží k nastavení dvojnásobné rychlosti komunikace. Ostatní bity v registru se symbolickým názvem UCSR0A slouží k signalizaci detekce některé z chyb při přenosu dat, mezi dané chyby patří například chyba parity atd. Pracovní registr se symbolickým názvem UCSR0B slouží k povolení činnosti vysílače i přijímače rozhraní USART0. Je možné, aby komunikace po daném rozhraní fungovala pouze v jednom směru. Tedy periferie se dá konfigurovat tak, aby fungoval buď jen přijímač, nebo jen vysílač. Pracovat mohou samozřejmě oba zároveň. Pokud je potřeba, aby fungoval vysílač, je důležité nastavit bit se symbolickým názvem TXEN0 v registru UCSR0B. V případě, kdy je nutné povolit činnost přijímače, je potřeba nastavit bit RXEN0 v registru se stejným symbolickým názvem. K tomu, aby bylo využití výpočetního výkonu a konstrukce programu efektivní a rovněž aby nedocházelo k přepisování přenášených dat, je dobré využít systém přerušování pro danou událost. Samotný příznakový bit není schopný zajistit přesměrování vykonávání programu do podprogramu přerušování, kde proběhne relevantní akce. O to se zvládně postarat až vektor přerušování. Aby přerušování fungovalo, musí být v programu zaveden vektor přerušování, rovněž musí být přerušování povoleno globálně stejně tak, jako musí být povoleno lokálně pro danou událost. Přerušování při přijetí dat do

vyrovnávací paměti přijímače se lokálně povolí tak, že se povolí bit se symbolickým názvem RXCIE0 v registru UCSR0B. Naopak pokud je potřeba lokálně povolit přerušeni v okamžicích, kdy došlo k odeslání dat po rozhraní USART0, je vhodné nastavit bit se symbolickým názvem TXCIE0 v registru UCSR0B. Pro případy, kdy je potřeba lokálně povolit přerušeni v situacích, kdy dojde k uvolnění bytu ve vyrovnávací paměti vysílače, je dobré nastavit bit UDRIE0 v registru UCSR0B. Dalšími důležitým pracovním registrem této periferie je registr se symbolickým názvem UCSR0C, ve kterém se nastavuje délka přenášených dat, parita, počet stop bitů, režim fungování periferie i to, jestli komunikace probíhá na vzestupnou nebo sestupnou hranu hodinového signálu. K nastavení režimu fungování periferie USART0, tedy k nastavení toho, jestli bude periferie fungovat v synchronním režimu nebo asynchronním režimu, slouží bity se symbolickým názvem UMSEL00 a UMSEL01 v registru se UCSR0C. Pro konfiguraci toho, jestli bude USART0 využívat paritní kontrolu, případně jestli bude paritní kontrola sudá nebo lichá, slouží bity se symbolickým názvem UPM00 a UPM01 taktéž v registru se symbolickým názvem UCSR0C. Bit se symbolickým názvem UCSBS slouží k nastavení počtu STOP bitů, pokud je vynulovaný, periferie využívá jeden STOP bit. V případě, že se nachází v logické jedničce, periferie využívá dva STOP bity. Bit UCSZ02, který je v registru se symbolickým názvem UCSR0B, a bity UCSZ01 a UCSZ00 v registru UCSR0C, slouží k nastavení délky přenášených dat. Bit UCPOLO, rovněž z registru UCSR0C, slouží ke konfiguraci toho, jestli se data odesílají na vzestupnou nebo sestupnou hranu hodinového signálu [9].

Rozhraní TWI (I2C)

Rozhraní TWI svojí konstrukcí odpovídá světově známému rozhraní I²C, které však nese ochranou známkou. Proto firma Atmel do svých mikrokontrolérů integrovala kopii tohoto rozhraní pod názvem TWI (Two Wire Interface). Toto rozhraní, stejně jako rozhraní I²C, dovoluje komunikaci jednoho master zařízení s více slave zařízeními. Master zařízení může být v rámci sběrnice při splnění specifických podmínek i více. Komunikace je sériová, ke komunikaci se používá jeden datový kanál, který je obousměrný a jedna linka s řídicím hodinovým signálem. Datová linka nese označení SDA, linka hodinového signálu nese označení SCL (SCK je případně obecná hodinová linka). Oba kanály mají klidovou logickou úroveň v podobě logické jedničky. Tu drží na obou linkách PULL UP rezistory, tedy rezistory připojené mezi linku a kladné napájecí napětí dle napěťové úrovně. Řídicí hodinový signál generuje master zařízení. Master zařízení může komunikovat s více slave zařízeními na základě toho, že každé slave zařízení má svoji specifickou 7bitovou adresu. Pod slave zařízením je možné si představit nějaký senzor, A/D převodník, měnič napětí nebo mikrokontrolér. Většina slave zařízení má možnost využívat různé slave adresy na základě nastavení logických úrovní na vývodech k tomu určených, eventuálně se slave adresa nastavuje analogově (MP8862), nebo se prodávají různé verze jednoho integrovaného obvodu s rozdílnými slave adresami. Možnost volby slave adresy se volí z toho důvodu, aby nedocházelo ke kolizím při konstrukci složitějších sítí, ve kterých se mohou vyskytovat integrované obvody, které mají možnost volby shodných slave adres. Komunikaci inicializuje master zařízení, které má na starost odeslání START bitu, kdy se logická úroveň na vývodu SDA přivede na logickou nulu, když je signál na vývodu SCK ve vysoké logické úrovni. Následně se začne odesílat slave adresa zařízení, s kterým chce master navázat komunikaci. Jako první se začíná odesílat nejvyšší bit slave adresy, poslední bit je R/\overline{W} . Ke změně logické úrovně na lince SDA může dojít pouze v případě, pokud je na lince SCL nízká logická úroveň. Slave zařízení poslouchá celou dobu komunikaci na SDA lince. To z důvodu, že musí vědět, v jakém fázi se komunikace nachází, aby nedošlo k záměně přenášených dat jinému slave obvodu s vlastní slave adresou s požadavkem o zápis nebo čtení. Většinou je

klíčovou událostí odeslání STOP bitu nebo opakované odeslání STAR bitu, které se používá v případě, kdy slave zařízení nebylo zkontaktováno.

Periferie TWI u mikrokontroléru Atmega 328P

Periferie TWI je u mikrokontroléru Atmega 328P (obecně u mikrokontrolérů z rodiny AVR) konstruována jako stavový automat, který informaci o tom, v jaké stavu se nachází, uchovává jako unikátní číslo v registru TWSR. Stavem se rozumí bod, do kterého se dostala komunikace (odeslání START sekvence, odeslání slave adresy s požadavkem zápisu, přijetí dat od slave zařízení atd.). Mikrokontrolér Atmega 328P může být konfigurován jako slave zařízení nebo jako master zařízení. V případě použití mikrokontroléru jako slave zařízení je potřeba konfigurovat jeho slave adresu v TWAR registru. Pokud je mikrokontrolér provozován v master režimu, tak to znamená pouze to, že sám zahájí komunikaci odesláním START sekvence. Odesílání START sekvence, STOP sekvence, povolení činnosti periferie i povolení přerušení se provádí v registru TWCR. Zařízení na rozhraní TWI musí mít konfigurovanou komunikační rychlost, ta se nastavuje v registru TWBR a částečně i v registru TWSR, kde se nastavuje předdělička hodinového signálu. Hodinový signál na lince SCL generuje master zařízení, jeho konfigurace definuje komunikační rychlost na celé sběrnici, ta by měla být volena s ohledem na maximální komunikační rychlost nejpomalejšího zařízení [9].

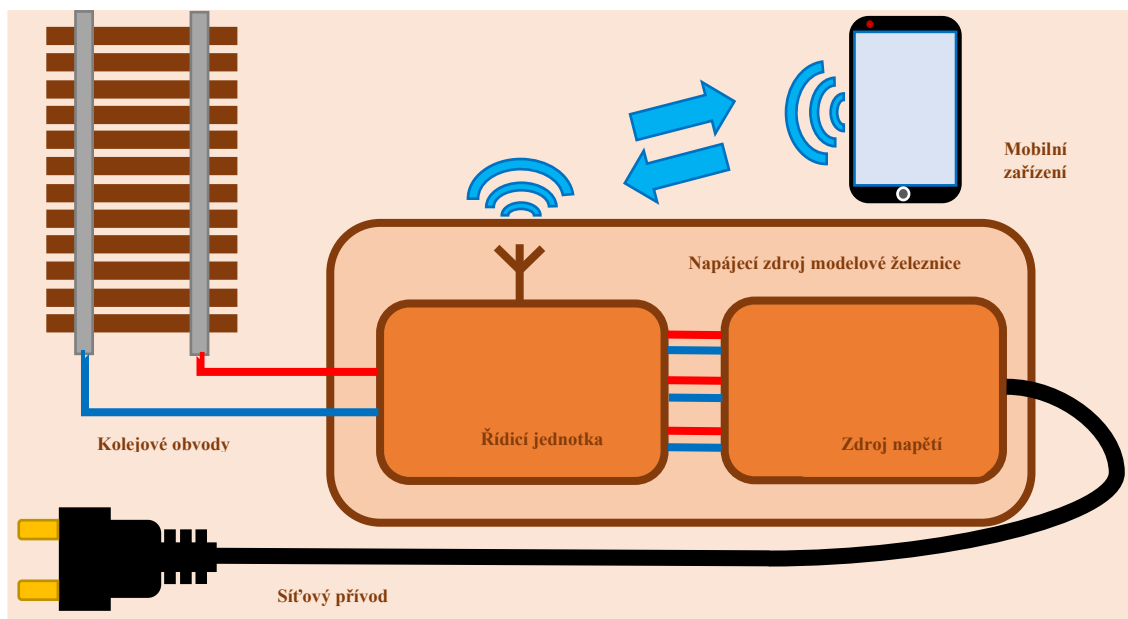
Praktická část

11 Zapojení zdroje

Myšlenka konstrukce

Zdroj byl konstruován tak, aby zvládl sloučit výhody analogového a digitálního ovládání. Danými výhodami se myslí relativně nízká cena ovládání a možnost ovládat bezdrátově. Zapojení zdroje bylo navrženo jako síťový zdroj, tedy jako zdroj, který využívá síťové napájení napětím o hodnotě 230 V s frekvencí 50 Hz. Samotný zdroj lze rozdělit na dvě části, a to na zdroj napětí pro řídicí jednotku a řídicí jednotku samotnou. Řídicí jednotka se stará o regulaci výstupního napětí, zdroj napětí vytváří napětí potřebná pro regulaci. Schéma zapojení zdroje napětí lze vidět v příloze A.1. Zdroj napětí pro řídicí jednotku tvoří síťový snižovací transformátor, usměrňovač a tři STEP DOWN měniče s řídicími obvody LM2576-ADJ [14]. Transformátor použitý ke konstrukci zdroje zvládne dodávat výkon až 44 VA. Má dvě sekundární vynutí, která se musejí paralelně spojit, aby se jejich výkon sečetl. Tento transformátor byl zvolen z toho důvodu, aby zdroj zvládl dodávat dostatečný výkon i pro maximální odběr z výstupu zdroje o hodnotě 2 A při napětí 12 V. Zároveň se musel zajistit dostatečný výkon pro napájení zbývajících částí zapojení (relé, modul HC-05 pro komunikaci, LED atd.). Každý ze STEP DOWN měničů generuje jedno z napětí potřebných pro činnost řídicí jednotky. Měnič je sestaven připojením pasivních součástek k řídicímu obvodu. Zapojení je konstruované tak, aby každý měnič měl vysokou vstupní a výstupní kapacitu. Tím se zaručí to, že zvládnou pokrýt špičkové odběry při rozjezdech těžkých vlaků či jízdách po úsecích, které nemají dobré vodivostní vlastnosti. V takových případech dochází k toku velkých proudů po krátké okamžiky. Generují se napětí 3,3 V, 5 V a 12 V. Napětí 3,3 V slouží pro napájení mikrokontroléru Atmega 328P a řídicí části měniče MP8862. Měnič MP8862 je konstruován tak, že po I2C komunikuje za pomoci 3,3 V logiky. Pokud by se použilo napětí 5 V pro napájení mikrokontroléru, bylo by

nutné použít napěťové převodníky mezi logikami. Ty nejsou vhodné pro sběrnici I2C, protože nejsou obousměrné (datová linka musí umožnit přenášení dat od master zařízení do slave zařízení a od slave zařízení do master zařízení). Proto je efektivnější napájet mikrokontrolér napětím 3,3 V a nepoužívat převodníky. Napětí 5 V nemůže být v zapojení vynecháno, protože toto napětí se používá k napájení modulu HC-05. Tento modul, sloužící ke komunikaci mezi mikrokontrolérem a mobilním zařízením, sice komunikuje na 3,3 V logice, ale napájení potřebuje o hodnotě 5 V. Napětí 12 V se používá jako vstupní napětí pro měnič MP8862, který díky tomu může pracovat ve STEP DOWN režimu. To je výhodou, protože měnič zvládne poskytovat vyšší napětí i při značných proudových odběrech. Napájení 12 V se používá i pro napájení cívek relé.



Obrázek 15: Blokové schéma myšlenky aplikace zdroje

Samotná řídicí jednotka má schéma znázorněné v příloze A.2. O regulaci výstupního napětí se stará měnič MP8862 ovládaný přes I2C sběrnici mikrokontrolérem Atmega 328P. Ten je pomocí sériové linky spojen s modulem HC-05, který se stará o komunikaci po Bluetooth s mobilním zařízením. Na sběrnici I2C jsou rovněž zapojeny A/D převodníky ADS1110, kdy každý A/D převodník má jinou adresu slave. Tyto převodníky se prodávají ve více variantách, kdy všechny varianty mají společné fyzické rozložení vývodů, každá varianta má ale jinou slave adresu. Na desce se nachází rovněž integrované obvody LM258, které mají na starost měření napětí a proudu odebíraného z výstupu zdroje. Každý takovýto obvod obsahuje 2 operační zesilovače.

Realizace fyzického zapojení

Fyzické zapojení zdroje pro napájení modelové železnice je realizované na dvou plošných spojích. Zdroj napětí pro řídicí jednotku se nachází na jedné desce plošného spoje, řídicí jednotka se nachází na druhé desce plošného spoje. Fyzická realizace je provedena tak, aby bylo možné v případě závady na výkonové části výkonovou elektroniku vyměnit. Rovněž je zajištěno to, že napětí 230 V se nepřivádí přímo na desku s elektronikou, která je spojena s kolejovými obvody. Plošný spoj zdroje pro řídicí jednotku byl nakreslen jako jednovrstvá deska pro THT montáž součástek, v případě plošného spoje řídicí jednotky se použil dvouvrstvý plošný spoj umožňující jak THT montáž, tak SMT montáž. K řídicí jednotce se dají připojit

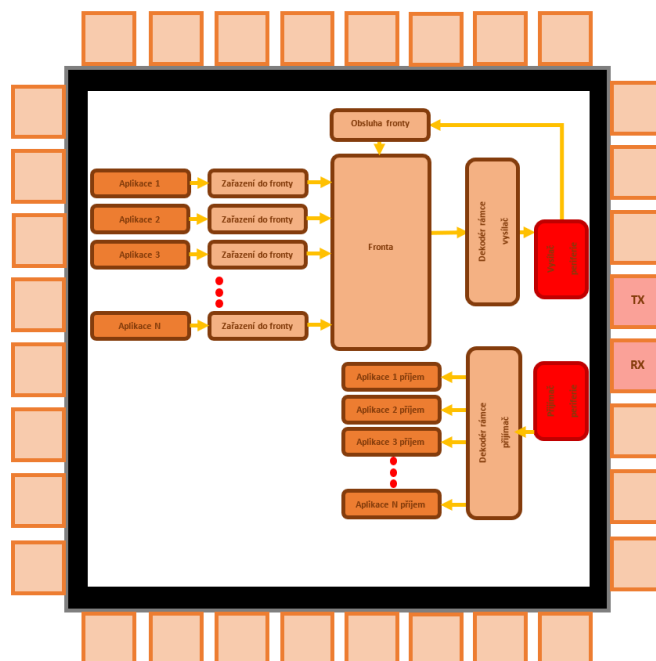
indikační LED a potenciometr za pomoci vodičů. Desky plošného spoje jsou k nahlédnutí v příloze B.

Změna směru jízdy

Změna směru jízdy je realizována změnou polarity výstupního napětí měniče MP8862 za pomoci dvou SPDT relé. Relé mají realizovanou ochranu cívky pomocí flyback diody, která brání vzniku vysokých napětí při rozpínání. Spínání probíhá za pomoci tranzistorů BC547, aby došlo k napěťovému oddělení 3,3voltage logiky a 12voltage logiky. Změna směru jízdy je realizována výše zmíněným způsobem, protože měnič neumí poskytovat záporné napětí.

12 Komunikační protokol bezdrátového ovládání

Komunikaci, která byla vytvořena, je možné rozdělit do více vrstev dle jejich funkce tak, jak popisují referenční modely jako např. ISO/OSI nebo TCP/IP. Tato komunikace však



Obrázek 16: Realizace obsluhy komunikace po duplexním rozhraní

nekopíruje přesně ani jeden z těchto zmíněných modelů, které se používají při popisu komunikačních sítí a struktur. Informace jsou vedeny full-duplexně celým vedením, komunikace je mezi mobilním zařízením a modulem HC-05 vedena za pomoci rozhraní Bluetooth, modul HC-05 komunikuje s řídicí jednotkou napájecího zdroje prezentovanou mikrokontrolérem Atmega 328P za pomoci rozhraní USART v asynchronním režimu. Linková vrstva mezi mobilním zařízením a modulem HC-05 je tedy Bluetooth, linková vrstva mezi mikrokontrolérem a modulem HC-05 je USART. Samotná linková vrstva se stará o přenos dat vhodnou obsluhou fyzické vrstvy, při konstrukci zdroje se využila fungující linková vrstva v podobě periférií a integrovaných rozhraní v použitých integrovaných obvodech. Periferie se sami starají o obsluhu fyzické vrstvy na základě znalosti protokolu linkové vrstvy daného rozhraní, tuto část nebylo nutné programovat. Důležité bylo ale správné nakonfigurování komunikace (délka přenášených dat, paritní kontrola, komunikační rychlost) mezi modulem HC-05 a mobilním zařízením. Zmíněné parametry u obou zařízení musejí být shodné, jinak komunikace nebude fungovat. Konfigurace modulu HC-05 probíhá za pomoci AT příkazů v příkazovém AT režimu [11].

Za účelem rozlišení toho, jaká data se přenášejí (jaký je jejich význam), jsou používány datové rámce, jejichž struktura byla vytvořena speciálně pro tuto aplikaci. Transportní vrstva, která je řešena vhodnou obsluhou vysílačů a přijímačů daných periférií, které se starají o obsluhu linkové vrstvy, má za úkol zajistit přiřazení správných dat jednotlivým aplikacím. Síťovou vrstvu je možné v tomto pojetí komunikace vynechat, protože se jedná o komunikaci mezi dvěma zařízeními. Není nutné tedy rozlišovat, jakému adresátovi jsou data určena. Periodické odesílání dat z mobilního zařízení do zdroje, stejně jako pravidelné odesílání kontrolního rámce za účelem ověření průchodnosti komunikace a toho, jestli komunikace nezkresluje, se dá nazvat aplikačními úlohami, které fungují v dané komunikaci, lze je tedy zahrnout do aplikační vrstvy. Mezi nejdůležitější činnosti aplikační vrstvy patří přenos informací o velikosti výstupního napětí zdroje, ale i jeho polaritě. Důležité jsou i bezpečnostní aplikační úlohy, které mají za úkol testovat funkčnost transportní vrstvy, tedy to, jestli je transportní vrstva průchozí a jestli nedochází ke zkreslování přenášených dat. Jednotlivé aplikační úlohy soupeří o místo v transportní vrstvě prostřednictvím zápisu do front vysílačů. Tyto fronty zvládly optimalizovat komunikaci tak, že jednotlivé aplikace komunikace mohou odesílat datové rámce nezávisle na jiných aplikacích bez rizika vzniku mísení datových rámců nebo zapomenutí odeslání datového rámce při čekání na dokončení odeslání předchozího rámce. Systém soutěžení o přístup do transportní vrstvy byl použit z důvodu možnosti jednoduššího rozšíření počtu aplikačních úloh fungujících na dané konstrukci komunikace do budoucna.

Komunikační protokol, tak jak byl sestaven, byl navržen pro práci s komunikačním médiem, které má fyzickou vrstvu sestavenou tak, že umožňuje duplexní komunikaci mezi dvěma zařízeními. Těmi jsou v tomto případě mobilní zařízení a zdroj napětí. Komunikační protokol postrádá síťovou vrstvu, není nutné řešit směrování, komunikují dvě zařízení mezi sebou. Data, která se posílají, nemusejí mít specifikovaného adresáta. Základním problémem fungování komunikace bylo vyřešení toho, jak zařídit, že každé zařízení bude mít více aplikací, které zvládnou rovnocenně přistupovat k přenosovému médiu, které je v tomto případě sériové rozhraní (UART). Přístupem k přenosovému médiu se myslí přístup k vysílači rozhraní UART. Vysílač rozhraní UART má tu vlastnost, že se jedná většinou o nezávislou periférii, která se obecně vyznačuje tím, že nezvládá odesílat data tak rychle, jak by jí zvládla aritmeticko-logická jednotka zařízení posílat. Rozhraní UART musí poslat 8 bitů, což je poměrně velké množství, a i při značných komunikačních rychlostech hrozí, že vysílač nebude stíhat zpracovávat data, která mu budou předávána k odesílání. Částečným řešením tohoto problému je to, že vysílač je vybaven vyrovnávací pamětí typu FIFO, která zvládne zachytit velké množství bytů, které se mají odeslat. Pokud dojde nahromadění dat během komunikačních špiček (např. odeslání několika 10bytových datových rámců), tak data zůstanou uložena ve vyrovnávací paměti, ze které je vysílač postupně zpracuje. Problémem je to že paměť je ve fyzické podobě poměrně drahá věc, a integrovat ji do periferie jakéhokoliv mikrokontroléru znamená často použití velmi malých pamětí (2-64 bytů). To pro datový provoz více aplikací při délce datových rámců 10-16 bytů znamená, že vyrovnávací paměť nebude kapacitou stačit. Pak hrozí přepsání a ztráta dat, stejně jako znehodnocení přenášených rámců. Vyrovnávací paměť se musí vytvořit virtuální (fyzicky se data ukládají do paměti dat) s tím, že je důležité zajistit mechanismus odesílání dat z této virtuální paměti do vyrovnávací paměti vysílače rozhraní UART (která je u mikrokontroléru Atmega 328P pouze dvoubytová).

Datové rámce

Pro správné fungování komunikace bylo důležité vyřešit, jak se budou předávat informace mezi jednotlivými aplikacemi. Bylo nutné použít adresování datových rámců, i takový

formát, který by vzhledem k principu realizace vysílače zaručil, že se rámce od sebe zvládnou identifikovat. Nakonec byl zvolen formát, který má tři adresní byty, které slouží k detekci aplikace, pro kterou se data přenášejí. Adresní byty jsou odděleny oddělovači v podobě prázdných bytů (bytů s obsahem 0), po adresní části následuje odeslání dat (pokud v adresní části není kódován samotný příkaz, který se má vykonat v případě, kdy příkaz nepotřebuje data), ukončení rámce je provedeno za pomoci dvou prázdných bytů. Takovýmto ukončením se zaručí, že přenášená data s okolními oddělovači nevytvoří falešný adresní byte, který by v kombinaci s ostatními byty vyhodnotila posuvná řada jako rámec.

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
0	Adresa 1	0	Adresa 1	0	Adresa 1	0	data	0	0
oddělovač	adresa	oddělovač	adresa	oddělovač	adresa	oddělovač	data	konec rámce	

Obrázek 17: Struktura datového rámce komunikace

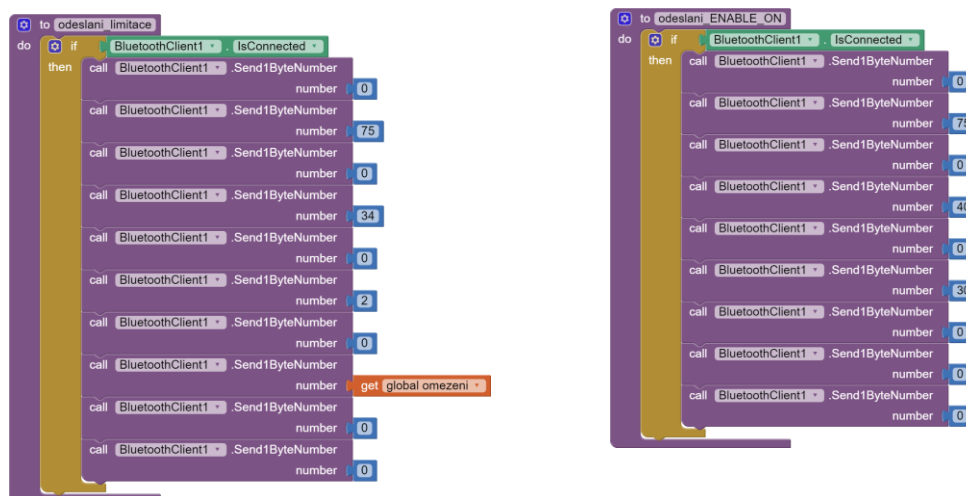
Dekodér vysílače

O to, jak přistupují data k samotné periférii vysílače rozhraní UART, se stará dekodér (virtuální). Ten má na starost dekódovat, jaká data se mají odesílat. Na základě toho zvolit obsah adresních bytů v datovém rámci a zařadit do přenášených dat informace požadovaného významu uložené v paměti dat. A to vše tak, aby bylo dodrženo pořadí rámce daného konstrukčního typu. Dekodér zároveň řeší, jak data přistupují k vysílači s ohledem na jeho kapacitu vyrovnávací paměti. Je důležité hlídat, aby nedošlo k přepisování dat ve vyrovnávací paměti. Dekodér blokuje přístup k vysílači a frontu s požadavky o vysílání, tudíž dokud vysílá dekodér rámec, tak nemůže dojít paralelně ke spuštění vysílání dalšího rámce z daného zařízení.

Fronta

Za pomoci fronty se řeší, jak může přistupovat více aplikací k vysílači. Ke křížení vysílání jednotlivých aplikací u jednojádrového mikropočítače, jako je mikrokontrolér Atmega 328P, sice nemůže dojít, problémem je omezená vyrovnávací paměť vysílače. Proto pro přístup k vysílači byla použita fronta, která se ale nechová jako klasická fronta datového typu FIFO. Jedná se v podstatě o pole 10 hodnot (fronta má deset pozic, pro dané použití to stačí, v případě používání více aplikací by bylo možné počet pozic zvětšit), kdy hodnota uložená v každé buňce tohoto pole značí nějaký datový rámec, který se má odeslat. Datový rámec je specifický unikátním číslem, které prezentuje význam datového rámce. Na základě tohoto unikátního čísla přiřadí dekodér hodnotu adresním bytům a do bytů, které slouží k přenosu dat, unikátní hodnoty proměnných, které značí přenášenou veličinu (informaci). Unikátní číslo může být jakékoliv číslo, jen ne nula. Nula značí, že je daná pozice ve frontě volná (neobsazená). Fronta se obsluhuje za pomoci mechanismu procházení od začátku do konce. Pokud se na pozici najde požadavek o odeslání nějakého rámce, požadavek se předá dekodéru vysílače, který zároveň zablokuje předání dalšího požadavku a posun v prohledávání fronty. Poté, co je rámec vysunutý, se odblokuje posun ve frontě a dochází k posunu na další pozici, která se prozkoumá, případně se zahájí vysílání. Takto se fronta prochází od první do poslední pozice. Když se dojde na poslední

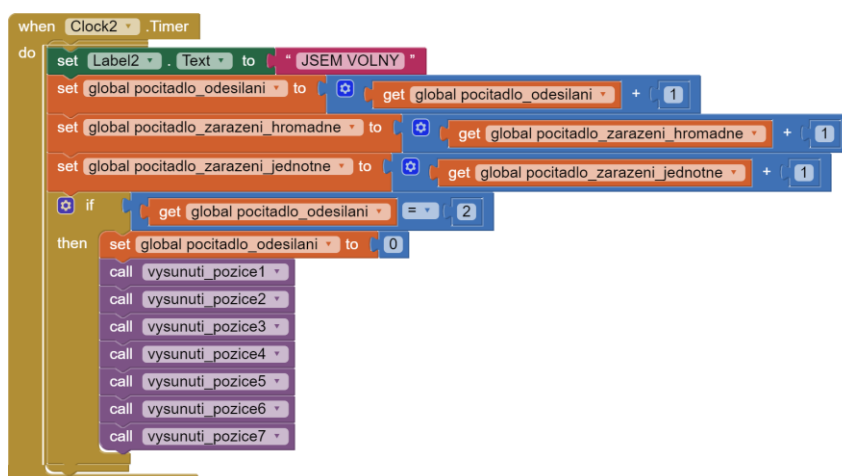
pozici, tak se začne prohledávat opět od první pozice. Poté, co se pozice vysune, unikátní číslo uložené v pozici se přepíše na nulu.



Obrázek 18: Části programu odesílající datové rámce v mobilní aplikaci

Řazení do fronty

Každá aplikace, která je v zařízení provozována, má za úkol posílat komunikačním kanálem data různého významu. Aplikace musí požadavek o odesílání dat nejprve zařadit do fronty. Data mají vždy specifický význam, prezentují určitou veličinu, mají unikátní kombinaci adresních bytů v datovém rámci. Řazení do fronty má zaručit, že pokud dojde k požadavku odesílání od dvou aplikací těsně po sobě, tak nedojde k ztrátě odesílaných dat vlivem toho, že vysílač bude zaneprázdněný (vysílač se bere jako pomalá periferie s malou vyrovnávací pamětí). Zařazení do fronty smí proběhnout pouze jednou, není možné, aby aplikace ve frontě obsadila dvě nebo více pozic. Proto je důležité zablokovat řazení v tom případě, kdy už k jednomu zařazení došlo. K blokování dochází za pomoci pomocné proměnné. Fronta se prochází od první pozice do poslední pozice s tím, že se hledá první pozice, která obsahuje nulu. Když obsahuje nulu, vloží se na její místo unikátní číslo prezentující datový rámec, který se má odeslat.



Obrázek 19: Vysouvání fronty vysílače mobilní aplikace



Obrázek 20: Bloky řadičí datové rámce do fronty vysílače v mobilní aplikaci

Dekodér přijímače

Přijímač má úplně stejný problém jako vysílač, u sériového rozhraní má obecně malou vyrovnávací paměť. To znamená, že je důležité zajistit, aby se přijímač zvládl obsluhovat co nejrychleji, protože dle velikosti vyrovnávací paměti se po příchodu několika rámců vyrovnávací paměť okamžitě zaplní. Proto je důležité přijatá data rychle z vyrovnávací paměti vyzvedávat. Bez vyprázdnění by hrozilo přepsání a jejich ztráta, stejně jako znehodnocení celého datového rámce. Samotný dekodér přijímače musí být realizovaný tak, aby zvládal rychle vyzvedávat data z vyrovnávací paměti přijímače. Musí zároveň umět vyhodnotit, o jaký datový rámec se jedná, a data poslat příslušné aplikaci (vložit pro příslušné proměnné prezentující hodnotu nějaké veličiny). Vzhledem k tomu, že se data posílají s rámci, které mohou mít hodnotu 9 nebo 10 bytů, je důležité zajistit virtuální frontu příjmu dat, ve které se byty budou uchovávat. Fronta má opět deset pozic s tím, že poté, co se přijme jeden byte do vyrovnávací paměti přijímače, se fronta posune o pozici dopředu a na její poslední místo se vloží přijatý byte. Pak se provádí určení toho, jaký význam má rámec, který byl přijat.

Zabezpečení kompatibility aplikace a zdroje

Vzhledem k budoucím plánům ve využití modulu HC-05 i pro další aplikace, které budou běžet v těsné blízkosti napájecího zdroje, je důležité zajistit, že nedojde k tomu, že se aplikace připojí k zařízení, které není možné danou aplikací ovládat. Jelikož je v plánu vzniklý komunikační protokol dále využívat i v jiných úlohách, ve kterých se budou lišit aplikační úlohy, je možné, že některé datové rámce, které budou prezentovat určité příkazy, se objeví v konstrukci i jiných zařízení. Ta zařízení, se kterými bude možné komunikovat právě po rozhraní Bluetooth při využití modulu HC-05, se pokaždé objeví v nabídce připojení v mobilní aplikaci. Aby se zamezilo nestandardnímu chování zařízení v případě připojení nekompatibilní aplikace, provede se kontrola kompatibility při připojení. Tato kontrola spočívá v tom, že aplikace odešle zařízení unikátní sled čísel prezentující označení aplikace. Zařízení tento sled přijme a na základě toho, jestli je kompatibilní s aplikací nebo ne, vrátí odpověď v podobě jiného

unikátního čísla. Mobilní aplikace odpověď vyhodnotí, pokud bude kladná, tedy zařízení a aplikace budou kompatibilní, dojde ke spuštění aplikačních úloh, které běží na komunikaci. V případě, že zařízení a aplikace kompatibilní nejsou, dojde k rozpojení komunikace.

Zabezpečení komunikace

Realizace komunikace mezi mobilním zařízením a laboratorním zdrojem musí zajistit, aby tato komunikace byla bezpečná. Zabezpečením komunikace se rozhodně nemyslí, že komunikace bude šifrovat data. Bezpečností komunikace se myslí, že komunikace bude schopná zvládnout situace, kdy dojde k jejímu rušení nebo nějaké fyzické závadě na některém technickém zařízení, které se stará o přenos dat (modul HC-05, modul Bluetooth integrovaný v mobilním zařízení, závada na USART0 mezi modulem HC-05 a mikrokontrolérem). Vzhledem k tomu, že výstup zdroje napětí je spojen s hnacím vozidlem, může dojít k tomu, že se vlivem přenosu zkreslených informací nebo vlivem přerušení komunikace začne hnací vozidlo chovat neovladatelně. To může mít za následek ohrožení provozu vznikem mimořádné události (srážka, vykolejení), může dojít ke vzniku škody na hnacím vozidle samotném i jiných vozidlech, které se vlivem nestandardního chování hnacího vozidla zúčastní mimořádné události. Proto je důležité zajistit, aby komunikační protokol sloužící ke komunikaci mezi mobilním zařízením a zdrojem napětí byl bezpečný z hlediska odhalení zkreslování přenášených dat a přerušení komunikace, případně její nepropustnosti. Existují určité stavy, které mohou nastat, přičemž mohou ohrozit bezpečnost provozu. Jedním ze stavů je například přenos zkreslené informace, kdy informaci může zkreslit např. elektromagnetické rušení. Další příčinou může být přerušení vodivého spojení mezi modulem HC-05 a mikrokontrolérem. Rovněž může dojít k tomu, že mikrokontrolér bude zahlcený příjmem dat a nebude zvládat efektivně jejich zpracování a vyhodnocení, na základě čehož bude moci dojít ke ztrátě dat, a tedy neúplnému doručení datových rámců. To může vést k tomu, že se přestanou přenášet potřebné informace. Jednou z nejdůležitějších přenášených veličin je velikost výstupního napětí. Pokud dojde k tomu, že se komunikace stane nepropustnou pro datové rámce, ať už vlivem toho, že došlo k závadě na fyzické vrstvě, nebo vlivem toho, že se nezvládají rychle zpracovávat data, může docházet k tomu, že se bude lišit velikost požadovaného výstupního napětí zdroje. Ta se nastavuje na ovládacím prvku v mobilním zařízení. Skutečná velikost výstupního napětí zdroje pak může odpovídat chybně interpretované veličině nebo neaktuální hodnotě, což může vést ke ztrátě kontroly nad řízením. Proto je důležité periodicky testovat komunikaci. V rámci testování se provádí kontrola toho, jestli je komunikace propustná a funkční. Ověřování propustnosti komunikace se provádí tak, že se komunikačním kanálem odesílá speciální datový rámeček. Tento speciální datový rámeček má za úkol ověřit, že je komunikace propustná. Zároveň se testováním zvládne ověřit, že nezkrusluje. Aplikace v mobilním zařízení odešle testovací rámeček složený z unikátní kombinace čísel. Mikrokontrolér má za úkol tento rámeček zachytit, zpracovat a odeslat ho zpět mobilnímu zařízení. Mobilní zařízení má spuštěný časovač, který se stará o pravidelnou kontrolu, jestli došlo k přijetí testovacího rámečku. Dojde-li k přijetí testovacího rámečku příjemcem v mobilní aplikaci, tak dojde k tomu, že se nastaví hodnota proměnné *prijato* do logické jedničky. Hodnota této proměnné se pak dále vyhodnocuje v časovači. Časovač periodicky kontroluje, jestli se v proměnné *prijato* nachází logická jednička, samozřejmě při kontrole dochází k vynulování hodnoty této proměnné. Pokud se v proměnné *prijato* nenachází logická jednička, došlo k nějaké závadě v komunikaci, tak mobilní aplikace provede příslušné kroky k zajištění bezpečnosti. Provede rozpojení komunikace po rozhraní Bluetooth s modulem HC-05. Rovněž se zastaví odesílání dat po Bluetooth. Zdroj na rozpojení zvládne zareagovat díky vývodu STATE modulu HC-05, na kterém se v případě, kdy je modul připojený, nachází logická

jednička. Pokud dojde k odpojení modulu HC-05 od mobilního zařízení a je navolena volba ovládání zdroje za pomoci mobilního zařízení, tak se vývod STATE přestaví do logické nuly. Na základě této akce dojde k tomu, že mikrokontrolér zvládne již zareagovat, nastaví nulové výstupní napětí měniče, díky čemuž dojde k zastavení hnacího vozidla.

13 Vývoj softwaru řídicí jednotky

Programování mikrokontroléru Atmega 328P

Mikrokontrolér je z rodiny RISC. Jedná se tedy o výpočetní zařízení, jehož instrukční sada neobsahuje složité instrukce vhodné pro specifickou oblast použití. To znamená, že jeho aritmeticko-logická jednotka je poměrně jednoduchá, neumí složitější operace. Firma Atmel umožňuje programování těchto mikrokontrolérů v jazyce assembler, což je v podstatě strojový kód se symbolickými názvy instrukcí, podobá se strojovému kódu. Programování mojí práce však proběhlo v programátorsky přívětivějším jazyce C. Vývoj probíhal v prostředí Atmel Studio. Z hlediska efektivity je programování mikrokontrolérů v jazyce C přehlednější. Jedná se o efektivní programování, spoustu větvení a podmínek se dá realizovat jednoduše, ale je zachován přístup k perifériím jako takovým. Při programování mikrokontroléru bylo důležité dodržet princip funkcionality komunikačního protokolu. Zejména rychlost přístupu k vyrovnávací paměti přijímače a postupné odesílání dat do vyrovnávací paměti vysílače tak, aby nedocházelo k přepsání dat. Problematika obsluhování komunikačního protokolu po sériové lince byla doplněna problémem obsluhování periferie I²C. Periferie I²C neřeší vyrovnávací paměti, ale kritickou odmlku obsluhování sběrnice. Sběrnice I²C se obsluhuje jako stavový automat, po každém stavu přichází předem známý stav. Je důležité brát ohled pouze na to, kdy se vykonají dané akce (odeslání slave adresy s požadavkem o čtení, odeslání slave adresy s požadavkem o zápis, přijetí dat od slave atd.), a zda se vykonaly správně. I rozhraní I²C trvá určitý čas, než zvládne provést přenos dat. Až poté, co dokončí jednu akci, může proběhnout akce další. Dalším problémem je, že slave zařízení mají nastavenou kritickou dobu mezi jednotlivými akcemi. Pokud se nestihne obsloužit periferie I²C včas, tak se zablokuje, protože slave zařízení se vyresetují do stavu, kdy čekají na přijetí svojí adresy a následující akce. Komunikaci po I²C je vždy důležité uzavřít, master musí odeslat STOP. Pokud se komunikace neukončí a master zařízení (mikrokontrolér) považuje komunikaci za otevřenou a začne odesílat požadavek o zápis nebo čtení, tak se mu nedostane odpovědi (protože slave zařízení budou považovat danou akci za odesílání slave adresy).

Systém přerušení

Aby byla obsluha periférií efektivní, pro sestavení programu řídicí jednotky byl použit interní systém přerušení. Systém přerušení má za úkol řešit obsluhu jednotlivých periférií v případě vzniku události, která si žádá přerušení. Mezi tyto události patří v tomto případě například přijetí dat po rozhraní USART0 nebo přetečení čítače/časovače 0. V případě, kdy vznikne událost vedoucí k přerušení, je potřeba vykonat určitou specifickou část programu, která se provede pouze jednou jako podprogram. K tomu, aby bylo možné přesměrovat vykonávání programu na zmíněnou část programu, který se má vykonat pouze při spojení s určitou událostí, bylo potřeba dát povolení události na lokální úrovni. Povolením na lokální úrovni se dovolí, případně zakáže, činnost přerušení periferie při určité události, jedna periferie může poskytovat více událostí. Každá událost má svoje povolení. Přerušení je pak dále potřeba povolit na globální úrovni, kdy globální povolením se dá povolit nebo zakázat přerušení všech periférií a všech jejich

událostí hromadně, jejichž přerušeni je lokálně povoleno. O obsluhu dané události se pak stará vektor přerušeni. Paměť programu je rozdělena na určité oblasti, kdy v jedné oblasti běží funkce main, tedy hlavní program, ostatní oblasti vyplňují podprogramy. Každý podprogram je charakterizován určitou počáteční adresou náležící prvnímu příkazu daného podprogramu. Vektor přerušeni zvládne přeměřovat chod programu na daný první příkaz podprogramu. Zvládne tedy nastavit hodnotu programového čítače na adresu prvního řádku daného podprogramu spojeného s přerušeni. V případě, kdy vznikne událost přerušeni, a přerušeni je povoleno, se dokončí právě prováděná instrukce. Následně proběhne nastavení programového čítače na adresu prvního příkazu daného podprogramu přerušeni, vykoná se podprogram přerušeni, poté se vykonávání programu vrátí zpět do hlavního programu na místo, kde došlo k přerušeni. O dané akci se stará řadič přerušeni. Řadič přerušeni má na starost zaregistrování toho, že došlo k události, která si vynucuje přerušeni. Tento obvod, který lze svým způsobem považovat za periférii, která ale není konfigurovatelná, má informaci o poloze jednotlivých podprogramů v paměti programu. Má i vlastní paměť, do které si uloží hodnotu programového čítače v případě, kdy došlo k přerušeni, aby vykonávání programu mohl vrátit na místo přerušeni po vykonání podprogramu. Řadič přerušeni řeší i takové případy, kdy nastane více událostí přerušeni současně. Pak o tom, jaké přerušeni nastane jako první, rozhoduje prioritní tabulka, která určuje, jaká přerušeni mají větší prioritu a která mají menší prioritu. Systém přerušeni byl navržen z toho důvodu, aby zefektivnil výpočetní výkon výpočetních zařízení, protože výrazně zlepšuje možnost obsluhy asynchronních událostí. Do asynchronních událostí se řadí všechny události, o nichž se neví, kdy přesně nastanou. Mezi takovéto události patří například stisknutí tlačítka nebo přijetí dat po komunikačním rozhraní. Neefektivní programátorské metody používají tzv. polling, kdy se příznakové bity událostí přerušeni cyklicky vyhodnocují uvnitř těla hlavního programu. Má to podstatnou nevýhodu v tom, že to programátorům svazuje ruce, co se konstrukce programu týče. Program musí být koncipován tak, aby jeho cyklická část probíhala pokud možno co nejrychleji, což nedovoluje dlouhé výpočty ani obsluhy nějakých typů zařízení.

Návrh přístupu k obsluze periférií

Periferie I²C je navržena jako stavový automat, kdy každý stav této periferie je prezentován unikátním číslem, které se nachází v registru TWSR. Obsluha periferie I²C je prováděna za pomoci systému přerušeni, vektoru přerušeni TWI_vect. Dojde-li ke změně stavu periferie I²C (TWI), vyvolá se tento vektor přerušeni a může proběhnout adekvátní obsluha periferie. Kdyby se nepoužil vektor přerušeni, bylo by nutné pravidelně kontrolovat stav periferie v cyklicky vykonávané části funkce main. Kromě toho by bylo nutné si pamatovat výchozí stav, aby se dalo detekovat, že se něco změnilo (vznikl by problém s přechodem mezi dvěma stejnými stavy, který může nastat a vektor ho zvládne vyřešit). Důležitou roli v obsluze rozhraní I²C vykonává i čítač/časovač 0, který běží v normálním režimu. Přetečení obsahu čítače/časovače 0 vyvolá přerušeni, uvnitř něhož se spouští začátek komunikace po I²C. Periferie I²C se neumí sama spustit ve vektoru přerušeni (když se nemění stav, nespustí se ani vektor). Proto se k nastartování převodu používá čítač/časovač 0, který periodicky, pokud už nebyla komunikace spuštěna, provádí start aplikace. Do vektoru přerušeni čítače/časovače 0 je umístěn i výpočet výstupního napětí pro měnič a časování pro jiné aplikace, mimo jiné i obsluha vysílače rozhraní USART0 (dekodér pro vysílač). Obsluha přijímače sériové linky probíhá uvnitř těla podprogramu přerušeni USART_RX_vect. To z toho důvodu, že je důležité zajistit, aby data byla zvednuta co nejrychleji po přijetí do vyrovnávací paměti. Samotné odesílání dat po rozhraní USART0 se provádí v cyklicky vykonávané části hlavní funkce main. Jedná se o pomalou

činnost, která musí postupně dávkovat data z datového rámce do vyrovnávací paměti vysílače tak, aby nedošlo k jejich přepsání. V případě obsluhy ve vektoru přerušeni by tato činnost zbytečně zdržovala mikrokontrolér při jiných aktivitách. Uvnitř cyklicky vykonávané části hlavní funkce je možnost si při odesílání dat po sériové lince zavolat přerušeni při předání dat vyrovnávací paměti a po obslužení vysílání se vrátit zpět. Z podprogramu přerušeni nelze volat jiný podprogram přerušeni.

Obsluha vysílače rozhraní USART0

Mikrokontrolér Atmega 328P je z hlediska rozhraní USART zařízení, které neiniculuje komunikaci. Komunikaci inicializuje mobilní zařízení, které je připojené k mikrokontroléru přes Bluetooth rozhraní a modul HC-05, tedy aplikace sloužící k ovládní zdroje, inicializuje komunikaci. Je to vždy aplikace, která zahajuje odesílání informace o tom, jaké napětí se má nastavit na výstupu zdroje a jakou má mít polaritu. Mobilní aplikace je rovněž tím zařízením, které se ptá na hodnoty veličin měřených na výstupu laboratorního zdroje. V případě, kdy je navázána komunikace mezi modulem HC-05 a mobilním zařízením, se spustí časovač aplikačních úloh. Ten pravidelně začne odesílat dotazy a informace o velikosti napětí, které se má nastavit na výstup, spustí se i další aplikační úlohy nutné pro chod zdroje. Obdrží-li mikrokontrolér dotaz, snaží se odpovědět, a to tak, že odešle příslušný datový rámec. Vysílač na straně mikrokontroléru je obsluhován v cyklicky vykonávané části hlavního programu. Obsluhu vysílače provádí virtuální dekodér. Samotný vysílač je řízen proměnnou *vysilac*, která se nastaví do hodnoty odpovídající unikátnímu číslu prezentujícímu význam datového rámce, který se má odeslat. Datový rámec se odesílá s ohledem na to, že vyrovnávací paměť vysílače rozhraní USART0 má u mikrokontroléru Atmega 328P pouze dva byty. Hlídá se bit UDRE0 v registru UCSR0A. Ten se nastaví do logické jedničky v případě, kdy je vyrovnávací paměť vysílače prázdná. To přesně hlídá přístup k vyrovnávací paměti vysílače. Nejprve odešle byte a pak za pomoci smyčky while čeká, dokud se tento bit nenastaví do logické jedničky. Z této smyčky se dá zavolat jiný podprogram spojený s přerušením. Tedy během toho, co se provádí odesílání jednoho bytu, se dá vyřešit jiná výpočetní operace, chod programu je efektivnější. Poté, co se odešlou všechny byty daného datového rámce, se hodnota proměnné *vysilac* nastaví na nulu, což signalizuje to, že se nevysílá. Zároveň se odblokuje posun po frontě, která řeší přístup k vysílači. Samotná fronta se nachází uvnitř podprogramu spojeného s vektorem přerušeni periferie čítač/časovač 0 `TIMER0_OVF_vect`. Toto přerušeni nastane poté, co periferie čítač/časovač 0 přeteče, napočítá 256 pulzů. Pulzy počítá s maximální frekvencí, která je dostupná na interním oscilátoru, tedy s frekvencí 8 MHz. Fronta je realizovaná prostřednictvím pole datového typu `uint_8t`, které má 10 buněk. To, jaká pozice se vysouvá, se ovládá hodnotou uloženou v proměnné *rizeni_vysouvani*, která je rovněž datového typu `uint_8t`. Tato proměnná nabývá hodnoty od 1 do 10 a určuje, jaká pozice ve frontě se bude vysouvat. Pokud dosáhne hodnoty 11, dochází k její přenastavení do hodnoty 1. Ke zvyšování obsahu této proměnné dochází automaticky při vykonávání podprogramu přerušeni, pokud není zvyšování blokováno vlivem zahájení vysouvání. K blokování vysouvání slouží proměnná *povoleni_vysouvani*, která musí být nastavená na hodnotu 1, aby došlo k posunu na další pozici. Tato proměnná se při zahájení vysouvání (předání dat dekodéru pro vysílač rozhraní USART0) nastaví do nuly a do hodnoty 1 se vrátí až poté, co se ukončí vysouvání. Během toho, co je nastavená v logické nule, není možné posouvat se ve frontě na další pozice nebo zahájit jiné vysílání. Do fronty se mohou aplikace zařadit potom, co probíhá vysouvání libovolné pozice, ale pouze pokud je volné místo. Na obsazené pozice a vysouvanou pozici se nedá zařadit.

Obsluha přijímače rozhraní USART0

Přijímač rozhraní USART0 se obsluhuje za pomoci vektoru přerušení USART_RX_vector. Tělo podprogramu přerušení se vykoná pokaždé, kdy dojde k přijetí bytu po rozhraní USART0. Datové rámce, které jsou dlouhé 9 nebo 10 bytů, musejí být zachovány v původní přijaté podobě. Až poté, co proběhne přijetí celého rámce a dojde k převzetí přenášené informace, může dojít k odstranění přijatých dat. Data se musejí vyzvedávat velmi rychle, protože vyrovnávací paměť přijímače rozhraní USART0 má pouze dva byty. Přijaté byty se vkládají do posuvné řady. Řada se nazývá posuvnou, protože se v ní přijaté byty postupně posouvají od konce k začátku v pořadí, v jakém byly přijaty. Posun je realizován cyklem for, kdy byte uložený na první pozici zaniká. Posuvnou řadu tvoří pole s 10 paměťovými buňkami, pole je proměnná datového typu uint8_t s názvem *prijem*. K posunutí této řady o jeden byte doprava dojde pokaždé, když se vyvolá tělo vektoru přerušení USART_RX_vect. Na nultou pozici se potom, co proběhne posunutí, vloží nově přijatý byte. Konstrukce s oddělovacími byty a pravidlo, že se nepoužívají byty s hodnotou 0 jako adresní byty, má za úkol zamezit tomu, aby nedocházelo k falešným vyhodnocením v rámci posuvné fronty. Přijetí dané informace se zkoumá tak, že se porovnává pozice všech pevně definovaných bytů rámce, proměnný byte (datový) se v případě shody přiřadí příslušné proměnné. Vyhodnocování se provádí za pomoci podmínky if, ve kterých se zkoumá správnost hodnot ve všech adresních bytech, správnost oddělovačů i konec rámce.

Obsluha rozhraní I2C u mikrokontroléru Atmega 328P

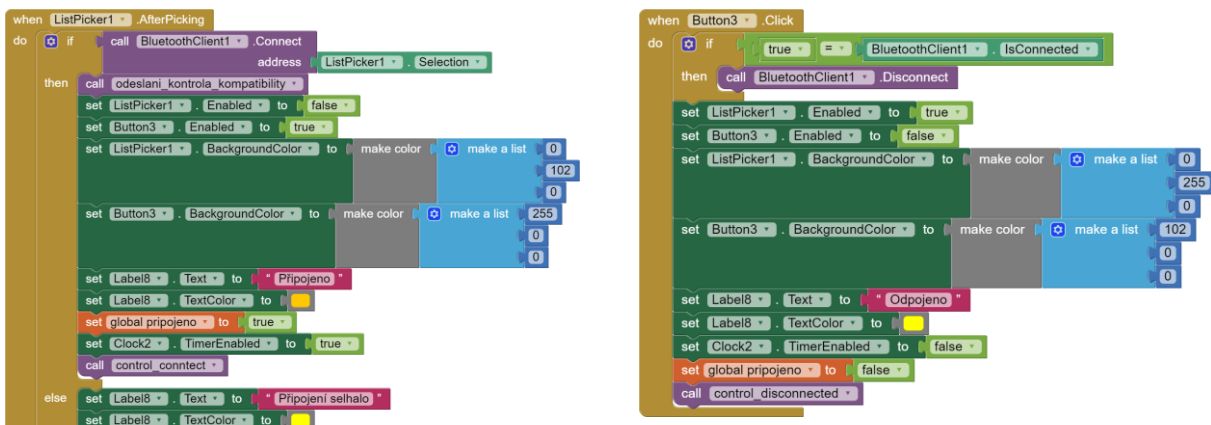
Vzhledem k tomu, že rozhraní TWI (I2C) je u mikrokontrolérů z rodiny AVR obsluhované jako stavový automat, je nutné i obsluhu periferie koncipovat jako stavový automat. Samotná obsluha probíhá v podprogramu spojeném s vektorem přerušení TWI_vect. Tělo tohoto podprogramu se vykoná pokaždé, když dojde ke změně vnitřního stavu periferie TWI. Aby se mohla odstartovat typická sekvence stavů, kterými musí projít periferie, aby obsloužila nějaké zařízení, je nutné odeslat START komunikace z vektoru přerušení periferie čítač/časovač 0. Vzhledem k tomu, že stav, ve kterém se periferie nachází, je prezentovaný číselnou hodnotou v registru TWSR, je důležité vyhodnocovat logické úrovně zapsané v tomto registru. Obsah registru TWSR se vyhodnocuje do proměnné *stav*. Na základě její hodnoty se pak za pomoci větvení case volí adekvátní akce periferie TWI. Na sběrnici TWI je však připojeno více zařízení. Kromě toho měnič MP8862 má k dispozici více ovládacích registrů, které je potřeba nastavit, aby měnič fungoval podle požadavků. Proto bylo úkolem rovněž vyřešit přístup k jednotlivým zařízením a jejich ovládacím registrům. Tento přístup je řešen na základě dalšího stavového automatu. Uvnitř toho hlavního stavového automatu je pak v každém stavu umístěn další stavový automat, který řeší obsluhu jednoho ovládacího registru jednoho zařízení na sběrnici. Všechny ovládací registry se obsluhují periodicky, periodicky se čte z některých zařízení na sběrnici (A/D převodníky). Stav hlavního stavového automatu tvoří uzavřený kruh, který má pár odboček. Tyto odbočky vznikly z toho důvodu, že se na sběrnici obsluhují A/D převodníky. A/D převodník typu ADS1110 je schopný předat master zařízení informaci o tom, že jeho převod ještě neproběhl. Na základě čehož se dá posléze rozhodnout, jestli se vyzvednou data z A/D převodníku a spustí se další převod, případně se přejde na obsluhu jiného zařízení. Hlavní stavový automat je prezentovaný proměnnou *hlavni_navestidlo*. Na základě její hodnoty se řídí to, jaké zařízení se má obsluhovat. Vždy se zkoumá hodnota této proměnné, podle ní se rozhodne, u kterého zařízení dojde k obslužení dané sekvence komunikace. Blokování, kterým se během průchodu podprogramem zajistí to, aby se mohlo obsloužit pouze jedno zařízení,

vychází z toho, že obsluhy zařízení jsou podle hodnoty proměnné *hlavni_navestidlo* seřazeny pod sebou. K přepsání hodnoty této proměnné dochází vždy, když dojde k poslednímu vnitřnímu stavu periferie TWI při obsluze zařízení. V posledním vnitřním stavu dochází rovněž k odeslání STOP sekvence. Komunikaci na rozhraní TWI je vždy důležité uzavřít STOP sekvencí. Kdyby došlo k tomu, že se komunikace neuzavře, tak periferie TWI si bude myslet, že došlo k nějaké chybě v komunikaci. Dojde-li k delší odmlce v komunikaci mezi mikrokontrolérem v roli master zařízení a slave obvody v podobě měniče MP8862 a A/D převodníků, slave zařízení provedou reset a mikrokontrolér nezvládne komunikaci znovu navázat. Odeslání START sekvence pro sběrnici TWI se provádí uvnitř podprogramu přerušení *TIMER0_OVF_vect*, to proto, že TWI se neumí samo rozběhnout po odeslání STOP sekvence z vlastního vektoru přerušení (není změna stavu). Odesílání START sekvence je blokováno proměnnou *vykonavani* datového typu *uint_8t*, která se nastaví do hodnoty 1 v případě, že se odešle START sekvence, k její vynulování dochází až po odeslání STOP sekvence. Blokování je provedeno z toho důvodu, aby nedocházelo k nechtěnému startování komunikace, což by vedlo k problému s obsluhou zařízení.

14 Programování mobilní aplikace

Řízení toku programu

Program, který obsahuje mobilní aplikace, tedy vývoj mobilní aplikace samotné, proběhl ve vývojovém prostředí MIT App Inventor. Vytváření programu v tomto vývojovém prostředí je charakteristické tím, že probíhá graficky za pomoci skládání programu z funkčních bloků (podoba puzzlí). Takové programování má stejné zásady jako programování jakékoliv jiné aplikace např. v jazyce C, řádky se vykonávají postupně od shora směrem dolů. Jazyk je hodně podobný svou syntaxí jazyku C#, ale nemá oficiální název. Velikou nevýhodou při vytváření programu je, že nemá žádnou část známou z programování např. jazyka C jako *main*, tedy hlavní funkci, která má část, která se vykoná jednou, a část, která se spouští cyklicky (nekonečná smyčka). Program se spustí pouze tehdy, když se vyvolá nějaká událost (Event). Událostí může být stisknutí nějakého tlačítka nebo dokončení časovače časovače. Jak mikrokontrolér využívá fyzické periferie časovače, které slouží ke spouštění určitých akcí, tak aplikace běží na mobilním telefonu, který má vlastní procesor a vlastní periferie. Využívá virtuálních časovačů pro řízení chodu programu. Bohužel programové prostředky vývojového prostředí MIT App Inventor nedovolují konstrukci programu s vyvoláním události spojenou s příjmem dat po rozhraní Bluetooth, což vede k větší složitosti konstrukce programu.



Obrázek 21: Programové bloky řešící připojování a odpojování Bluetooth komunikace

Připojení aplikace

K připojení aplikace bylo použito tlačítkové ovládání (virtuální tlačítka). Aplikace se z hlediska připojení chová jako stavový automat s tím, že tlačítka jsou programově blokována. To znamená, že pokud dojde ke stisknutí tlačítka PŘIPOJIT, odblokuje se tlačítko ODPOJIT a tlačítko PŘIPOJIT se zablokuje a obráceně. Zároveň je potřeba blokovat obsluhování rozhraní Bluetooth, a to tak, že se vypnou časovače starající se o obsluhu.

Řízení přijímače rozhraní Bluetooth

Bluetooth rozhraní, jak je implementované ve vývojovém prostředí MIT App Inventor. MIT App Inventor zvládá zpracovávat data po 8bitových částech, data mají tedy délku jeden byte. Obrovská výhoda oproti mikrokontrolérům je u mobilního zařízení ta, že rozhraní Bluetooth má mnohem větší vyrovnávací paměť než mikrokontrolér z rodiny AVR. Ať už se jedná o vyrovnávací paměť fyzickou nebo virtuální, důležité je, že přijímač Bluetooth u mobilního zařízení programovaného přes vývojové prostředí MIT App Inventor zvládne uchovat velké množství dat. Proto se dá obsluhovat za pomoci časovače, který jednou za 20 milisekund vyzvedne data z vyrovnávací paměti a zařadí je do posuvné fronty (stejný princip jako u řešení komunikačního protokolu pro mikrokontrolér), kde dochází k jejich vyhodnocení a realizaci akcí potřebných k činnosti aplikace. Provádí se tak, že se vyzvednou všechna data, která se v daný okamžik nachází ve vyrovnávací paměti, následně se obsah fronty porovná se známými rámci. Pokud se v přijatých datech zachytí rámec, tak se převezme příslušná informace, případně se vykoná odpovídající akce.

Řízení činnosti aplikací

K řízení činnosti aplikací, tedy k řízení kontroly průchodnosti komunikace a k odesílání informace o velikosti a polaritě výstupního napětí, stejně jako odesílání dat po Bluetooth slouží časovače, které jsou aktivní pouze v případě, kdy se podařilo navázat komunikaci mezi mobilním zařízením a modulem HC-05. Časovač Clock1 slouží k periodickému obnovování dostupných Bluetooth zařízení, časovač Clock2 slouží k obsluze komunikace Bluetooth.

15 Doplnkové funkce

Zastavení hnacího vozidla

Hnací vozidlo je stroj, jehož součástí je stejnosměrný motor. Takže stejně, jako u ostatních elektrických točivých strojů, lze i u hnacího vozidla rozdělit zastavení do několika kategorií. Jediné a nejčastěji používané je zastavení kategorie 0, kdy dochází k odpojení hnacího vozidla od napětí. Často se rovněž používá zastavení kategorie 2, kdy dochází k tomu, že napětí přiváděné na elektromotor hnacího vozidla poklesne pod hodnotu rozjezdového napětí, přesto elektromotor hnacího vozidla je stále pod napětím, které je však velmi nízké. Je dobré připomenout, že elektromotor je charakteristický odporem vinutí a indukčností vinutí. Na indukčnosti se vlivem rychlé změny proudu indukuje vysoké napětí. Na rozdíl od klasické indukčnosti v podobě cívky nebo vinutí transformátoru je pohon každého hnacího vozidla charakterizován určitou setrvačností. Hnací vozidlo společně s ostatními kolejovými vozidly, které tvoří vlak, vytváří celkovou setrvačnost systému. Proto k zastavení hnacího vozidla nedojde okamžitě poté, co se odpojí napájecí napětí od elektromotoru, případně okamžitě poté, co poklesne napětí

přivedené na elektromotor pod hranici rozjezdového napětí. Mnoho v současné době dostupných napáječů neřeší problém, že je možné na elektromotoru změnit skokově nebo velmi rychle polaritu napájecího napětí. To má za následek, že může dojít k poškození hnacího vozidla (jeho elektromotoru), může být poškozen i zdroj napájení. Napáječe svojí konstrukcí umožňují, že se dá relativně velmi rychle k setrvačnosti hnacího vozidla přestavit ovladač rychlosti a směru jízdy z jedné krajní polohy do druhé. Důsledkem toho je, že proud elektromotorem se zvýší na mnohonásobně vyšší hodnotu, přičemž změní směr, navíc se v obvodu může krátkodobě objevit vysoké napětí. Prudký nárůst proudu může poškodit vinutí elektromotoru. Při průchodu nulou může navíc vzniknout vysoké napětí, které může poškodit jak motor, tak samotný zdroj. Proto konstrukce mého napájecího zdroje počítá s možností toho, že uživatel přestaví ovládací prvek z jedné krajní polohy do druhé krajní polohy velmi rychle, k zamezení vzniku popsanych jevů dochází na základě blokování.

```

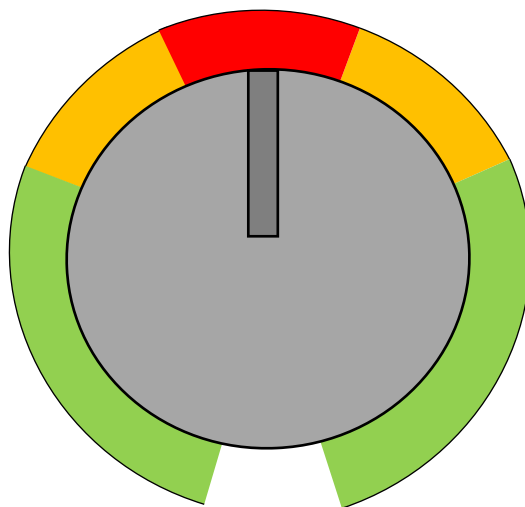
when Clock2.Timer
do while test 0 <= BluetoothClient1.BytesAvailableToReceive
do
  set global desata to get global devata
  set global devata to get global osma
  set global osma to get global sedma
  set global sedma to get global sesta
  set global sesta to get global pata
  set global pata to get global ctvrta
  set Label2.Text to "JSEM SE ZASEKL"
  set global ctvrta to get global tretí
  set global tretí to get global druha
  set global druha to get global prvni
  set global prvni to call BluetoothClient1.ReceiveUnsigned1ByteNumber
  if (get global desata = 0 and get global devata = 75 and get global osma = 0)
  then if (get global sedma = 33 and get global sesta = 0 and get global pata = 52)
  then if (get global ctvrta = 0 and get global druha = 0 and get global prvni = 0)
  then set global_prijem to get global_treti
  if (get global devata = 0 and get global osma = 74 and get global sedma = 0)
  then if (get global sesta = 21 and get global pata = 0 and get global ctvrta = 70)
  then if (get global tretí = 0 and get global druha = 0 and get global prvni = 0)
  then set Label2.Text to "KOMPATIBILNI"
  set global_devata to 55
  if (get global devata = 0 and get global osma = 74 and get global sedma = 0)
  then if (get global sesta = 22 and get global pata = 0 and get global ctvrta = 39)
  then if (get global tretí = 0 and get global druha = 0 and get global prvni = 0)
  then set Label2.Text to "NEKOMPATIBILNI"
  set global_devata to 55
  
```

Obrázek 22: Obsluha přijímače Bluetooth v mobilní aplikaci

Blokování

Ke změně velikosti a směru jízdy slouží při ručním ovládní potenciometr, přičemž poloha jezdce potenciometru, která je spřažena s velikostí napětí mezi jezdce a zemí, se snímá na základě A/D převodníku. A/D převodník je typu ADS1110, tento převodník je 12-16bitový v závislosti na zvolené vzorkovací frekvenci (rozlišení je závislé na vzorkovací periodě). Odporová dráha je rozdělena na pět nestejně velkých částí, kdy jedné krajní poloze jezdce potenciometru odpovídá napětí výstupní napětí zdroje 12 V a druhé krajní poloze jezdce potenciometru odpovídá napětí -12 V. Uprostřed odporové dráhy se nachází oblast, která je charakteristická tím, že pro všechny její hodnoty je výstupní napětí nulové. Okolo této oblasti se pak z obou stran nachází pásy, ve kterých se sice výstupní napětí mění, ale je v nich dávana

signalizace o tom, že se ovládací prvek svojí polohou blíží k pásnu s nulovým napětím. Myšlenka těchto pásem je, že od nulové oblasti vpravo má výstupní napětí jednu polaritu, od nulové oblasti vlevo má výstupní napětí druhou polaritu, pásma se dají nazvat pásmo 1 a pásmo 2. Přechod mezi jednotlivými pásmy nelze provést skokově. Je možné ovládací prvek přemístit mezi těmito dvěma pásy, nicméně k odpovídající změně výstupního napětí nedojde. To, že nedojde ke změně polarity výstupního napětí, způsobí softwarové blokování. Nachází-li se ovládací prvek v jednom pásmu, tak polarita druhého napájecího napětí je blokována. Dojde-li k přestavení polohy ovládacího prvku do druhého pásma, tak se výstupní napětí vynuluje, hnací vozidlo zastaví. Až když dojde k tomu, že se ovládací prvek umístí do oblasti ve středu odporové dráhy, tak dojde k tomu, že se spustí odpočítávání. Odpočítávání probíhá tak, že se do proměnné přičítá hodnota 1 s každou iterací. V situaci, kdy se obsah proměnné rovná určité hodnotě, dochází k odblokování možnosti aktivně poskytovat napětí v obou pásmech. V případě, že dojde k přestavení ovládacího prvku do určitého pásma, tak automaticky dochází k zablokování poskytování napětí v druhém pásmu. To má za následek, že pokud chce obsluha napájecího zdroje změnit směr jízdy hnacího vozidla, tak musí provést zastavení tím, že na výstup napájecího zdroje přivede nulové napětí. Hnací vozidlo musí určitou dobu zůstat v klidu při nulovém napětí, až pak je možné pokračovat v jízdě nebo změnit směr. Díky tomu se stihnou vykonat přechodové jevy při odpojování indukční zátěže, vozidlo zvládne zastavit. Samotný měnič je rovněž uchráněn.



Obrázek 23: Rozložení pásů pohybu potenciometru

Závěr

Účelem této bakalářské práce byla konstrukce programovatelného napájecího zdroje pro modelovou železnici, který je možné vzdáleně ovládat za pomoci mobilního zařízení, mobilního telefonu/tabletu.

Základem možnosti realizace této myšlenky bylo nalezení vhodného regulačního členu výstupního napětí zdroje, který by umožnil vzdálené ovládání. Za tímto účelem byl pro regulaci výstupního napětí vybrán programovatelný řídicí obvod pro DC/DC měnič MP8862 od firmy Monolithics Power System. Tento obvod je možné ovládat přes rozhraní I2C. Volba regulačního prvku byla zásadní, protože bylo důležité zaručit, aby bylo možné regulaci ovládat za pomoci mikropočítače. Danou regulaci je nutné provést, je-li to možné, co nejjednodušším způsobem, bez nutnosti konstruovat složité řízení výstupního napětí pro konvenčně používané DC/DC měniče, a to pokud možno s velkou přesností. Většina na trhu dostupných měničů umožňuje ovládání výstupního napětí v určitých mezích dle vstupního napětí za pomoci vhodného nastavení zpětné vazby. Toto nastavení se používá většinou s využitím pasivních součástek, nejčastěji s využitím potenciometru. Existuje sice možnost konstrukce elektrického obvodu, který bude provádět ovládání výstupního napětí standardně konstruovaného měniče napětí, nicméně není zaručená přesnost takového ovládání a dostatečná jemnost vzhledem k omezené nabídce součástek dostupných na trhu.

Základním požadavkem byla konstrukce zdroje, který by se připojil na síťové napájecí napětí 230 V/50 Hz a na výstupu by dodával napětí v rozmezí -12 až 12 V tak, aby zvládl regulovat rychlost a směr jízdy hnacího vozidla. Pro splnění tohoto úkolu bylo nutné zkonstruovat zdroj stejnosměrných napětí, na jehož výstup se teprve zapojila regulace s měničem MP8862. Konstrukce zdroje stejnosměrných napětí (s výstupem 12 V, 5 V a 3,3 V) si vyžadovalo použití komponentů nutných pro konstrukci samotné regulace, kdy je potřeba zajistit napájení určitých částí obvodů specifickými napětími. Použitím vyšších napětí by došlo ke ničení komponentů. Při návrhu stejnosměrného zdroje byla nejprve rozvinuta myšlenka zkonstruování tohoto zdroje za pomoci spínaných zdrojů. V takové konstrukci by byly použity tři spínané zdroje, kdy jeden by poskytoval výstupní napětí 12 V, druhý výstupní napětí 5 V a třetí by poskytoval výstupní napětí 3,3 V. Spínaný zdroj by využíval tzv. flyback zapojení, pro každý zdroj by byl využit speciální transformátor pro spínané zdroje Myrra 74040, každý zdroj by byl řízený obvodem TOP224YN. Ten by při použití vhodné zpětné vazby měl zvládnout ve spojení s transformátorem Myrra 74040 vytvářet jmenovaná napětí. Během testování zapojení spínaného zdroje se nepodařilo dosáhnout požadovaných parametrů, a to zejména odebíraného proudu. Spínaný zdroj nezvládl dodávat dostatečný výkon na výstup, což se projevovalo poklesem výstupního napětí. Spínaný zdroj zkonstruovaný s danými prvky dle katalogového zapojení od výrobce navíc nezvládnul dosáhnout na výstupu napětí 12 V. Simulacemi bylo zjištěno, že daný zdroj nemůže fungovat s takovými parametry, jaké udává výrobce. Důvod nefunkčnosti lze spatřit v nedostatečně velké kapacitě na vstupu. Na výstupu z usměrňovače se nezvládne nashromáždit dostatečně velké množství energie. To vede k poklesu výstupního napětí z usměrňovače, což se projevilo snížením schopnosti dodat do transformátoru potřebný elektrický proud a energii. Snížení účinnosti daného principu konstrukce spínaného zdroje lze spatřit i v tom, že se nedaří mařit energii uloženou v primárním vinutí transformátoru, kdy dochází k maření této energie na flyback diodě spojené do série s transilem. Výkon uložený na primárním vinutí je potřeba zmařit na teplo. Na to je při maximální spínací stříde řídicího obvodu TOP224YN málo času. Zmaření energie lze sice urychlit přidáním transilu na vyšší výkon s vyšším průrazným

napětím, nicméně vzhledem k velikosti maximálního závěrného napětí obvodu TOP224YN nelze zvedat průrazné napětí na transilu do nekonečna. Proto byl nakonec zdroj stejnosměrného napětí zkonstruován při použití snižovacího síťového transformátoru a tří DC/DC měničů v režimu STEP DOWN, vždy s řídicím obvodem LM2576-ADJ.

Hlavní náplní činnosti při konstrukci takového zdroje bylo zkoumání programování mikrokontroléru Atmega 328P, který se stal řídicím chipem celé aplikace. Bylo nutné zkoumat, jak zkonstruovat řídicí jednotku tohoto zdroje tak, aby zvládla obsluhovat všechny periferie, které byly využity při konstrukci tohoto zdroje. Při konstrukci byl použit v plné míře systém přerušení, který zefektivnil obsluhu jednotlivých periférií. Při obsluhování komunikačních rozhraní je důležité reagovat včas s ohledem na kritické časy odmlky komunikačních rozhraní a kapacitu jejich vyrovnávacích pamětí. Při sestavování programu pro obsluhu komunikačních rozhraní se vyplatilo použít stavové automaty, které řídily postupné konání jednotlivých komunikačních kroků. Během řešení problematiky této bakalářské práce došlo k výraznému zlepšení mých dovedností a znalostí v programování mikrokontrolérů AVR. Pokrok nelze spatřovat pouze v konstrukci programu, tedy přiřazování jednotlivých úkolů perifériím a vhodným způsobům jejich obsluhy, případně vytváření virtuálních periférií, ale i v přístupu k testování, ověřování a ladění kódu. Obrovský přínos pro mě mělo osvojení si práce se sériovou linkou, stejně jako s periférií TWI (I2C).

Samotná komunikace byla nejtěžším problémem celého řešení. Bylo nutné vyřešit, jak řídit jednotlivé aplikace a předávání dat mezi nimi. Za účelem funkčnosti komunikace došlo ke konstrukci vlastního formátu datových rámců. Rovněž bylo potřebné vyřešit předávání dat mezi všemi vrstvami komunikace. Jednotlivé aplikace, které řeší řídicí jednotka (regulace výstupního napětí, regulace proudového omezení, kontrolní mechanismy průchodnosti komunikace atd.) soutěží o přístup ke komunikačnímu kanálu tak, že žádají o zařazení do fronty odesílání datových rámců. Vzhledem k nutnosti realizovat komunikaci bezpečnou, byla komunikace doplněna o bezpečnostní prvek v podobě periodického testování propustnosti komunikace i toho, že komunikace nezkresluje.

Během řešení problematiky došlo k seznámení s vývojovým prostředím Mit App Inventor, které umožňuje navrhování mobilních aplikací. Toto prostředí umožňuje návrh GUI pro ovládání různorodých aplikací. Mit App Inventor má ale poměrně omezené možnosti pro konstrukci komunikace se vzdáleným zařízením, zejména z důvodu nedostatku ovládacích komponent (virtuální potenciometry, prvky Numeric Control). V tomto prostředí se bylo důležité naučit ovládat chod programu, což v praxi znamená využívat událostí jednotlivých ovládacích prvků vyskytujících se v aplikaci. Vzhledem k tomu, že toto prostředí nemá nic jako funkci main, je důležité používat pro cyklicky se vykonávající část programu událost when.ClockX.Timer. Tato událost se dá interpretovat jako přerušení dokončení časování periferie časovače. Do těla této události je pak důležité umístit program, který se má vykonávat cyklicky. V rámci konstrukce a testování aplikace bylo odvozeno, že není úplně vhodné používat větší množství časovačů, protože aplikace není schopná větší počet časovačů obsluhovat. Tedy aplikace musejí sdílet společný časovač běžící s krátkou periodou přetečení s tím, že aplikace potřebující větší periodu přetečení si inkrementují hodnotu svého počítadla vyvolání události, a když dosáhne tato proměnná velikosti odpovídající odměření časové vzdálenosti pro aplikaci, dojde teprve k vykonání potřebné části kódu. Možnost zlepšení celé konstrukce by mohlo být v použití jiného vývojového prostředí, které zvládne lépe přistupovat k hardwaru mobilního zařízení (procesoru). Otázkou je, jak operační systém mobilního zařízení dovolí rychle přistupovat aplikaci k hardwaru.

Použitá literatura

- [1] Motory MASHIMA + jiní výrobci. *Vlacky.biz: vláčky, auta a cedula* [online]. Praha 4-Chodov: vlacky.biz, neznámý [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.vlacky.biz/railex/eshop/5-1-Motory-MASHIMA-jini-vyrobci#>
- [2] Analog x Digitál. *LokoPin* [online]. Písek: LokoPin, 2006, 28.4.2014 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: http://lokopin.wz.cz/digital/analog_digital.htm#ZAV
- [3] KREJČÍŘÍK, Alexandr. DC/DC měniče. Praha: BEN, 2001. ISBN 80-7300-045-8.
- [4] FAKTOR, Zdeněk. Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-86056-91-0.
- [5] KREJČÍŘÍK, Alexandr. Spínané napájecí zdroje s obvody TOPSwitch. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-031-8.
- [6] KŘÍSTEK, Petr. Návrh a realizace výkonového DC/DC měniče. Ostrava, 2011. Diplomová práce. Technická Univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Václav Sládeček, Ph.D.
- [7] HUJER, Lukáš. Spínaný laboratorní zdroj s nastavitelnými výstupními parametry. Plzeň, 2018. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
- [8] Datový list s transilům série P6KE. GME.CZ [online]. [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: https://img.gme.cz/files/eshop_data/eshop_data/3/222-248/dsh.222-248.1.pdf
- [9] ATmega328P 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash, datový list k mikrokontroléru Atmega 328P. Microchip [online], Atmel, 2015 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf
- [10] MP8862, datový list k programovatelnému měniči MP8862. Monolithic Power Systems [online], 30.5.2019 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: https://www.monolithicpower.com/en/documentview/productdocument/index/version/2/document_type/Datasheet/lang/en/sku/MP8862/
- [11] HC-05 - AT Command Set, seznam AT příkazů pro ovládání modulu HC-05 [online]. [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/robocore-lojavirtual/709/HC-05_AT-CommandSet.pdf
- [12] HC-05 -Bluetooth to Serial Port Module, datový list k modulu HC-05, bez osazení na DPS. Components101 [online], 6.18.2010 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/HC-05%20Datasheet.pdf
- [13] DATASHEET BLUETOOTH TO SERIAL PORT MODULE HC05, datový list k modulu HC-05. Electronica60Norte [online]. [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.electronica60norte.com/mwfls/pdf/newBluetooth.pdf>
- [14] LM2576xx Series SIMPLE SWITCHER® Power Converter 3-A Step-Down Voltage Regulator, datový list k řídicímu obvodu měniče LM2576-AD]. Texas Instruments [online], 2023, [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2576hv.pdf>

[15] TOP221-227 TOPSwitch-II Family www.power.com August 2016 Three-Terminal Off-Line PWM Switch, datový list k řídicímu obvodu pro flyback convertor. POWER INTEGRATIONS [online], 2016 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.mouser.com/datasheet/2/328/top221-227-1512604.pdf>

[16] LM317 3-Terminal Adjustable Regulator, datový list k parametrickému lineárnímu regulátoru LM317. Texas Instruments [online], 2022 [cit. 2023-03-30].

Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317.pdf>

[17] μ A7800 SERIES POSITIVE-VOLTAGE REGULATORS, datový list k rodině lineární regulátorů 78XX. Texas Instruments [online], 2004, [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/LM7805.pdf>

[18] LM79XX Series 3-Terminal Negative Regulators, datový list k rodině lineární regulátorů 79XX. Texas Instruments [online], 2022, [cit. 2023-03-30].

Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/snosbq7c/snosbq7c.pdf>

[19] LM1577/LM2577 SIMPLE SWITCHER® Step-Up Voltage Regulator, datový list s list k řídicímu obvodu STEP UP měniče LM2577. Texas Instruments [online]. 1999 [cit.2023-03-30]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2577.pdf?ts=1680169394964&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F

[20] Vířivé proudy-Eddy Current. ENCYKLOPEDIA [online], [cit. 2023-03-31].

Dostupné z: https://wikijii.com/wiki/Eddy_current

[21] Basics of I2C communication. OpenLabPro [online], [cit. 2023-03-31].

Dostupné z: <https://openlabpro.com/guide/basics-of-i2c/>

[22] Modelářské normy NEM. Moravia Model [online]. [cit. 2023-04-09].

Dostupné z: <https://www.kolejiste.moraviamodel.cz/modelarske-normy-nem>

[23] TRIX H0 T66508 regulátor jízdy s napájením 230 V. Conrad [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/cs/p/trix-h0-t66508-regulator-jizdy-s-napajenim-230-v-1416001.html>

[24] Ovladač lokomotiv 0,6 A + výstup na příslušenství, max. 0,85A / Fleischmann 6725. Itvlaky.cz [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.itvlaky.cz/zdroje/6720/>

[25] Ovladač s regulací rychlosti 12V/ 0,45A / PIKO 55003x. Itvlaky.cz [online]. neznámé: neznámý, neznámý [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.itvlaky.cz/elektro/55003x/>

[26] Ovladač pro vlaky 0,6A výstup na příslušenství, celkem 0,85 A / ROCO 10788. Itvlaky.cz [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.itvlaky.cz/zdroje/roco-10788/>

[27] Ovladač s trafem 230V / PIKO 55000. Itvlaky.cz [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.itvlaky.cz/zdroje/ovladac-s-trafem-230v-piko-55000/>

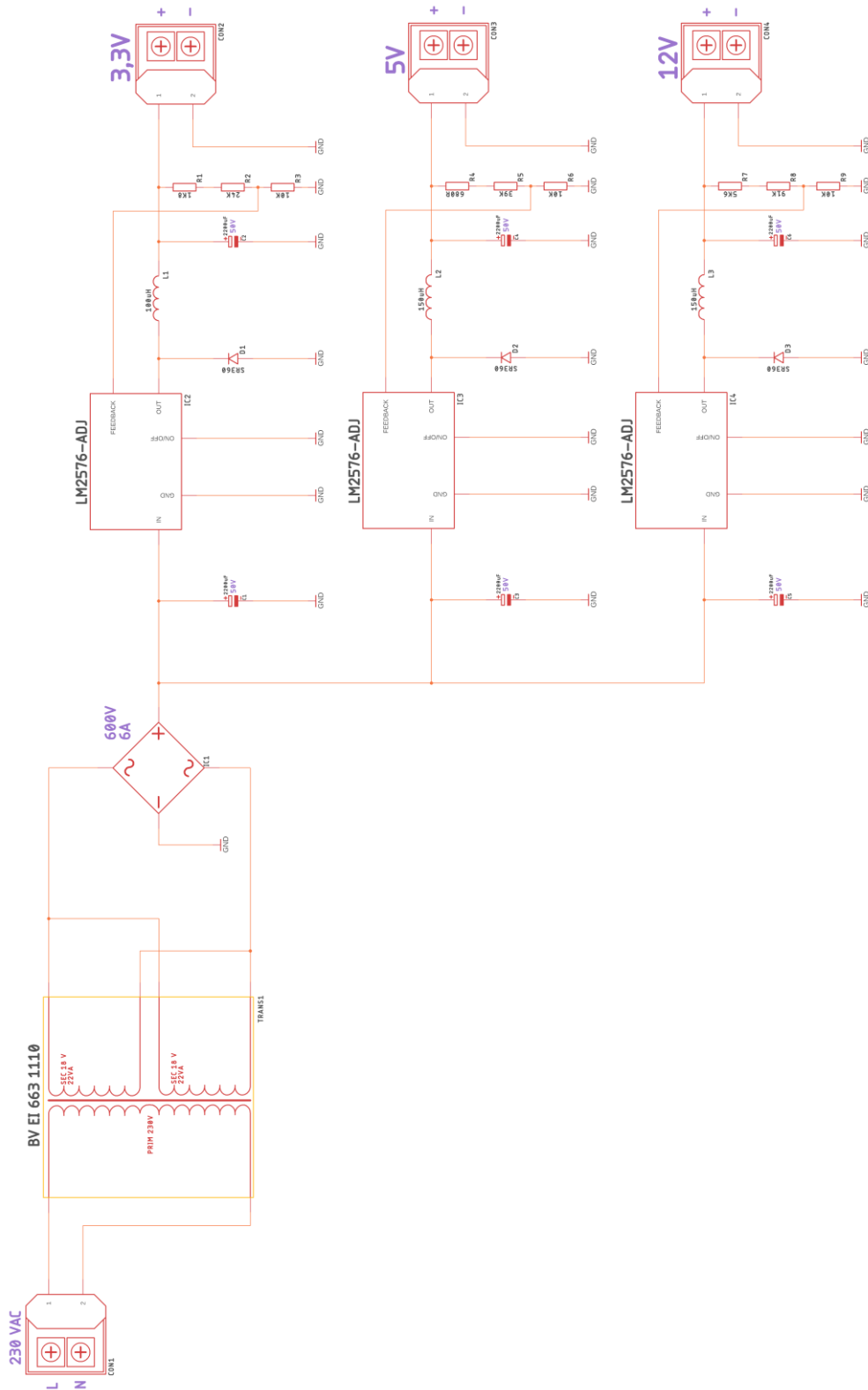
[28] Analogový pulzní regulátor jízdy 1A TFi2 / Tillig 08131. Itvlaky.cz [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.itvlaky.cz/zdroje/08131/>

[29] Analogový regulátor s výstupem pro příslušenství 0,5A/1,2A / Tillig 08132. Itvlaky.cz [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.itvlaky.cz/zdroje/08132/>

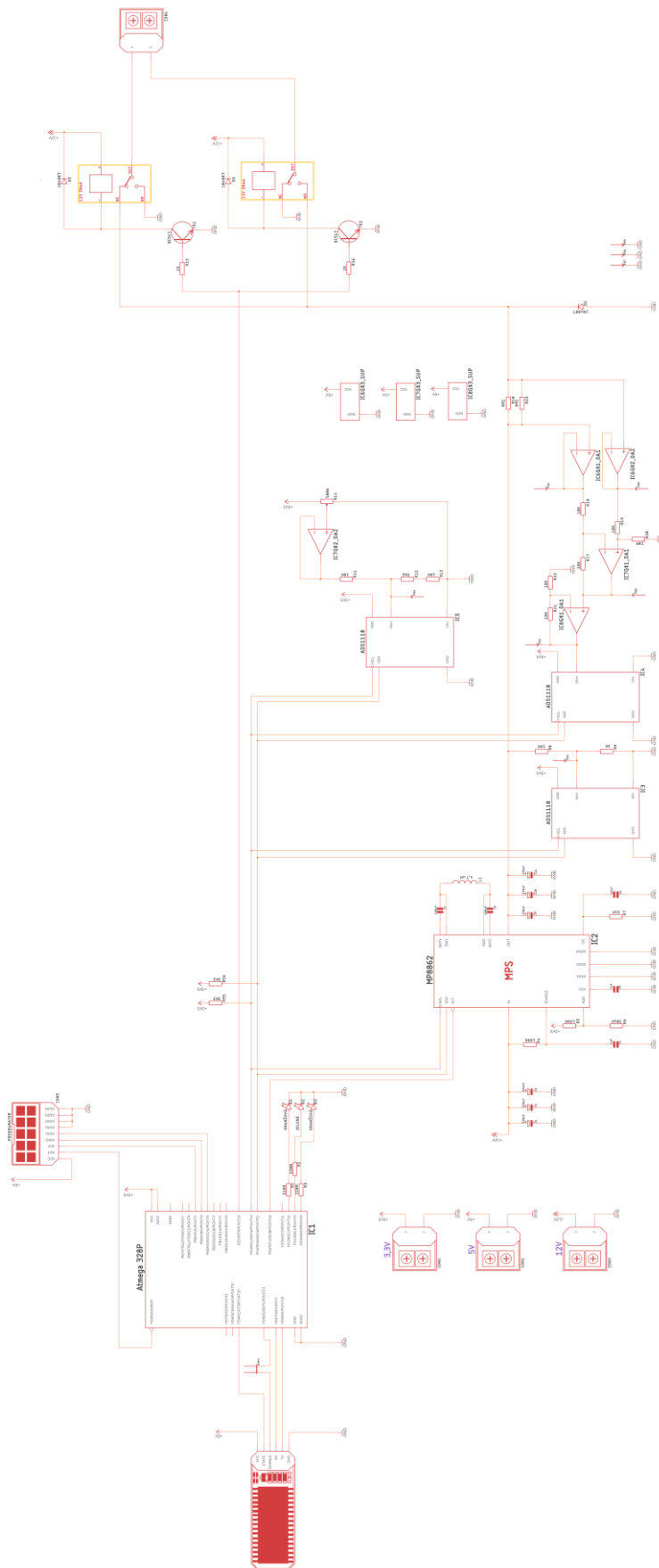
Přílohy

A Schémata zapojení

A.1 Schéma zapojení zdroje napětí pro regulační část

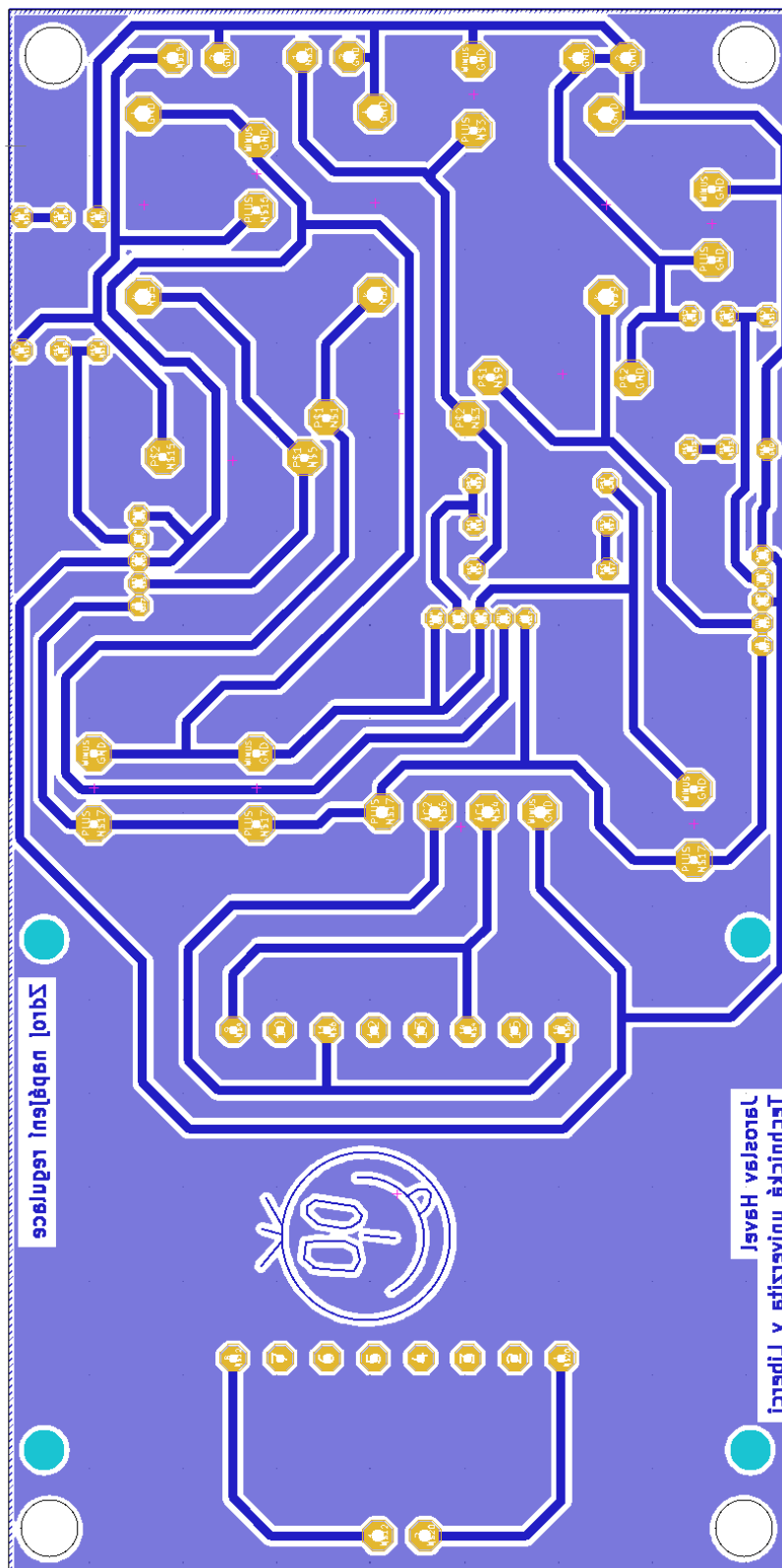


A.2 Schéma regulační části zdroj

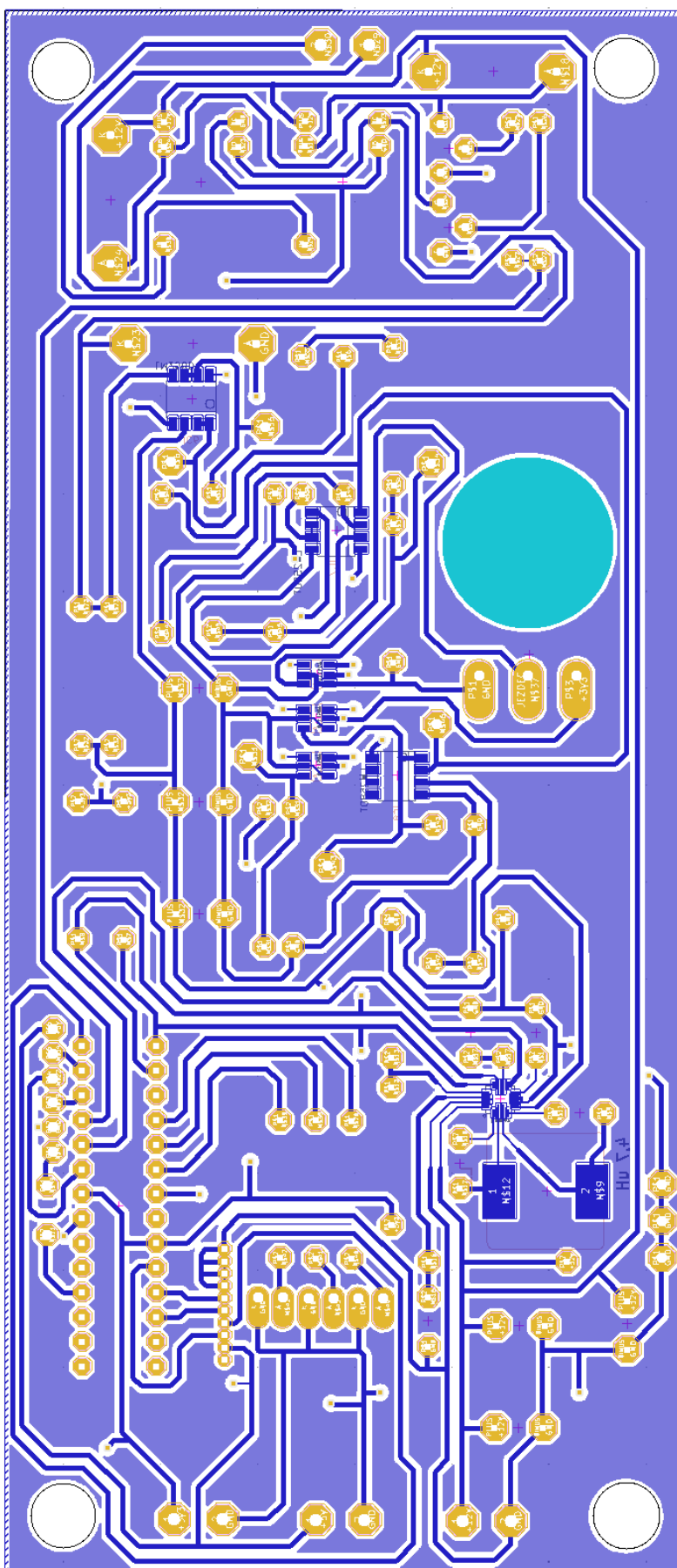


B Desky plošných spojů

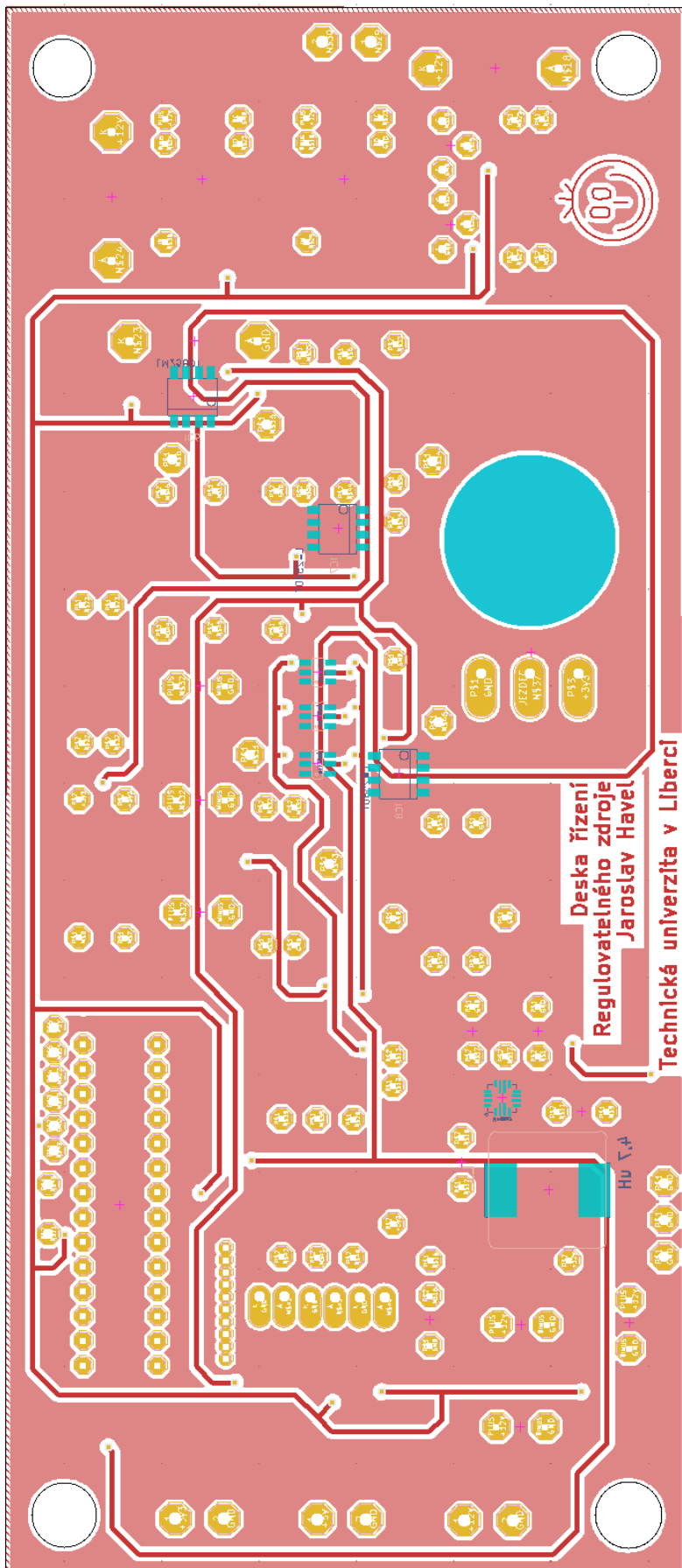
B.1 Deska zdroje napětí pro regulační část, spodní vrstva mědi



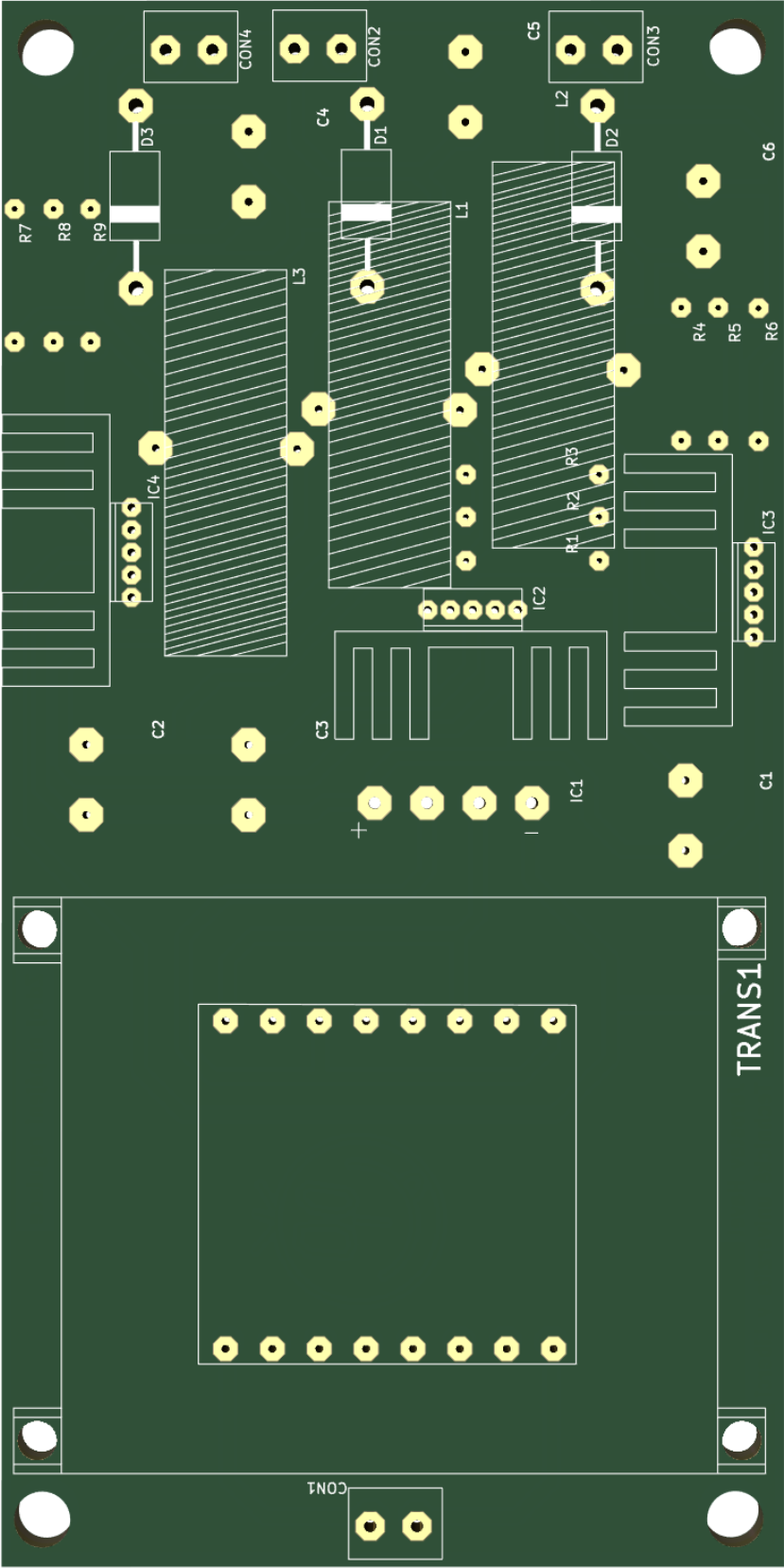
B.2 Deska regulační části výstupního napětí, spodní vrstva mědi



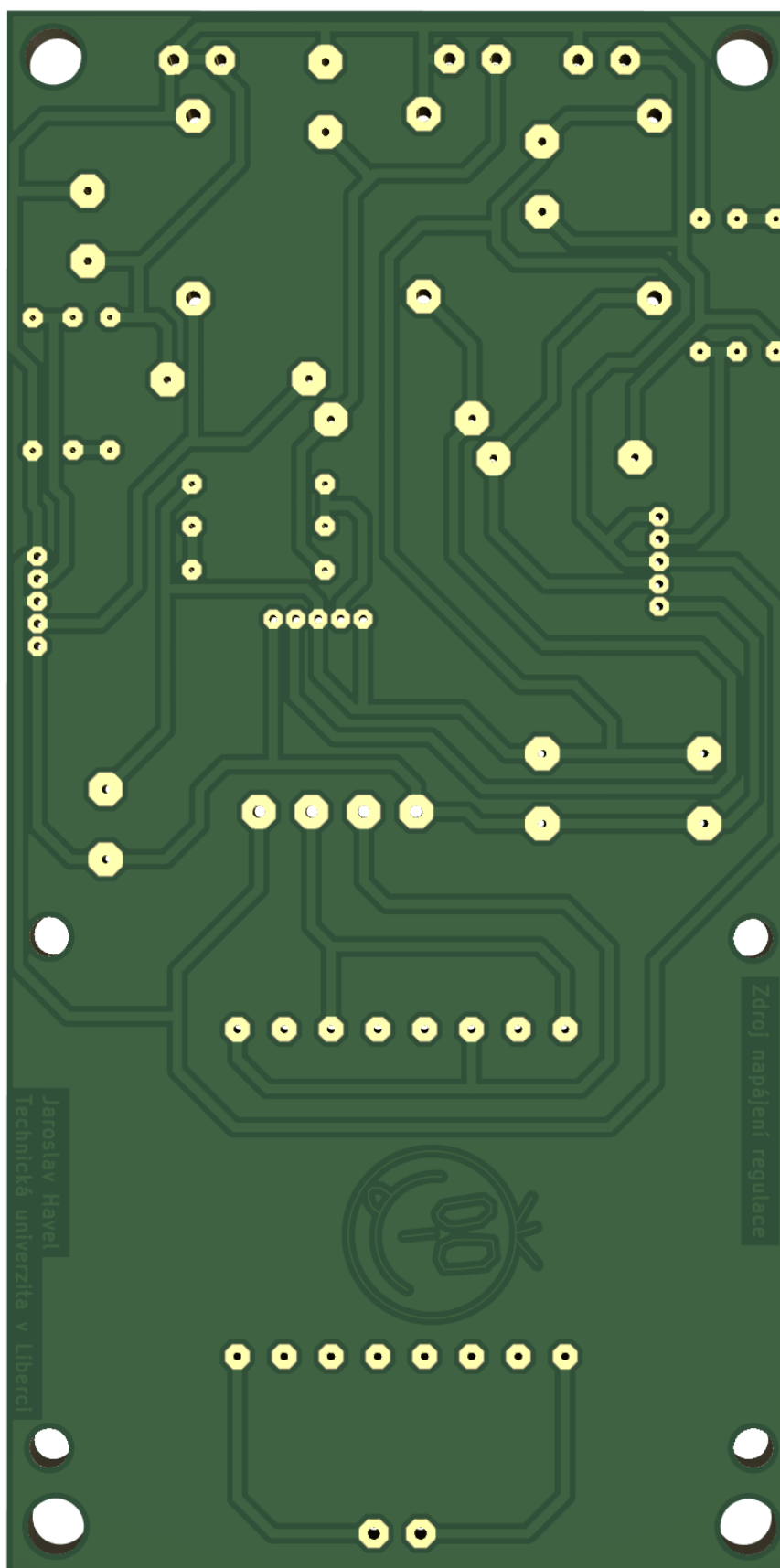
B.3 Deska regulační části výstupního napětí, horní vrstva mědi



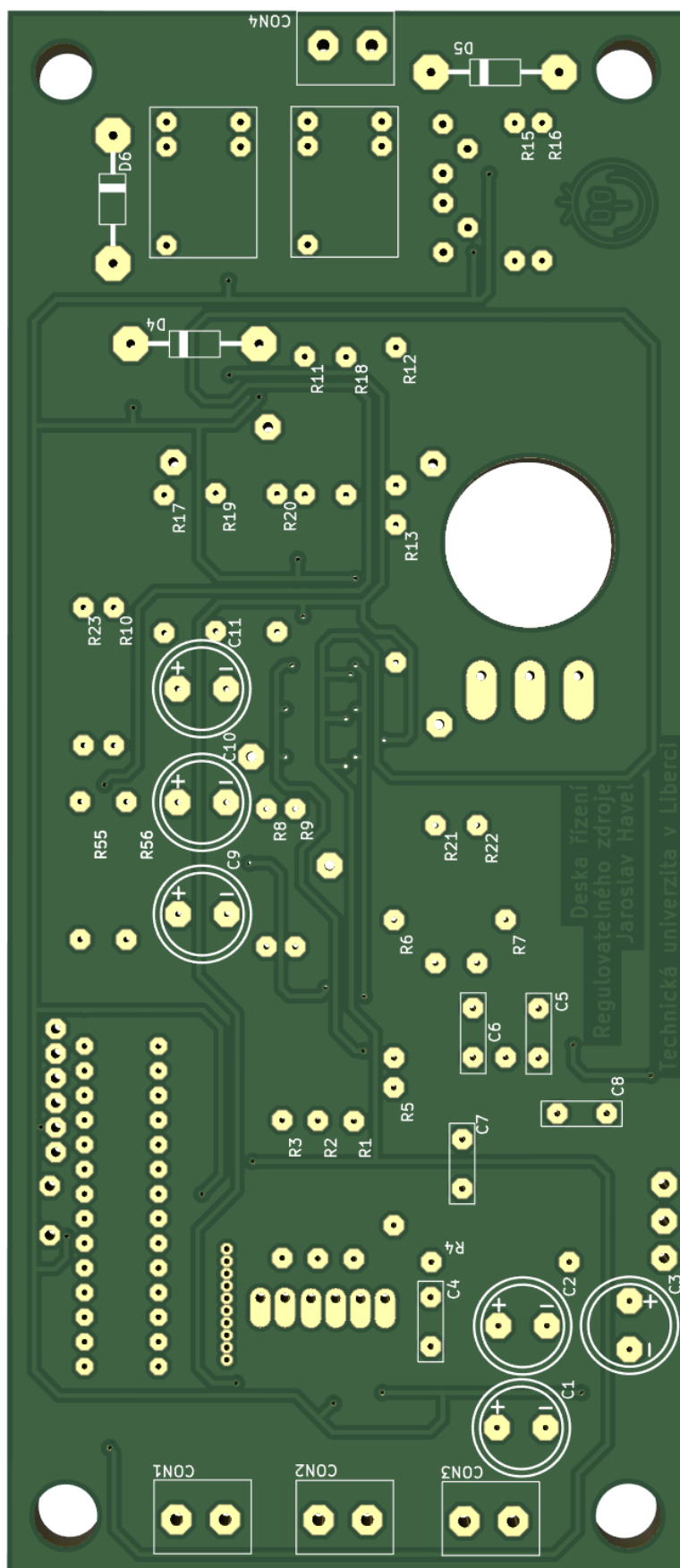
B.4 Deska zdroje napětí pro regulační část, pohled z vrchu



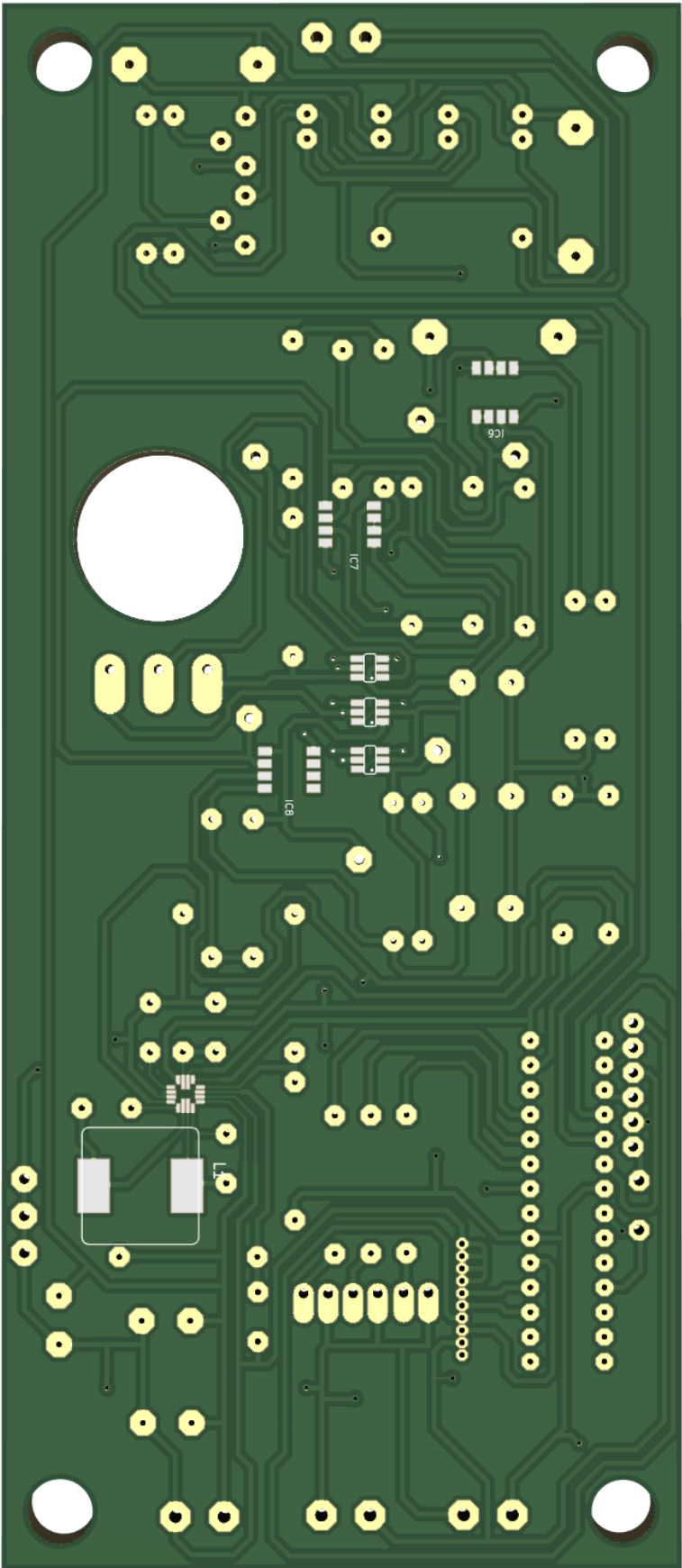
B.5 Deska zdroje napětí pro regulační část, pohled zespod



B.6 Deska regulační části výstupního napětí, pohled z vrchu



B.7 Deska regulační části výstupního napětí, pohled zespod



C GUI mobilní aplikace

