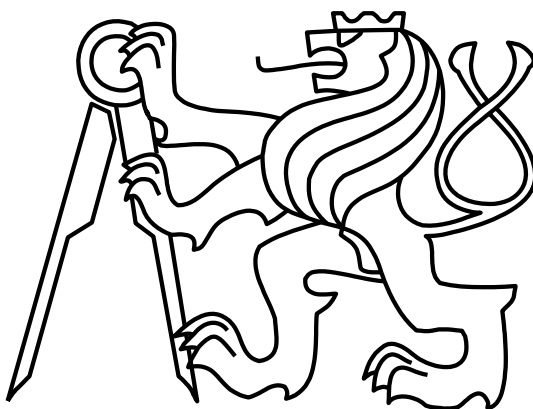


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická



Diplomová práce

**Univerzální přijímač
hromadného dálkového ovládání**

Autor: Bc. Vojtěch Sidek

Vedoucí práce: Ing. Pavel Troller, CSc.

Studijní program: Otevřená informatika, Navazující magisterský

Obor: Počítačové inženýrství

2012

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Vojtěch Sidek**

Studijní program: Otevřená informatika (magisterský)

Obor: Počítačové inženýrství

Název tématu: **Univerzální přijímač hromadného dálkového ovládání**

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a postavte prototyp mikroprocesorem řízeného přijímače signálu hromadného dálkového ovládání s následujícími vlastnostmi:

- programovatelný formát datagramu, volitelně i frekvence
- on-line výstup dekodovaných datagramů na sériové optické rozhraní
- 4 plně programovatelné reléové výstupy
- jednoduchá klávesnice a alfanumerický LCD zobrazovač pro programování a čtení stavu zařízení

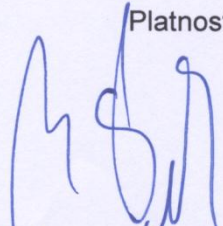
Součástí práce bude i firmware zařízení. Vyberte pro danou aplikaci optimální typ mikrokontroléru a programujte v jazyce C nebo jazyce symbolických adres.

Seznam odborné literatury:

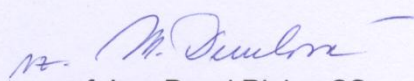
- [1] Pohorský, J.: Hromadné dálkové ovládání, BEN - technická literatura, 2002.
- [2] Technické a programátorské manuály použitého mikrokontroléru

Vedoucí: Ing. Pavel Troller, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2011/2012


prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry



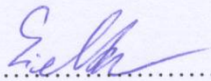

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 31. 1. 2012

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne 11. 5. 2012

.....

Podpis

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem a implementací univerzálního přijímače pro systém hromadného dálkového ovládání (HDO). Zařízení je postaveno okolo jednočipového mikrokontroléru z rodiny MSP430.

Mezi hlavní funkce patří ovládání připojených relé podle aktuálního nastavení a obsahu přijatých datagramů a jejich ukládání do paměti EEPROM včetně časového údaje, který poskytuje připojený obvod reálného času (RTC). Jako vstupní blok je použita část HDO přijímače FMX 100/300. Uživatelské rozhraní tvoří displej a několik tlačítek nebo jednoduché znakové rozhraní přes sériovou linku. Z bezpečnostních důvodů je rozhraní sériové linky galvanicky odděleno optočleny a předpokládá se použití převodníku na moderní rozhraní USB.

Abstract

This thesis describes design and implementation of universal receiver for ripple control system (HDO). Device is based on single-chip microcontroller from MSP430 family.

Main features are switching of connected relays based on current settings and content of received datagrams and storing received datagrams to EEPROM memory with time stamp provided by attached real time clock circuit (RTC). Part of HDO receiver FMX 100/300 is used as input block. User interface consists of display and couple buttons or character user interface via serial line. The serial line is galvanically isolated by optocouplers for safety reasons, it is assumed that converter to modern USB bus will be used.

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Pavlu Tollerovi, CSc. za podporu a věcné připomínky. Dále poděkování patří všem mým blízkým za podporu a trpělivost při mém studiu.

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Stanovení cílů práce.....	2
2	Rozbor	3
2.1	Impulzní povelový kód	4
2.1.1	Paralelní povelový kód.....	4
2.1.2	Sériový povelový kód	4
2.2	Přijímač FMX 100	5
2.3	Mikrokontrolér, připojení displeje a relé	7
2.4	Testování příjmu datagramů	8
2.4.1	Ukázky záznamů	9
3	Řešení – hardware	11
3.1	Mikrokontrolér.....	11
3.2	Napájecí obvod	12
3.2.1	Stabilizátor LM317	12
3.3	Připojení signálu z FMX 100.....	13
3.4	Galvanicky oddělená sériová linka.....	14
3.5	Periferie na sběrnici I ² C.....	15
3.5.1	Paměť EEPROM.....	15
3.5.2	Obvod reálného času	16
3.6	Ovládání relé.....	16
3.7	Znakový LCD displej	17
3.7.1	Nastavení jasu a kontrastu LCD.....	17
3.8	Tlačítka	18
3.9	Deska plošných spojů	19
4	Řešení – software	21
4.1	Příjem HDO datagramů	22
4.2	Fletcherův kontrolní součet	22
4.2.1	Optimalizace modulo 255	23
4.3	Datové struktury	24
4.3.1	Registr příznaků	24
4.3.2	Nastavení.....	25
4.3.3	Záznam.....	27
4.4	Znakové rozhraní	28
4.4.1	Parametry sériové linky	28
4.4.2	Příkazy znakového rozhraní.....	28
5	Závěr	29
5.1	Praktické využití	29

5.2	Návrhy budoucího vývoje	29
5.3	Závěrečné slovo autora	30
Seznam literatury		31
Seznam použitých zkratek		33
A	Podklady pro výrobu	35
A.1	Vrstvy spojů	35
A.2	Osazovací plán	36
A.3	Vrstvy popisků	37
A.4	Seznam součástek	38
A.5	Schéma	39
B	Obsah přiloženého CD	41
C	Fotodokumentace	43
C.1	Univerzální přijímač HDO	43
C.2	Testovací a vývojové verze	53
C.3	HDO přijímač FMX 100	59

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Mapa pokrytí signálem HDO v České republice.....	3
Obr. 2.2 Struktura impulzních povelových kódů používaných v ČR.....	4
Obr. 2.3 Popis propojovacího konektoru přijímače FMX 100	5
Obr. 2.4 Schéma zapojení spodní desky FMX 100	6
Obr. 2.5 Místa přerušení spojů na spodní desce FMX 100	7
Obr. 3.1 Schéma zapojení mikrokontroléru.....	11
Obr. 3.2 Schéma napájecího obvodu	12
Obr. 3.3 Schéma zapojení k propojovacímu konektoru FMX 100.....	13
Obr. 3.4 Propojení FMX 100 a optočlenu	13
Obr. 3.5 Schéma zapojení galvanicky oddělené sériové linky	14
Obr. 3.6 Schéma zapojení I ² C sběrnice	15
Obr. 3.7 Schéma zapojení ovládání relé	16
Obr. 3.8 Schéma zapojení displeje	17
Obr. 3.9 Schéma zapojení tlačítek	18
Obr. 3.10 Deska plošných spojů.....	19
Obr. 4.1 Stavový automat přijímače datagramů	22
Obr. 4.2 Algoritmus inicializace nastavení	26
Obr. A.1 Horní vrstva spojů	35
Obr. A.2 Spodní vrstva spojů	35
Obr. A.3 Osazovací plán - horní strana	36
Obr. A.4 Osazovací plán - spodní strana	36
Obr. A.5 Horní vrstva popisků	37
Obr. A.6 Spodní vrstva popisků	37
Obr. A.7 Schéma zapojení	39
Obr. C.1 Osazená deska – pohled ze strany	43
Obr. C.2 Přijímač vsazený do modifikovaného FMX 100	45
Obr. C.3 Osazená deska – pohled shora	47
Obr. C.4 Osazená deska – pohled zdola	49
Obr. C.5 Neosazená deska.....	51
Obr. C.6 Vývojová verze na kontaktním poli.....	53
Obr. C.7 Testovací přijímač na FMX 100, revize 1	55
Obr. C.8 Testovací přijímač, na modifikovaném FMX 100, revize 2	57
Obr. C.9 FMX 100 - pohled dovnitř	59
Obr. C.10 FMX 100 - zapojení svorkovnice	59
Obr. C.11 FMX 100 - spodní deska po modifikaci	61

Seznam tabulek

Tab. 4.1 Struktura registru příznaků	24
Tab. 4.2 Struktura pole nastavení.....	25
Tab. 4.3 Struktura pole záznamu	27
Tab. A.1 Seznam součástí pro konstrukci	38

1 Úvod

Systém hromadného dálkového ovládání (HDO) je v [1] definován následovně. Hromadné dálkové ovládání je řídicí a ovládací systém, který pro přenos informací využívá silnoproudou rozvodnou síť. Typické znaky HDO, kterými se odlišuje od klasického dálkového ovládání, je možné shrnout takto:

- Přenos informace z jednoho centrálního bodu současně do mnoha obvykle geograficky rozptýlených míst.
- Provoz bez zpětné signalizace o provedení nebo neprovedení povelu v místě příjmu signálu, tedy provoz s poměrně malým stupněm zabezpečení správnosti příjmu.
- Provoz s určitou nedokonalostí zabezpečení správnosti přijatého kódu.
- Téměř vždy se užívá přenosových cest s poměrně nepříznivými přenosovými vlastnostmi.
- Předpokládá se správné vykonání povelu u převážné většiny ovládacích míst (hromadný efekt), nelze zde vyloučit zcela bezchybné působení všech přijímačů v libovolném místě ovládané oblasti a v libovolném čase.
- Pro zvýšení pravděpodobnosti příjmu správného signálu se často užívá opakované vysílání povelu.

První systémy HDO byly v Evropě zaváděny ve třicátých letech dvacátého století, ale významnější rozvoj nastal až po druhé světové válce. Zpočátku se používaly vysílače v síti nízkého napětí, které byly díky technickému pokroku nahrazovány vysílači v sítích vysokého napětí, což umožňuje jednomu vysílači pokrýt větší území. Dodnes používaný formát signalizace a používaná frekvence byly zavedeny v Československu v sedmdesátých letech dvacátého století a od osmdesátých let jsou v provozu vysílače do rozvodné sítě velmi vysokého napětí 110 kV.

Systém HDO je v současné době rozšířen na většině území České republiky. Jeho hlavním účelem je regulace energetické soustavy. Při špičkových odběrech lze vypnout nekritické zátěže a naopak v případě malého odběru lze zapnout různé akumulární systémy, jako je ohřev vody, akumulární vytápění a podobné. HDO se také používá pro přepínání energetických tarifů, kdy poskytuje větší flexibilitu než pevně nastavené spínací hodiny. Další možností využití je spínání veřejného osvětlení, pro které není potřeba instalovat oddělené napájecí nebo signalizační vedení a lze flexibilně spínat jen určité skupiny lamp, podle aktuální potřeby. V neposlední řadě lze systém využít k signalizaci poplachů v případě živelných pohrom nebo svolávání poruchových energetických čet.

Běžně dostupné přijímače systému HDO lze nastavit, aby reagovaly na jeden až tři adresy, přičemž k nastavení novějších typů je potřeba speciální hlavice pro optickou komunikaci. Na trhu je také zařízení MDS5 – sledovač HDO z produkce firmy EGÚ Brno, a.s., které mimo záznamu datagramů HDO měří hodnoty napětí, proudu a účinnosti. Ani jedna z těchto možností však není pro běžného uživatele dostatečně flexibilní nebo finančně zajímavá.

1.1 Stanovení cílů práce

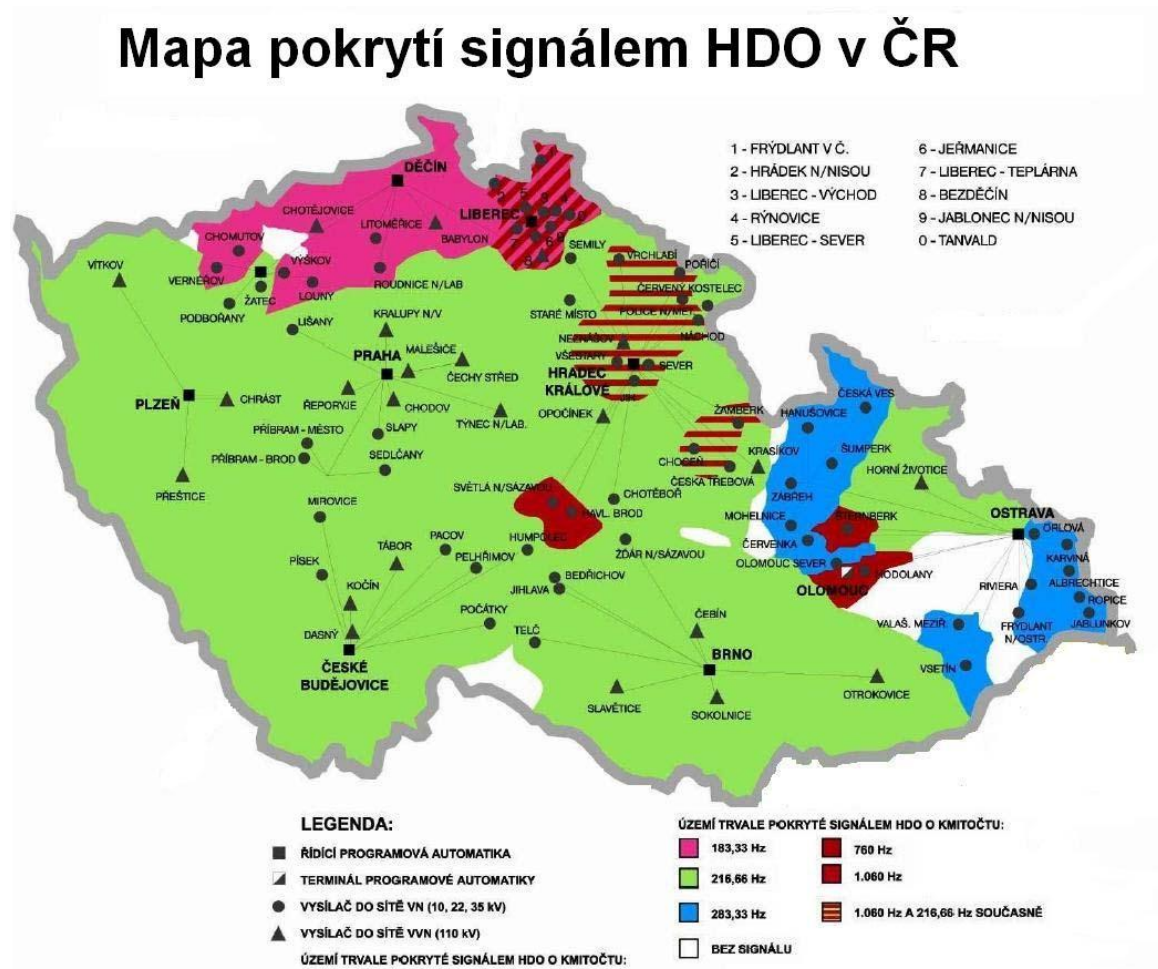
Předmětem práce je návrh a realizace prototypu zařízení pro příjem datagramů HDO s následujícími vlastnostmi:

- Ukládání datagramů do vestavěné paměti
- Zobrazení přijatých datagramů na LCD displeji a odeslání na sériovou linku
- Konfigurace přes jednoduché znakové rozhraní
- Ovládání až čtyř připojených relé podle aktuální konfigurace a obsahu datagramů

Přijímač bude postaven na bázi jednočipového mikrokontroléru, jehož firmware bude napsán v jazyce C.

2 Rozbor

Signál HDO je přenášen fázovými vodiči silnoproudé rozvodné sítě. Využívá se tónových signálů, které jsou velmi blízké síťové frekvenci 50 Hz, díky čemuž se bez výrazného útlumu přenáší i skrz transformátory. Obvykle se HDO vysílač připojuje na rozvod velmi vysokého napětí 110 kV nebo vysokého napětí a může pokrýt značně rozlehlé území. Nejčastěji se na území České republiky používá frekvence 216,66 Hz, méně časté jsou frekvence 183,33 Hz, 283,33 Hz 760 Hz a 1060 Hz. Podrobnější informace o pokrytí jsou na Obr. 2.1.



Obr. 2.1 Mapa pokrytí signálem HDO v České republice

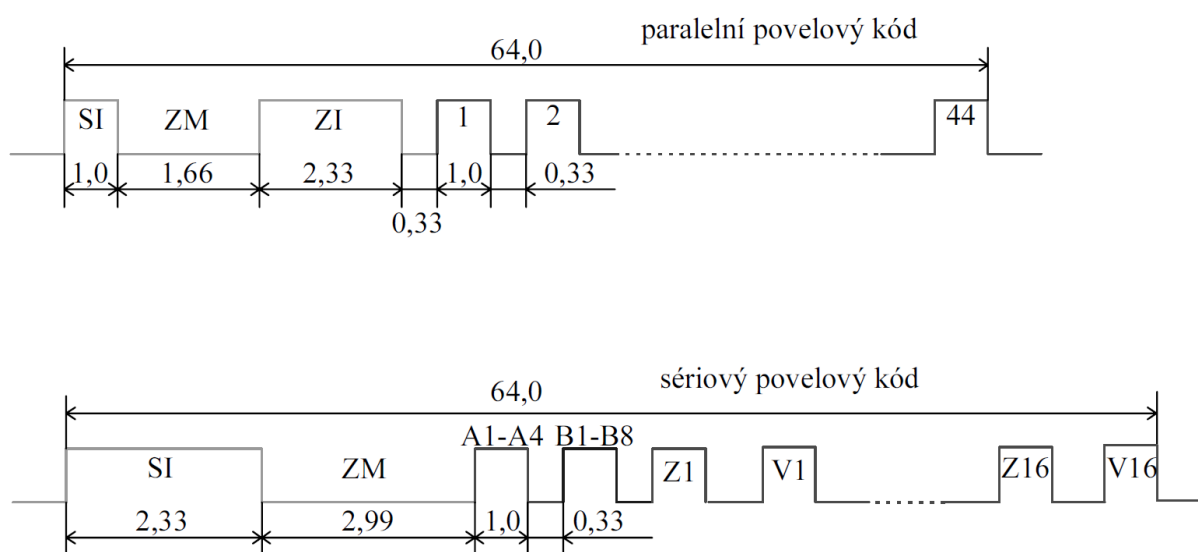
Jako vstupní blok byl vedoucím práce navržen starší typ HDO přijímače FMX 100/300 z produkce firmy ZPA Trutnov, nyní ZPA Smart Energy a.s. Popis přijímače a jeho vhodnost pro tuto práci budou podrobně popsány později.

Jako hlavní řídicí člen zařízení byl zvolen jednočipový 16-bitový mikrokontrolér z řady MSP430G2xx od firmy Texas Instruments. Konkrétně bude použit čip třetí generace, která přináší periférii UART pro sériovou linku, větší paměť RAM i Flash pro firmware a obsahuje všechny předchozí funkce řady. Díky iniciativě výrobce se jedná o jednu z nejdostupnějších platforem pro zájemce o seznámení s problematikou využití

mikrokontrolérů. Vývojový kit MSP-EXP430G2 LaunchPad Experimenter Board včetně programátoru a ladicí logiky lze pořídit v ceně pod 100 korun.

2.1 Impulzní povelový kód

Datagramy HDO se skládají z řady impulzů pevně dané délky oddělených mezerami. V České republice se používají dva typy povelových kódů, paralelní a sériový povelový kód. Společným znakem obou typů je, že začínají sekvencí startovacího impulsu a zabezpečovací mezery, jejichž délky se liší podle typu. Paralelní kód navíc obsahuje zabezpečovací impuls. Za úvodní sekvencí následuje 44 intervalů pro přenos informace. Celková délka datagramu je 63,5 sekundy. Časový průběh povelových kódů je znázorněn na Obr. 2.2.



Obr. 2.2 Struktura impulzních povelových kódů používaných v ČR

2.1.1 Paralelní povelový kód

Paralelní povelový kód nese informaci pro 44 skupin přijímačů. Přítomnost impulsu v daném intervalu znamená povel zapnout a nepřítomnost vypnout. Časová skladba impulzů v povelu je následující:

- 1,00 s – startovací impuls
- 1,66 s – zabezpečovací mezera
- 2,33 s – zabezpečovací impuls
- 0,33 s – mezera
- 1,00 s – povelový impuls/pauza
- Dvojice pauza-povel se opakuje 44 krát

2.1.2 Sériový povelový kód

Sériový povelový kód se skládá z adresní a výkonové části. Adresní část je tvořena blokem A, který je dlouhý čtyři intervaly a blokem B, pro který připadá osm intervalů. Každý interval představuje jednu adresu, čímž je možné přenášet i několik adres najednou. Výkonová část se dělí na 16 dvojic impulzů, kde první z dvojice znamená povel zapnout a druhý z dvojice znamená povel vypnout. Na rozdíl od paralelního povelového kódu je tedy pro každý povel

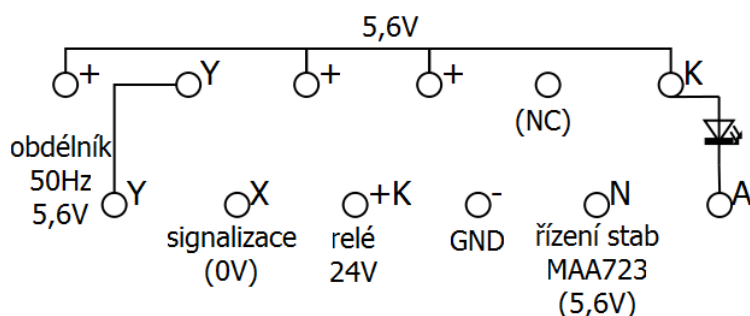
přítomen impulz. Kombinací adresní a výkonové části lze ovládat až 512 skupin přijímačů. Konkrétní skupina se obvykle označuje ve formátu AxByPz, například A1B8P12. Časová skladba impulzů v povelu je následující:

- 2,33 s – startovací impulz
- 2,99 s – zabezpečovací mezera
- 1,00 s – adresní impulz/pauza A, opakuje se 4 krát s mezerou 0,33 s
- 1,00 s – adresní impulz/pauza B, opakuje se 8 krát s mezerou 0,33 s
- 1,00 s – povelový impulz/pauza zapnout
- 0,33 s mezera
- 1,00 s – povelový impulz/pauza vypnout
- Sekvence zapnout-pauza-vypnout se opakuje 16 krát s mezerou 0,33 s, přítomen je nejvýše jeden impulz

2.2 Přijímač FMX 100

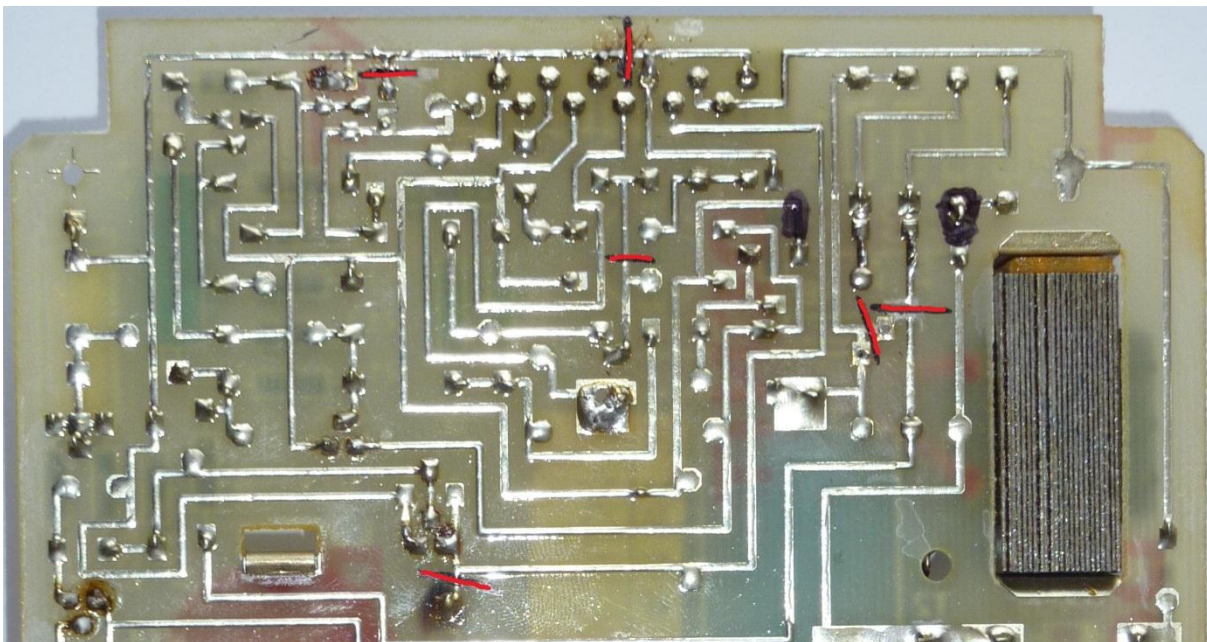
Jako vstupní blok signálu byl vedoucím práce navržen starší přijímač typu FMX 100, které se vyráběly v osmdesátých letech dvacátého století. Existuje několik variant pro sériový i paralelní povelový kód s různým počtem přepínacích relé. Jejich výhodou je převod signálu do binární podoby vyfiltrováním ze síťového napětí a detekcí tónu, navíc se dají běžně sehnat za cenu kolem dvou set korun. Nevýhodou je naladění na jednu tónovou frekvenci výrobcem.

Přijímač FMX 100 tvoří dvě desky plošných spojů, spodní filtruje signál a zajišťuje napájení a horní obsahuje řídicí integrovaný obvod, propojovací pole pro nastavení adresy, indikační LED diodu a přepínací relé. Desky leží nad sebou a jsou propojeny 12-pinovým konektorem, viz Obr. 2.3. Pomocí multimetru, jednoduchého osciloskopu a uspořádání propojů na deskách bylo zjištěno, který pin přenáší samotnou signalizaci



Obr. 2.3 Popis propojovacího konektoru přijímače FMX 100

Cílem bylo zachovat jen nezbytné minimum starého přijímače s přidáním minimálního počtu komponent pro napájení a příjem signálu. Díky nedostupnosti dokumentace bylo potřeba získat schéma zapojení spodní desky průzkumem cest a osazených komponent. Výsledné schéma je na Obr. 2.4.



Obr. 2.5 Místa přerušení spojů na spodní desce FMX 100

2.3 Mikrokontrolér, připojení displeje a relé

Ze zadání vyplývající požadavky na použitý mikrokontrolér určují pouze přítomnost periferie UART pro sériovou linku a okolo šestnácti GPIO portů. Jako cenově dostupný včetně prostředků potřebných pro vývoj, vhodně funkčně vybavený a vzhledem k dosavadním zkušenostem autora práce byl zvolen typ z řady MSP430G2xx3 od výrobce Texas Instruments. Mikrokontrolér obsahuje 16-bitové RISC jádro, v DIP provedení 16 GPIO portů, periferie UART, I2C, SPI, 2 časovače a generátor pracovní frekvence. Jednotlivé modely se liší přítomností dalších periférií, velikostí pamětí RAM a Flash a počtem pinů.

Zvolen byl znakový displej s řadičem HD44780. Jedná se o velmi rozšířený a osvědčený řadič, který se v průběhu let stal nepsaným standardem. Vzhledem k přítomnosti rozhraní s 8-bitovou paralelní sběrnici bude displej k mikrokontroléru připojen přes posuvný registr, čímž se výrazně sníží počet potřebných GPIO portů. Displej potřebuje ke své funkci napětí 5 V, avšak je kompatibilní s TTL logickými úrovněmi a jednosměrná komunikace je možná s 3,3 V CMOS logikou.

Relé je vzhledem vyššímu spínacímu napětí a odběru nutné připojit přes spínací tranzistor. Požadavkem je připojit několik bistabilních relé, proto bude využito tranzistorové pole pro spínání indukční zátěže s integrovanou ochrannou diodou. Opět bude pro snížení počtu potřebných portů využit posuvný registr, který bude sdílet porty s posuvným registrem pro displej. Podrobný popis zapojení bude popsán v následující kapitole.

2.4 Testování příjmu datagramů

Aby byl zajištěn bezproblémový příjem datagramů, bylo provedeno několik testů přijímače FMX 100 a možných připojení k mikrokontroléru (MCU). Nejprve byly sledovány průběhy napětí na pinu X propojovacího konektoru, zda odpovídají teoretickým předpokladům, což bylo pozorováním průběhů potvrzeno.

Signál HDO stále nepokrývá celé území České republiky a v průběhu dne je vysláno jen několik set datagramů. Pro usnadnění vývoje byl na kitu MSP-EXP430G2 LaunchPad Experimenter Board (dále jen LaunchPad) naprogramován jednoduchý simulátor vysílače HDO datagramů. Po připojení přes sériovou linku lze do MCU poslat bitovou sekvenci datagramu, která je následně vyslána s potřebným časováním a startovací sekvencí přes výstupní port. K vizuální kontrole byl využit port s připojenou LED diodou.

Následujícím krokem bylo sestrojení jednoduchého přijímače, který byl postaven okolo desky LaunchPad. Připojen byl LCD displej zobrazující přijaté datagramy. Vzhledem k vyšší napěťové úrovni signálu z FMX 100 bylo propojení realizováno přes bipolární NPN tranzistor v zapojení s otevřeným kolektorem. Funkčnost přijímače byla ověřena simulátorem a následně i připojením k FMX 100, kdy bylo úspěšně přijato a dekodováno několik datagramů.

Další fáze testů měla za úkol ověřit, zda je v delším časovém horizontu signál z FMX 100 dostatečně kvalitní a bez zákmitů. Přijímač byl rozšířen o ukládání datagramů a chybových stavů do integrované paměti Flash. Záznam prokázal chybný příjem zhruba 10 % datagramů. Proto byl přijímač rozšířen o ukládání chybových stavů včetně délky posledního pulzu nebo mezery a orientační časový údaj, který udával počet sekund od posledního restartu. Chybové pulzy nebo mezery měly podle nasbíraných dat délku nejvýše několika setin sekundy. Občasné zákmity při změně logické úrovně byly následně prokázány i měřením osciloskopem. Jako řešení tohoto problému bylo navrženo vložení RC článku s vhodnou časovou konstantou, aby došlo k potlačení zákmitů bez narušení korektního příjmu. Popis zapojení a výběr hodnot použitých součástek je popsán v následující kapitole.

Pro ověření funkčnosti přijímače FMX 100 po úpravách, navržených v části 2.2, byl vývojový prototyp dále rozšířen o lineární stabilizátor napětí LM317. Napětí bylo nastaveno na stejnou hodnotu, kterou poskytoval původní zdroj, tedy 5,6 V. Připojení MCU bylo tentokrát realizováno optočlenem s tranzistorem, před který byla předřazena indikační LED dioda. Toto zapojení bylo použito i ve finálním návrhu. Všechny části pracovaly bez problému, kromě předchozích problémů se zákmity.

Následně byl do obvodu přidán kondenzátor s kapacitou 10 uF a spolu s 2 k Ω rezistorem před LED vytvořil RC článek s vhodnou časovou konstantou. Po této úpravě se již v záznamu neobjevily žádné datagramy porušené zákmity.

V průběhu testování byly zachyceny pouze datagramy se sériovým povelovým kódem. Testování probíhalo v oblasti vysílače Horní Životice.

2.4.1 Ukázky záznamů

Pokud nedojde ke správnému zachycení startovací sekvence, jsou datové pulzy zachyceny jako chybné.

Záznam z přijímače bez přítomnosti RC článku:

```
A1000B00100001P00_0____0____ +14:23 m:s
S 0,00342s +18:20 m:s
A1000B00010000P__0_____ +19:23 m:s
S 0,00378s +20:16 m:s
S 1,02966s +20:22 m:s
S 1,03186s +20:37 m:s
S 1,03290s +20:40 m:s
S 0,00281s +20:41 m:s
S 1,03088s +20:42 m:s
A1000B00000100P____0_____ +44:24 m:s
A1000B00000001P____0_____ +49:22 m:s
A1000B00000101P____0_____ +74:24 m:s
A1000B01010000P__1____1____ +99:23 m:s
A1000B00000010P__1____1____ +100:42 m:s
A1000B00000001P____0_____ +104:24 m:s
S 0,00159s +118:19 m:s
N 0,00043s +118:22 m:s
S 1,03394s +118:26 m:s
S 0,00348s +118:31 m:s
S 1,01941s +118:32 m:s
S 1,03101s +118:49 m:s
S 1,02435s +119:19 m:s
S 0,00244s +123:23 m:s
A1000B00000100P__0_____ +124:26 m:s
A0010B00110000P__1____1____ +125:46 m:s
A1000B10000000P__0____0____ +134:25 m:s
A1000B00000101P____0_0_0_ +135:44 m:s
A0010B10000000P____0_____ +137:3 m:s
A1000B11101110P00_000____0_0 +147:23 m:s
A1000B00111110P00_00_0____0_0 +148:44 m:s
A1000B00000001P00_0000____ +150:4 m:s
A0010B10000000P____00_____ +151:23 m:s
A0010B00110000P____0_____ +152:43 m:s
A0010B10000000P____00_____ +164:22 m:s
S 0,00269s +183:20 m:s
A0010B00100000P__1____1____ +184:23 m:s
A0010B00010000P__1____1____ +185:43 m:s
A1000B00010000P__1____1____ +191:21 m:s
S 0,00262s +193:21 m:s
A1000B00000010P____1_____ +194:24 m:s
A0010B10000000P____000____ +195:43 m:s
S 0,00354s +198:20 m:s
A1000B00010000P____1____1____ +199:23 m:s
A1000B00000010P__1____1____ +209:24 m:s
A1000B00010000P__1____1____ +224:26 m:s
A0010B10000000P____0000____ +225:45 m:s
A1000B10000000P__1____1____ +227:4 m:s
A1000B11000000P__1____1____ +228:24 m:s
S 0,00311s +253:22 m:s
A1000B11000000P____1_01____1011 +254:25 m:s
A1000B01100000P11____1____ +255:47 m:s
S 0,00195s +256:4 m:s
```

Záznam z přijímače obsahujícího RC článek:

A0010B00110000P_____0_____	+2:7 m:s
A1000B00010000P____1_____	+5:50 m:s
A1000B00010000P00_____	+9:51 m:s
A1000B00010000P____1_____	+14:51 m:s
A1000B00000100P____1_____	+25:50 m:s
A1000B10000100P11_____	+34:53 m:s
A1000B00000001P____1_____	+41:51 m:s
A1000B11000000P____0_____	+49:51 m:s
A1000B00000100P____1_____	+51:11 m:s
A1000B00000100P_____0_0	+52:30 m:s
A1000B01000000P11_____	+69:52 m:s
A1000B10000100P00_____	+94:49 m:s
A1000B00000001P__1____1_____	+99:52 m:s
A1000B00000010P11_____	+104:51 m:s
A1010B10000000P00__0_00__0_0	+112:51 m:s
A1000B01000000P____0_00__0_0	+114:11 m:s
A1000B00011010P11_____0_0	+115:31 m:s
A1000B00100000P____000_____	+116:50 m:s
A1000B00001000P____00_0_____	+118:10 m:s
A1000B00000100P00____0____0_0	+119:29 m:s
A1000B00000010P____0_____	+120:48 m:s
A1000B00000001P00____0_____	+122:7 m:s
A0010B00110000P____0_____	+123:26 m:s
A1000B01000000P00_____	+129:50 m:s
A1000B00000001P00_____	+136:50 m:s
A1000B00000100P__1_____	+149:51 m:s
A1001B01110110P____0_1__0__	+159:52 m:s
A1000B00000010P00_____	+161:11 m:s
A0001B10000000P____0____0__	+162:30 m:s
A1000B00010000P00_____	+172:51 m:s
A1000B00010000P____0_____	+179:52 m:s
A0100B00000001P____1_____	+188:52 m:s
A1000B11000000P____1____1__	+219:53 m:s
A1000B00000010P____0_____	+221:13 m:s
A1000B00000010P____0_____	+264:52 m:s
A1000B11000000P__1_____	+269:50 m:s
A1000B00101000P0__0_____	+279:52 m:s
A1000B00000010P____1_____	+281:11 m:s
A0011B11000000P____0____1__	+282:30 m:s
A1000B00000001P11_____	+283:51 m:s
A1000B00010000P____1_____	+301:49 m:s
A1000B01010010P__0____0____	+304:50 m:s
A0010B10000000P____11_____	+309:50 m:s
A1000B01000000P____0____0__	+324:52 m:s
A1000B00001000P____0_____	+337:51 m:s
A1000B11000000P____0____0__	+339:52 m:s
A1000B000000101P00__1____1__	+341:13 m:s
A0010B10000000P____111_____	+342:32 m:s
A1000B00000001P00_____	+346:47 m:s
A1000B00010000P____0_____	+349:49 m:s
A1000B10000000P____0_____	+369:53 m:s
A0010B10000000P____1111_____	+371:13 m:s
A0010B00110000P__0____0____	+372:33 m:s
A1000B00000010P____1_____	+389:51 m:s
A1000B11000000P____0_10__1101	+399:56 m:s
A1000B00110110P__1____0____1_01	+401:15 m:s

3 Řešení – hardware

Po upřesnění zadání vedoucím práce byla přidána funkce ukládání záznamů spolu s časovým údajem. Vzhledem k omezené velikosti Flash paměti MCU a nemožnosti přepisovat tento typ paměti po malých blocích byly do návrhu přidán obvod paměti EEPROM s kapacitou 64 kB. Připojen je na sběrnici I²C spolu s obvodem reálného času (RTC) s bateriovou zálohou napájení, zvolen byl typ DS1338. RTC obvod zároveň slouží jako zdroj frekvence pro časovač algoritmu přijímače a uživatelská část paměti NV RAM slouží k ukládání nastavení v případě výpadku napájení.

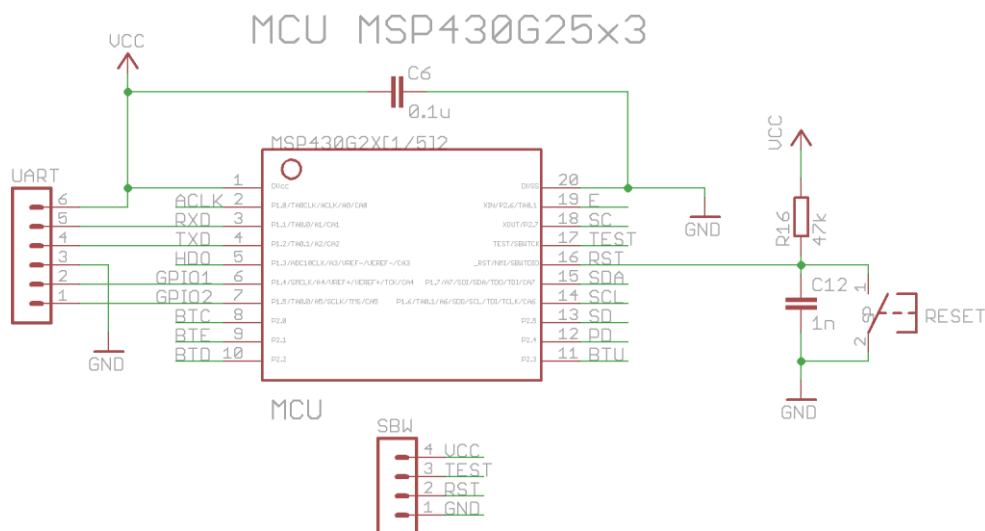
Hodnoty rezistorů a kondenzátorů byly voleny tak, aby jich byl minimální počet za dodržení požadovaných parametrů.

3.1 Mikrokontrolér

Z řady MSP430 byl zvolen model MSP430G2553IN20, ale jelikož v návrhu nebyly využity periferie pro analogové vstupy, lze použít kterýkoli model z řady Value Line třetí generace (MSP430G2xx3) s dostatečně velkou pamětí v DIP pouzdře. Pro současnou verzi firmwaru je potřeba alespoň 8 KB Flash paměti.

Zvolený model je dodáván s poslední verzí kitu LaunchPad. Obsahuje všechny potřebné periferie, tedy UART pro sériovou komunikaci, I²C sběrnici, časovač s externím vstupem hodinového signálu a 16 GPIO portů. Frekvenci pro jádro poskytuje integrovaný generátor, pro nějž jsou z výroby v informačním bloku Flash paměti uloženy kalibrační konstanty pro 1, 8, 12 a 16 MHz.

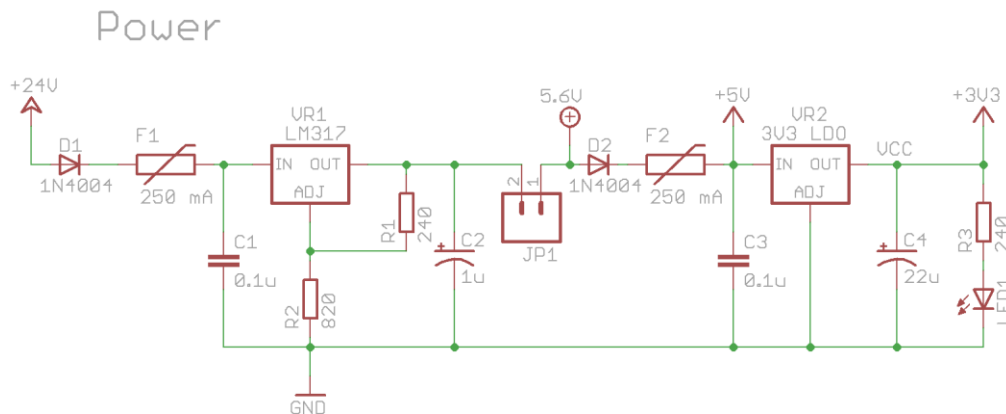
Schéma zapojení MCU je na Obr. 3.1, na konektorovou lištu bylo vyvedeno programovací rozhraní Spy-Bi-Wire (SBW), sériová linka a dva nepoužité GPIO porty. Dále je připojeno tlačítko k resetování systému s pull-up rezistorem podle doporučení výrobce [4]. Blokování napájení zajišťuje keramický kondenzátor.



Obr. 3.1 Schéma zapojení mikrokontroléru

3.2 Napájecí obvod

Napájení je složeno ze dvou úrovní. Pokud je použit modifikovaný přijímač FMX 100, první úroveň nahrazuje původní zdroj 5,6 V a musí být propojen spoj JP1. Při použití nemodifikovaného FMX 100 musí být JP1 rozpojený a napájení poskytuje spodní deska, v tomto případě nemusí být komponenty před JP1 osazeny, viz Obr. 3.2. Druhá úroveň dodává napětí 3,3 V pro MCU a ostatní obvody, je použit low drop lineární stabilizátor přednastavený na toto napětí. Diody D1 a D2 slouží jako ochrana proti přepólování, vratné pojistky F1 a F2 zajišťují ochranu proti zkratu. Dioda D2 zároveň snižuje napětí na přibližně 5 V potřebných pro provoz displeje. LED1 plní funkci kontrolky napájení.



Obr. 3.2 Schéma napájecího obvodu

3.2.1 Stabilizátor LM317

V první úrovni napájení je použit lineární stabilizátor LM317, neboť 5,6 V nepatří mezi standardně používaná napětí, pro která jsou dodávány přednastavené stabilizátory. Jeho výhodou je také široké rozpětí vstupních napětí, usměrňovač v FMX 100 dodává 24 V.

Hodnoty odporů R_1 a R_2 je nutné vhodně zvolit aby, byl dodržen minimální výstupní proud a dosaženo požadované výstupní hodnoty. Velikost odporu R_1 byla zvolena 240 Ω podle doporučení v [19]. Výstupní napětí určuje následující vztah:

$$U_{out} = U_{ref} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + (I_{adj} \cdot R_2)$$

Po vyjádření R_2 a dosazení hodnot podle [19] získáme potřebnou hodnotu odporu.

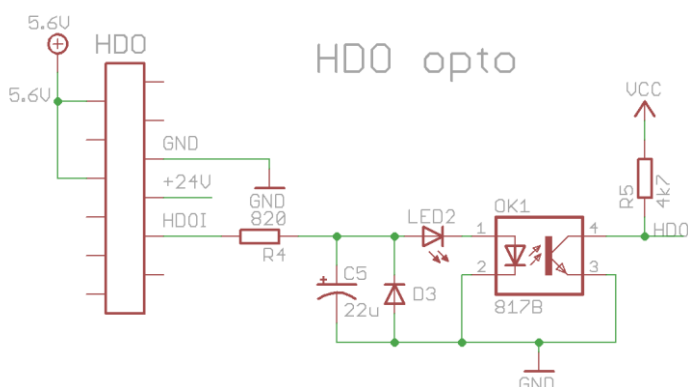
$$R_2 = \frac{U_{out} - U_{ref}}{\frac{U_{ref}}{R_1} + I_{adj}} = \frac{5,6 - 1,25}{\frac{1,25}{240} + 50 \cdot 10^{-6}} = 827 \Omega$$

Hodnotu R_2 zvolíme jako nejbližší z běžně dostupných hodnot, tedy 820 Ω , dosadíme do vztahu pro výstupní napětí a pro kontrolu vypočteme očekávanou hodnotu.

$$U_{out} = 1,25 \left(1 + \frac{820}{240} \right) + (20 \cdot 10^{-6} \cdot 820) = 5,56 V$$

3.3 Připojení signálu z FMX 100

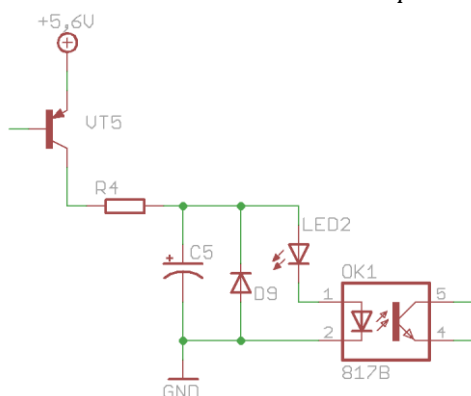
Napěťové úrovně z FMX 100 je potřeba převést na úrovně akceptované MCU, které určuje druhá úroveň napájení, tedy 3,3 V CMOS. Jednou z možností je použít tranzistor v zapojení s otevřeným kolektorem a pull-up rezistor na 3,3 V. Varianta poskytující větší bezpečnost je použití optočlenu místo tranzistoru. Dále, jak bylo v části 2.4 zjištěno, je potřeba zařadit RC článek filtrující zákmitý signál. Schéma zapojení je na Obr. 3.3. Dioda D3 plní ochrannou funkci. LED2 vizuálně indikuje přijímaný signál a zároveň zvyšuje potřebnou úroveň napětí na kondenzátoru, od které prochází sérií diod proud.



Obr. 3.3 Schéma zapojení k propojovacímu konektoru FMX 100

K sepnutí optočlenu stačí proud v řádu jednotek miliampér, proto zvolíme odpor 820 Ω , již použitý v napájecím obvodu. Od napájecího napětí je ve výpočtu nutné odečíst úbytek napětí na přechodu kolektor-emitor (tranzistor v FMX 100), LED (červené barvy) a diodě optočlenu. Pro názornější představu je zapojení rozkresleno na Obr. 3.4. Dosazením do Ohmova zákona získáme hodnotu proudu diodou optočlenu:

$$I_F = \frac{U_{HDO} - U_{CE} - U_{Fopto} - U_{Fred}}{R_F} = \frac{5,6 - 0,3 - 1,2 - 1,8}{820} = 2,80 \text{ mA}$$



Obr. 3.4 Propojení FMX 100 a optočlenu

Na základě zvolené hodnoty odporu je potřeba vypočíst požadovanou kapacitu kondenzátoru pro RC článek, který funguje, jako dolní propust'. Vzhledem k pomalým průběhům HDO signálu a délkám zákmitů změřených při testování byla zvolena frekvence

kolem 10 Hz. Z následujícího vztahu vyjádříme kapacitu, dosadíme požadované hodnoty a získáme hledanou hodnotu:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R_F \cdot C}$$

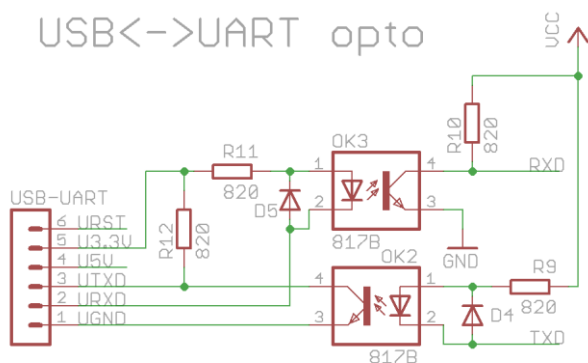
$$C = \frac{1}{2\pi \cdot R_F \cdot f_c} = \frac{1}{2\pi \cdot 820 \cdot 10} = 19,41 \mu F$$

Zvolíme elektrolytický kondenzátor s kapacitou 22 uF, použitý také v napájecím obvodu, a spočteme frekvenci:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R_F \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 820 \cdot 22 \cdot 10^{-6}} = 8,82 \text{ Hz}$$

3.4 Galvanicky oddělená sériová linka

Aby se předešlo problémům se zemnicími smyčkami a zvýšila se bezpečnost, je sériová linka galvanicky oddělená přes optočleny. Proud diodou je spínán katodou, čímž nedojde k inverzi signálu. K výstupní části je tedy nutné přivést vlastní napájení, proto je doporučeno využití některého z převodníků z rozhraní UART na USB, které emulují sériový port. Použit byl model s čipem CP2102 od společnosti SiLabs. Je možné použít také převodníky s čipy FTDI FT232 nebo Prolific PL2303. Ovladače všech tří čipů jsou dostupné nejen pro operační systém Windows, ale i pro Linux. Dostupná jsou řešení i od dalších výrobců, ale dostupnost ovladačů je obvykle problematická. Použitý převodník by měl poskytovat napájecí napětí 3,3 V. Při napětí 5 V již může docházet k saturaci tranzistoru optočlenu a komunikace bude nespolehlivá.



Obr. 3.5 Schéma zapojení galvanicky oddělené sériové linky

K sepnutí optočlenu stačí proud jen několik jednotek miliampér, proto byl zvolen již použitý rezistor s odporem 820 Ω. Parametry optočlenu byly převzaty z [14]. Proud diodou spočteme podle Ohmova zákona:

$$I_F = \frac{U - U_F}{R_F} = \frac{3,3 - 1,2}{820} = 2,56 \text{ mA}$$

Spočteme maximální proud kolektor-emitor tranzistorem vzhledem k velikosti proudu diodou:

$$I_{CEmax} = I_F \cdot CTR = 2,56 \cdot 1,70 = 4,35 \text{ mA}$$

Aby nedocházelo k saturaci, musí být odpor pull-up rezistoru nejvýše:

$$R_C = \frac{U}{I_{CEmax}} = \frac{3,3}{4,35} = 759 \, \Omega$$

Zvolíme opět rezistor 820 Ω a spočteme koeficient saturace:

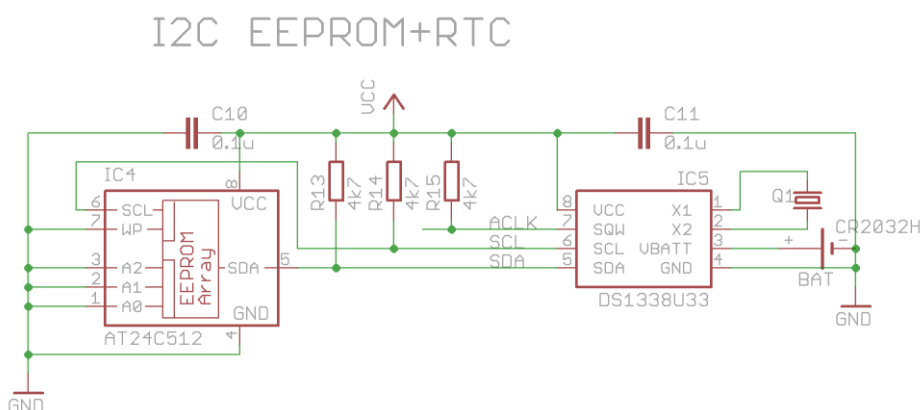
$$I_{CEreal} = \frac{U}{R_C} = \frac{3,3}{820} = 4,02 \text{ mA}$$

$$K_{SAT} = \frac{I_{CEmax}}{I_{CEreal}} = 1,08 \approx 1$$

Koeficient saturace vyšel blízky jedné a nemělo by docházet k narušení komunikace po sériové lince. Při vysokém koeficientu saturace, přibližně 2 a více, stoupá zpoždění tranzistoru při vypnutí a vzhledem k asynchronní povaze rozhraní UART je narušeno časování přenášeného signálu.

3.5 Periferie na sběrnici I²C

Paměť EEPROM a obvod reálného času jsou připojeny na sběrnici I²C. Její výhodou je nízký počet obsazených portů MCU a možnost připojit mnoho zařízení bez navýšení počtu portů, na rozdíl od rozhraní SPI. Budiče sběrnice pracují v režimu open-drain s externím pull-up rezistorem.



Obr. 3.6 Schéma zapojení I²C sběrnice

3.5.1 Paměť EEPROM

Vybrán byl typ s maximální možnou kapacitou při 16-bitové adresaci po bajtech, tedy 64 kB, konkrétně AT24C512. Ze sedmi bitů adresy zařízení na I²C sběrnici jsou nejnižší tři nastavitelné, připojením na zem je vybrána adresa 0xA0. Pin WP je taktéž připojen na zem, což znamená, že zápis je možný bez omezení. Blokování napájení zajišťuje keramický kondenzátor 100 nF.

3.5.2 Obvod reálného času

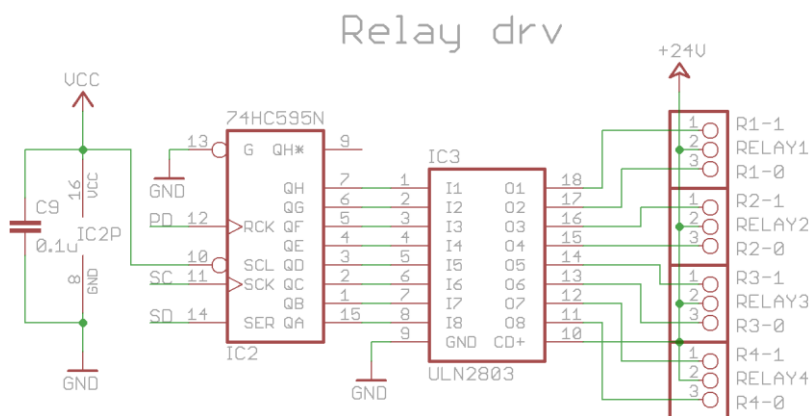
Pro obvod reálného času (RTC) byl požadován model s bateriovou zálohou, kompatibilní s napájením 3,3 V a výstupem frekvence oscilátoru. Z dostupných typů byl i díky přítomnosti uživatelské paměti NV RAM vybrán DS1338U33 od společnosti Maxim. Integrovaná paměť je využita pro uložení nastavení. Připojený krystal, s jmenovitou frekvencí 32 768 Hz, zajišťuje generování přesné frekvence, při pokojové teplotě udává výrobce odchylku do 20 ppm [21]. Výstup frekvence oscilátoru je přiveden na vstup hodinového signálu časovače, který zajišťuje příjem datagramů HDO. K zálohování napájení slouží knoflíková lithiová baterie s jmenovitým napětím 3 V. Blokování napájení zajišťuje keramický kondenzátor 100 nF.

3.6 Ovládání relé

Připojení až čtyř bistabilních relé je řešeno přes tranzistorové pole ULN2803A, které je uzpůsobené ke spínání indukční zátěže a obsahuje ochranné diody zapojené antiparalelně k zátěži. Schéma zapojení včetně označení signálů je na Obr. 3.7.

Aby se ušetřily GPIO porty MCU je tranzistorové pole řízeno přes posuvný registr 74HC595 s integrovaným výstupním registrem. Funkce třístavového výstupu a mazání registr nejsou využity, jejich ovládací signály jsou napevno připojeny k odpovídající logické úrovni podle [12]. Hodinový signál SC a datový signál SD, ovládající vstupní registr, jsou sdíleny se signály pro posuvný registr u LCD displeje. Platnost dat určuje signál PD, který zajistí přesun dat ze vstupního do výstupního registru. Blokování napájení registru zajišťuje keramický kondenzátor 100 nF.

Na desce je pro každé relé vyveden třípinový konektor, prostřední pin je připojen na napájecí napětí a dva krajní piny spínají jednotlivé cívky relé. V případě nevyužití ovládání relé nemusí být celý blok na desce osazen.



Obr. 3.7 Schéma zapojení ovládání relé

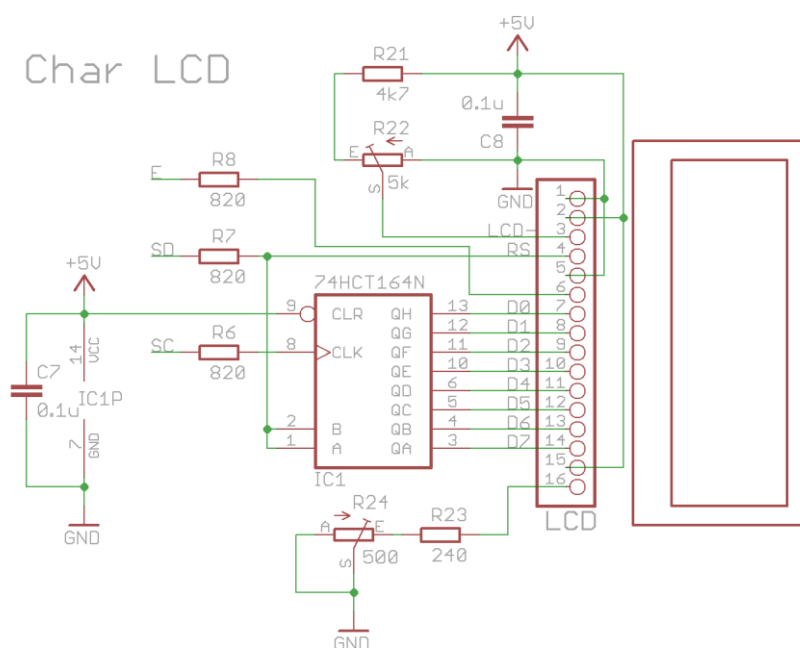
3.7 Znakový LCD displej

Znakový displej s řadičem HD44780 je připojen přes posuvný registr. Vzhledem k vyššímu napájecímu napětí než používá MCU je vhodné přidat na signální vodiče ochranné rezistory, aby při selhání jednoho ze zdrojů napětí nedošlo k poškození integrovaných obvodů. Jas a kontrast displeje se nastavuje trimery R22 a R23, viz Obr. 3.8.

Zvolen byl posuvný registr 74HCT164, neboť může být napájen stejným napětím jako displej, ale je kompatibilní s TTL logickými úrovněmi a tedy i s 3,3 V CMOS logikou MCU. Na rozdíl od ovládání relé zde není potřeba mít výstupní registr, platnost dat pro řadič displeje určuje signál E. Datový signál posuvného registru SD je zároveň použit jako signál RS displeje. Takto je minimalizován počet potřebných GPIO portů MCU. Blokování napájení registru zajišťuje keramický kondenzátor 100 nF.

Ovládání displeje probíhá následovně:

1. Datovým signálem SD a hodinovým signálem SC se do posuvného registru nahraje jeden bajt dat pro displej.
2. Signálem SD se určí, zda se mají data uložit do instrukčního nebo datového registru.
3. Signálem E je indikována platnost dat.



Obr. 3.8 Schéma zapojení displeje

3.7.1 Nastavení jasu a kontrastu LCD

Jas a kontrast lze nastavit napevno nebo variabilně, podle osazených součástek R21 až R24 na desce. Pokud má modul displeje již zabudované nastavení jasu a kontrastu, není potřeba R21 až R24 osazovat.

Jas lze pevně nastavit osazením pouze rezistoru R23, velikost odporu je potřeba zvolit podle LED diody v displeji, pozice R24 musí být přemostěna (propoj je na desce označen). Osazením trimru R24 lze proud diodou regulovat podle potřeby.

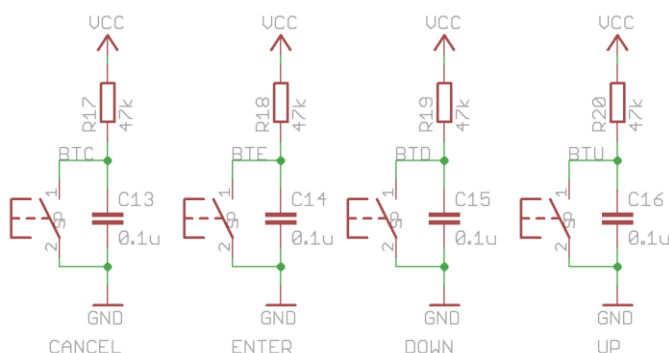
Kontrast je doporučeno nenastavovat napevno, součet hodnot R21 a R22 by měl být okolo 10 k Ω . Při osazení trimru a rezistoru lze dosáhnout jemnějšího nastavení kontrastu než při použití samotného trimru. Při nastavení napevno je trimmer nahrazen rezistorem a přemostěním (propoj je na desce opět označen).

Zařízení lze provozovat i bez displeje a ovládat jej pouze přes sériovou linku. Celý řídicí obvod modulu displeje v tom případě nemusí být osazen spolu s obvodem tlačítek.

3.8 Tlačítka

Čtyři tlačítka jsou připojena k MCU s externím pull-up rezistorem. Paralelně připojený keramický kondenzátor slouží k potlačení zákmitů při spínání tlačítka. V případě potřeby je další ošetření zákmitů možné implementovat v softwaru MCU.

Zařízení lze kompletně ovládat přes sériovou linku a obvody tlačítek nemusí být na desce osazeny. Pokud není osazen obvod displeje, je kromě tlačítka reset u MCU nevhodné osazovat ostatní tlačítka.

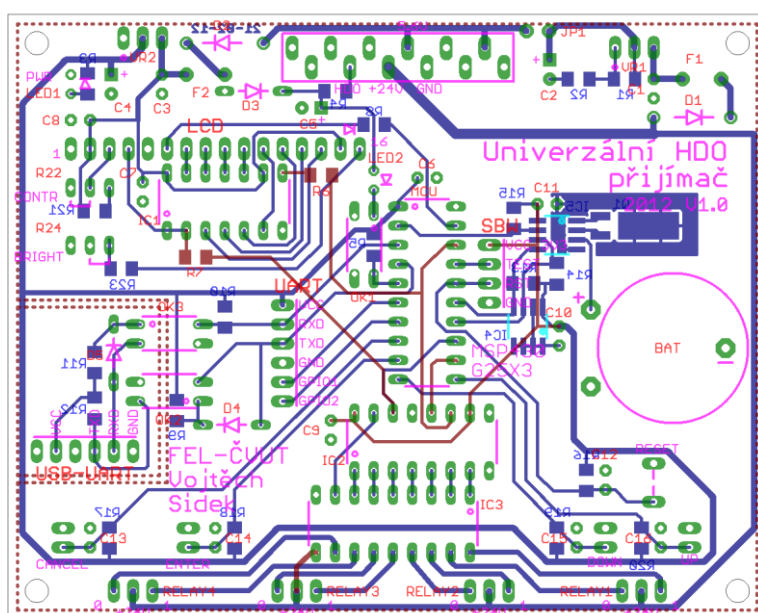


Obr. 3.9 Schéma zapojení tlačítek

3.9 Deska plošných spojů

Deska plošných spojů byla navržena v programu EAGLE od společnosti CadSoft. Pouze pro rezistory a integrované obvody na sběrnici I²C byly použity komponenty v SMD pouzdrech, ostatní součástky byly osazeny v provedení s drátovými vývody. Cesty na desce byly navrženy v šířce 16 tisícín palce, což by mělo zaručit, že většina výrobců by neměla mít potíže s výrobou desky. Napájecí cesty jsou dále rozšířené pro zlepšení průtoku proudu a většina plochy horní vrstvy je připojena na zem.

Z návrhu byly vygenerovány podklady pro výrobu ve formátu Gerber souborů, verze RS-274x, a parametry vrtání ve formátu Excellon 2.4. Profesionálně bylo vyrobeno šest kusů desek, osazení jednoho kusu bylo provedeno ručně. K osazení MCU byla použita patice pro zjednodušení manipulace.



Obr. 3.10 Deska plošných spojů

4 Řešení – software

Firmware MCU byl napsán v jazyce C s využitím vývojového prostředí Code Composer Studio 4.2, které nabízí výrobce pro řadu MSP430. Zdrojový kód je rozdělen na soubory podle jednotlivých periférií MCU a připojených bloků. Soubory zdrojového kódu, uložené na přiloženém CD, jsou nedílnou součástí této práce.

Při spuštění programu je nejprve nutné nastavit obvod Watchdog, aby nedošlo k restartování jádra. Také je potřeba nastavit frekvenci oscilátoru pro jádro a periferie. Použity jsou kalibrační konstanty integrovaného generátoru hodinového taktu pro 1 MHz. Následně se provede inicializace integrovaných a externích periférií. Nakonec se otestuje správnost běhu obvodu RTC a konzistence načteného nastavení. V případě chyby se použijí výchozí hodnoty.

Řada MCU MSP430 umožňuje využít několik úsporných režimů, kdy dojde k pozastavení běhu kódu a podle úrovně úsporného režimu i zastavení jednotlivých zdrojů hodinového signálu. Díky tomu není nutné provádět aktivní čekání, ale stačí reagovat na přerušení generovaná perifériemi. Doporučená struktura programu řízeného přerušením je nastíněna v [8]. Obsluha přerušení vykoná jen nejnutnější funkce, a pokud je potřeba vykonat komplexnější úlohu, nastaví příslušný příznak a probudí jádro z režimu spánku. Hlavní smyčka zpracuje signalizované úlohy a opět jádro uspí.

Možné kolize na sdílených zdrojích jsou eliminovány prováděním jednotlivých úloh v hlavní smyčce. Pouze pro operace na sběrnici I²C je potřeba nastavit položku v příznakovém registru, která je vynulována v obsluze přerušení na konci transakce na sběrnici. Vzhledem k délce startovací sekvence HDO datagramu nemůže nastat konflikt příjmu obsahu datagramu se zápisem předchozího datagramu do paměti EEPROM.

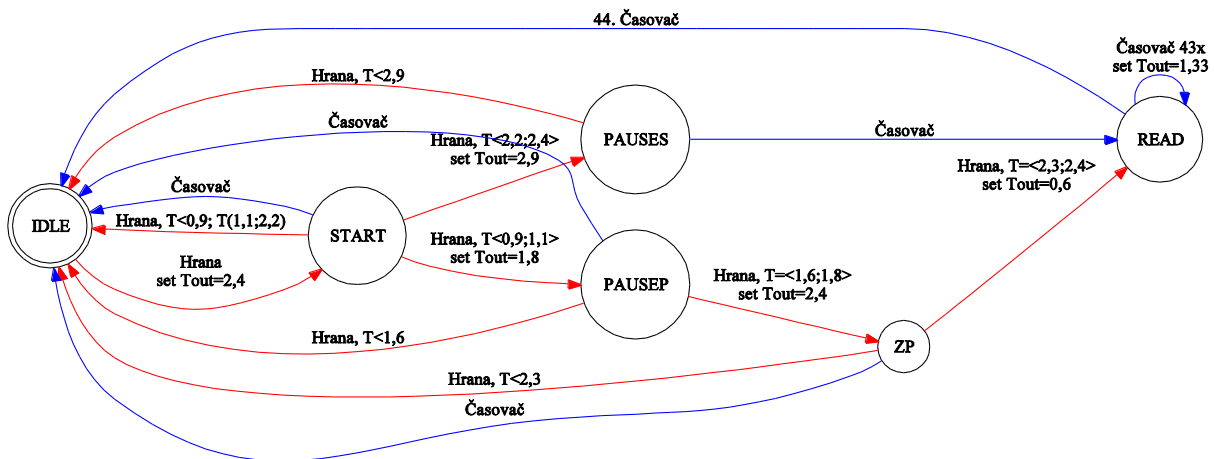
Protokol komunikace na sběrnici I²C byl implementován podle manuálu k řadě MCU MSP430 [4] a připojených periférií [15][16]. Pro operace čtení je využita funkce opakovaného startu. Ovládání znakového LCD displeje bylo implementováno podle manuálu k použitému řadiči [9]. Příkazy jsou posílány v 8-bitovém formátu přes posuvný registr.

Po rozšíření funkcionality o ukládání přijatých datagramů s časovým údajem byla sériová linka zvolena jako primární uživatelské rozhraní, přes které se provádí veškeré nastavení. Displej a tlačítka slouží pouze k prohlížení záznamů.

4.1 Příjem HDO datagramů

Podle struktury povelových kódů HDO na Obr. 2.2 byl navržen stavový automat pro jejich příjem a dekodování, viz Obr. 4.1. K příjmu je využit jeden GPIO port, nakonfigurovaný jako vstupní brána, a časovač. Pro lepší názornost jsou přechody automatu barevně odlišeny podle toho, jestli jsou vyvolány časovačem (modré) nebo detekcí hrany (červené).

Nejprve automat otestuje, zda startovací sekvence odpovídá jednomu ze dvou typů datagramů a následně dekoduje obsah, to se děje na hranách vedoucích ze stavu READ.



Obr. 4.1 Stavový automat přijímače datagramů

4.2 Fletcherův kontrolní součet

Test integrity dat načtených z úložiště dat nebo nastavení zajišťuje Fletcherův kontrolní součet, konkrétně varianta se základním blokem jeden bajt. Algoritmus je velmi jednoduchý a rychlý, což jej činí vhodným kandidátem pro použití v malých mikrokontrolérech. Oproti prostému součtu nebo paritě je výrazně spolehlivější, neboť závisí i na pořadí jednotlivých bloků, a tvoří jej dva bloky, což rozšiřuje stavový prostor. Jako modul je použito číslo 255, které má lepší vlastnosti, než nejvyšší možné, tedy 256, kdy dojde k zahazení vyšších bitů součtu. Operace modulo 255 vyšší bity zamíchá do nižší, zároveň se dá efektivně implementovat bez celočíselného dělení.

Kontrolní součet tvoří dvě čísla, jedno obsahuje součet bloků a druhé součet těchto součtů. Počáteční hodnoty mohou být libovolné, ale konstantní v rámci jednoho systému. Algoritmus lze zapsat v pseudokódu následovně:

```
Vstup: data[delka]
sum1 = 0
sum2 = 0
for(i=0; i<delka; i++) {
    sum1 = (sum1 + data[i]) mod 255
    sum2 = (sum2 + sum1) mod 255
}
Výstup: sum1, sum2
```

4.2.1 Optimalizace modulo 255

Celočíselnému dělení, které by zabralo značné množství instrukcí v paměti i čase, se lze zcela vyhnout zavedením několika drobných úprav:

- Proměnné `sum1` a `sum2` jsou deklarovány jako 16-bitové, redukci modulo stačí provést, až když hrozí přetečení. Tato situace může nastat nejdříve při zpracování 22. bajtu. Firmware MCU používá nejvýše 16 bajtů dlouhé záznamy, proto uvnitř cyklu nemůže tato situace nastat a stačí modulární redukci provést až za cyklem.
- Pro jednodušší detekci přetečení se místo rozsahu 0 až 254 použije rozsah 1 až 255, přičemž $0 \equiv 255 \bmod 255$. Nulu lze využít například jako detekci nevypočteného kontrolního součtu. Počáteční hodnota proměnných musí být větší než 0.
- Vzhledem k tomu, že $256 \equiv 1 \bmod 255$, stačí k redukci sečíst horní bajt se spodním. Sečtení je potřeba provést dvakrát, neboť v nejhorším možném případě bude po prvním sečtení bajtů `0xFFFF` hodnota proměnné `0x01FE`. Druhé sečtení už zaručí, že hodnota bude z rozsahu 1 až 255.

K implementaci jsou potřeba pouze operace součet, posun a logický součin, zápis v pseudokódu je následující:

```
Vstup: data[delka]
sum1 = 0xFF
sum2=0xFF
for(i=0; i<delka; i++) {
    sum1 = sum1 + data[i]
    sum2 = sum2 + sum1
}
sum1 = (sum1 & 0xFF) + (sum1>>8)
sum1 = (sum1 & 0xFF) + (sum1>>8)
sum2 = (sum2 & 0xFF) + (sum2>>8)
sum2 = (sum2 & 0xFF) + (sum2>>8)
Výstup: sum1, sum2
```

4.3 Datové struktury

Následující odstavce popisují skladbu a použití nejvýznamnějších datových struktur programu.

4.3.1 Registr příznaků

Registr příznaků informuje hlavní smyčku, které operace je potřeba provést. Některé bity slouží k udržení konzistence běhu programu, viz následující popis jednotlivých příznaků. Nevyužité pozice lze použít při budoucím vývoji programu. Stavový registr je před spuštěním hlavní smyčky vynulován.

Bit	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Položka	STORE	LOAD	UART	-	LCD_MENU	I2C	-	-	-	-	-	-	BTU	BTD	BTE	BTC

Tab. 4.1 Struktura registru příznaků

Bit 15:	STORE – detekuje přijatý datagram, který je potřeba, zobrazit na LCD displeji a konzoli, uložit a případně přepnout relé, pokud se shoduje adresa
Bit 14:	LOAD – probíhá čtení datagramů z paměti pro zobrazení na konzoli, výpis probíhá po jednom záznamu, aby nebyly zablokovány ostatní funkce
Bit 13:	UART – je potřeba zpracovat příkaz z konzole
Bit 11:	LCD_MENU – na displeji se zobrazuje uložený záznam, nově přijaté datagramy nepřekreslí aktuální obsah
Bit 10:	I2C – probíhá transakce na sběrnici I ² C, jádro se nesmí probudit z režimu spánku, aby nebyla transakce předčasně považována za dokončenou
Bity 0-3:	BTU, BTD, BTE, BTC – bylo zmáčknuto tlačítko

4.3.2 Nastavení

Nastavení tvoří 14 bajtů dlouhé pole, kde poslední dva bajty nesou kontrolní součet. Při každé změně je obsah nakopírován do uživatelské části paměti NV RAM v obvodu RTC.

Vzhledem ke shodné délce, jako má záznam datagramu, označuje kopie pole nastavení konec záznamů v paměti EEPROM. Tato kopie zároveň slouží jako záloha v případě úplné ztráty napájení obvodu RTC. Pro odlišení od záznamu datagramu obsahuje pole nastavení hlavičku s pevnou hodnotou 0xA0, která se nepřekrývá s označením typu datagramu, viz následující podkapitola.

Bajt	0	1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12	13
Položka	HEAD	GLOBAL	RELAY1	RELAY2	RELAY3	RELAY4	ADDRESS	CH1	CH2
Výchozí hodnota	0xA0	0x08	0x0000	0x0000	0x0000	0x0000	0x0000	0xA8	0xDF

Tab. 4.2 Struktura pole nastavení

Bajt 0: HEAD – hlavička označující blok nastavení, 1 bajt, vždy 0xA0

Bajt 1: GLOBAL – globální nastavení, 1 bajt

Bit 3: Monitor – odesílání přijatých datagramů na konzoli

Bit 2: Rollover – paměť záznamů byla zaplněna, počátek nemusí být na adrese 0x00, ale je v bloku za označením konce

Bajty 2-9: RELAYx – nastavení relé, 2 bajty

Bit 0-2 : adresa B, BCD 0x1-0x8

Bit 4-6 : adresa A, BCD 0x1-0x4

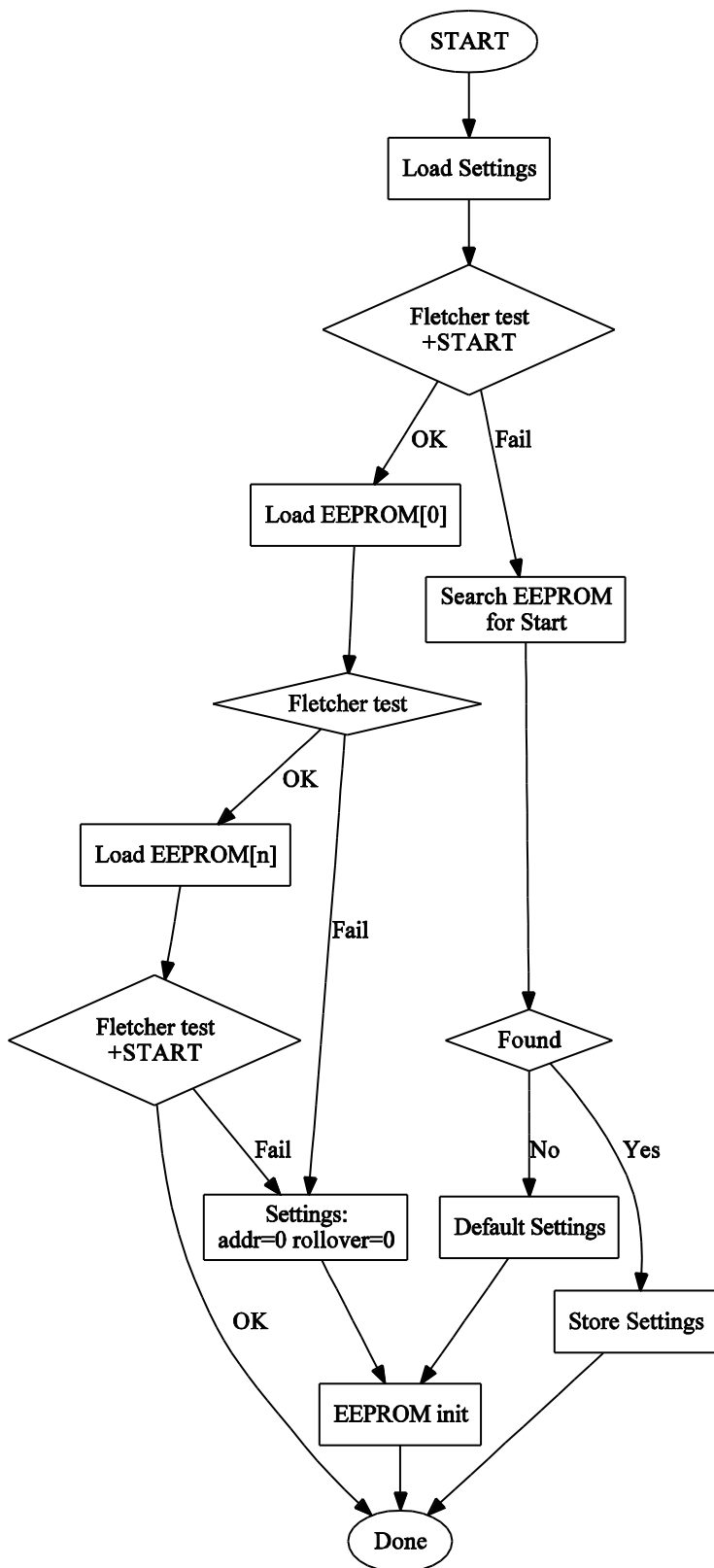
Bit 8-12 : adresa P, BCD 0x01-0x16

Bit 15 : výchozí stav relé, 0/1

Bajty 10-11: ADDRESS – adresa označení konce záznamu, 2 bajty

Bajty 12-13: CH1, CH2 – kontrolní součet, 2 bajty

Při startu programu je obsah nastavení načten z NV RAM v obvodu RTC. Otestuje se kontrolní součet, a zda je adresa v nastavení konzistentní s obsahem paměti EEPROM. Pokud nesouhlasí kontrolní součet, je prohledán obsah paměti EEPROM, zda obsahuje kopii nastavení, jako označení konce záznamu. Detailní popis inicializace nastavení je vývojovým diagramem popsán na Obr. 4.2.



Obr. 4.2 Algoritmus inicializace nastavení

4.3.3 Záznam

Záznam tvoří 14 bajtů dlouhé pole, kde poslední dva bajty nesou kontrolní součet. Horní část prvního bajtu určuje, o jaký typ datagramu se jedná. Hodnoty byly zvoleny tak, aby se nepřekrývaly s hlavičkou nastavení 0xA. Kromě samotného datagramu obsahuje záznam také časový údaj přijetí.

Jednotlivé záznamy jsou v paměti EEPROM uloženy na adresách s inkrementem 16, což umožňuje do budoucna rozšíření o další data. Zároveň to umožňuje uložit celý záznam v rámci jedné transakce, neboť čipy s pamětí EEPROM dokáží při jednom zápisu zpracovat pouze omezený blok adres, který se obvykle liší podle celkové kapacity (od 16 bajtů pro nejmenší po 128 bajtů pro použitý typ [15]). V paměti o kapacitě 64 kB lze uchovat až 4095 záznamů. Po zaplnění se nejstarší záznamy přepisují novými, z uživatelského hlediska je tento proces skrytý.

Bajt	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Sériový	TYPE A	B	P1	P2	P3	P4	mm	hh	WW	DD	MM	YY	CH1	CH2
Paralelní	TYPE P1	P2	P3	P4	P5	P6	mm	hh	WW	DD	MM	YY	CH1	CH2

Tab. 4.3 Struktura pole záznamu

Obsah datagramu – sériový povelový kód

Bajt 0: Bity 4-7: TYPE – Uložený typ datagramu, 0x4 – sériový povelový kód
 Bity 0-3: A – obsah adresního pole A
Bajt 1: B – obsah adresního pole B
Bajty 2-5: P1-P4 – obsah povelového pole

Obsah datagramu – paralelní povelový kód

Bajt 0: Bity 4-7: TYPE – Uložený typ datagramu, 0x1 – paralelní povelový kód
 Bity 0-3: P1 – obsah povelového pole, skupiny 1 až 4
Bajty 1-5: P2-P6 – obsah povelového pole, skupiny 5 až 44

Časový údaj

Bajt 6: mm – minuty, BCD 0x00-0x59
Bajt 7: hh – hodiny, BCD 0x00-0x24
Bajt 8: WW – den v týdnu, BCD 0x01-0x07 (nepoužívá se)
Bajt 9: DD – den v měsíci, BCD 0x01-0x31
Bajt 10: MM – měsíc v roce, BCD 0x01-0x12
Bajt 11: YY – rok, BCD 0x00-0x99, 0x00 = 2000, 0x99 = 2099

Bajty 12-13: CH1, CH2 – kontrolní součet, 2 bajty

4.4 Znakové rozhraní

Naimplementováno je jednoduché terminálové rozhraní přes sériovou linku, které umožňuje měnit aktuální nastavení a prohlížet uložené záznamy. Vypsání záznamů lze filtrovat podle adresy sériového povelového kódu.

4.4.1 Parametry sériové linky

- Rychlost 9600 baudů
- 8 datových bitů
- Žádná parita
- 1 stop bit
- Žádné řízení toku

4.4.2 Příkazy znakového rozhraní

log	– vypíše všechny záznamy
log ABPP	– vypíše záznamy vyfiltrované podle adresy, 0 v jednom z adresních polí znamená všechny možné hodnoty
clear	– smaže všechny záznamy
date	– zobrazí aktuální čas
date YYMMDDhhmm	– nastaví čas podle parametru
monitor	– zobrazí nastavení monitorování příchozích datagramů
monitor (0,1)	– změni nastavení monitorování podle parametru
relay	– zobrazí nastavení všech relé
relay id	– zobrazí nastavení jednoho relé, id je číslo relé
relay idABPP(0,1)	– nastaví relé podle parametru
erase	– vrátí nastavení na původní hodnoty
help	– vypíše seznam příkazů a jejich význam

Pro uvedení zařízení do výchozího stavu je nutné zadat kombinaci příkazů clear a erase.

5 Závěr

Práce byla zahájena testováním přijímače FMX 100 a jeho použitelnosti ve funkci vstupního člen výsledného zařízení. Následovalo vytvoření několika iterací experimentálního přijímače na kitu LaunchPad. Pro usnadnění vývoje byl také naprogramován emulátor vysílače HDO datagramů, který lze přímo připojit k MCU.

Na základě získaných poznatků, zadání práce a pozdějších úprav byl navržen obvod přijímače. Podle obvodu byla vyrobena deska plošných spojů. Před vyrobením a osazením desek probíhal vývoj firmware na nepájivém kontaktním poli. Ručně byl osazen jeden exemplář, který byl po naprogramování úspěšně otestován, během čtrnácti hodin bylo zaznamenáno přes 140 datagramů.

V průběhu práce bylo zadání lehce upraveno, díky čemuž roli hlavního uživatelského rozhraní přejal znakový terminál. Klávesnice s displejem slouží pouze k prohlížení záznamů. Bylo také zjištěno, že napájecí zdroj v FMX 100 nemá dostatečný výkon k trvalému napájení cívký relé. Proto je nutné použít bistabilní relé, které potřebuje k přepnutí jen krátký pulz.

5.1 Praktické využití

Přijímač lze využít jako HDO sledovač místo nedostupného a drahého zařízení MDS5. Původním záměrem bylo zkonstruovat zařízení, které by zachytávalo a dekovalo datagramy signalizace HDO, což bylo v konečném návrhu rozšířeno i na záznam přijatých datagramů.

Další možností je využít zkonstruované zařízení jako běžný přijímač HDO pro spínání spotřebičů přes připojená relé. Konfigurace je pro koncového spotřebitele dostupnější než u dnes nabízených modelů, které vyžadují speciální optickou hlavici.

V neposlední řadě se přijímač může uplatnit jako pomůcka při výuce předmětů z oblasti telekomunikací nebo distribuce energie. Vzhledem k četnosti vysílání datagramů by neměl být problém v průběhu jednoho cvičení získat několik záznamů.

5.2 Návrhy budoucího vývoje

Významným vylepšením přijímače by byla výměna vstupního bloku FMX 100 za digitální filtr s možností volby tónové frekvence v rozsahu zhruba od 100 do 2000 Hz.

Při použití většiny komponent v SMD provedení by bylo možné zmenšit plochu desky a tím snížit výrobní náklady. Výměnou displeje za menší, ale levnější typ se sériovým rozhraním, by opět klesla cena potřebných komponent. Je možné použít například modul s řadičem PCD8544 (populární grafický LCD displej z telefonu Nokia 5110).

Jako jedna z možností následného vývoje se nabízí implementace kompletního uživatelského rozhraní přes tlačítka a displej.

5.3 Závěrečné slovo autora

Řešením této práce jsem získal zkušenosti z mnoha oborů technické praxe se zaměřením na vývoj vestavných systémů. Seznámil jsem se s návrhem plošných spojů a přípravou podkladů pro jejich výrobu. Provedl jsem ruční osazení desky včetně SMD komponent. Při vývoji firmwaru jsem si prohloubil znalosti programování a ladění jednočipových mikrokontrolérů řady MSP430, konkrétně využití integrovaných periférií, implementace uživatelského rozhraní a propojení s dalšími obvody.

I díky nepřítomnosti signálu HDO v místě mého trvalého bydliště pro mě byla tato diplomová práce výzvou. Věřím, že znalosti a zkušenosti nabyté nejen v průběhu řešení této práce, ale i celého studia, uplatním ve svém profesním i soukromém životě.

Seznam literatury

- [1] HDO - hromadné dálkové ovládání. Jiří Podhorský, BEN, Praha 2002
- [2] Kvalita elektrické energie – Signál HDO, Přednáška 15DEE. Ing. Tomáš Sýkora ČVUT v Praze, 2006
- [3] Přenos dat po silnoprůdých vedeních, Přednáška. Ing Jaromír Hrad, Ph.D. ČVUT v Praze, 2010
- [4] MSP430x2xx Family, User's Guide (Rev. I). Texas Instruments, 2012
- [5] MSP430G2x53, MSP430G2x13 Mixed Signal Microcontroller, datasheet. Texas Instruments, 2012
- [6] MSP-EXP430G2 LaunchPad Experimenter Board, User's Guide. Texas Instruments, 2010
- [7] MSP430G2xx3 Code Examples. Texas Instruments, 2011
- [8] MSP430 Software Coding Techniques, Application Report. Texas Instruments, 2006
- [9] HD44780 (LCD-II) - Dot Matrix Liquid Crystal Display Controller/Driver. HITACHI
- [10] ATM2004D 20x4 characters, datasheet.
- [11] 74HCT164 - 8-bit serial-in, parallel-out shift register, datasheet. Philips. 2005
- [12] 74HC595 - 8-bit shift register with 3-state output, datasheet. Texas Instruments, 2004
- [13] ULN2803 - 8ch Darlington sink driver, datasheet. Toshiba, 1998
- [14] BPC-817 - Optocoupler, datasheet. Bright LED Electronics Corp.
- [15] AT24C512C - Two-wire Serial EEPROM, datasheet. Atmel, 2010
- [16] DS1338 - I2C RTC with 56-Byte NV RAM, datasheet. Maxim Integrated Products, 2007
- [17] CP2102 - Single-chip USB to UART Bridge, datasheet. Silicon Labs, 2010

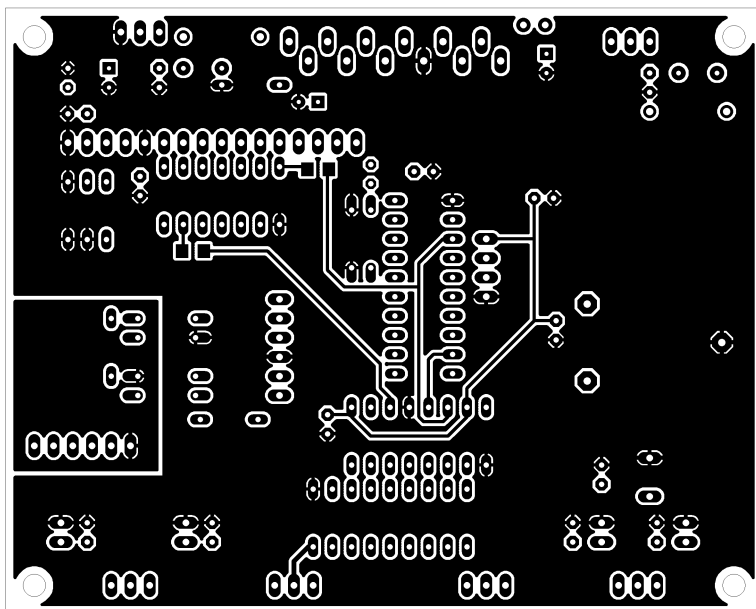
- [18] LD1117xx - Adjustable and fixed low drop positive voltage regulator, datasheet. STMicroelectronics, 2012
- [19] LM317 - 3-terminal Adjustable Regulator, datasheet. Texas Instruments, 2001
- [20] Radial Leaded PCT - RA Model, datasheet. ECE
- [21] Cylinder (Watch) Crystal, datasheet. IQD Frequency Products, 2010
- [22] Stránky předmětu A4M38AVS,
<http://measure.feld.cvut.cz/vyuka/predmety/A4M38AVS>
- [23] Revisiting Fletcher and Adler Checksums. Theresa Maxino, Carnegie Mellon University Pittsburgh, 2006
- [24] Fletcher's checksum - Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Fletcher's_checksum
- [25] Stránky výrobce HDO přijímačů ZPA Smart Energy a.s., <http://www.zpa.cz/>

Seznam použitých zkratek

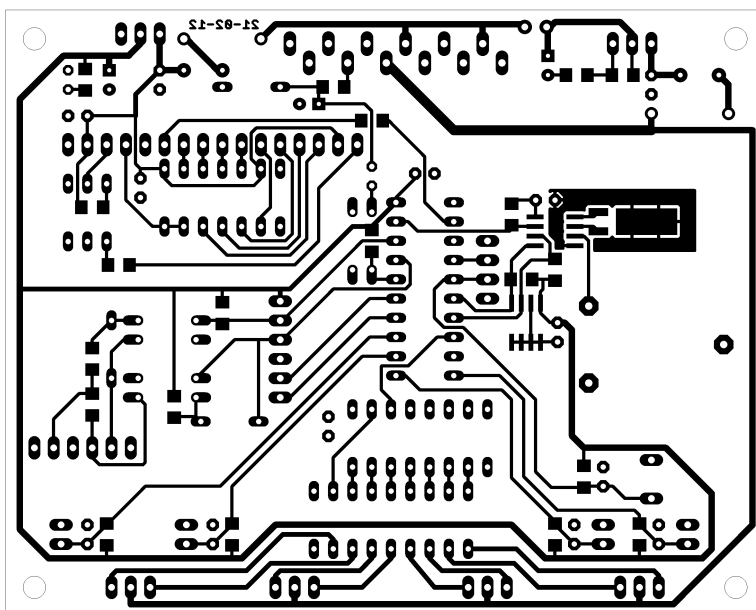
CD	Compact Disc
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DIP	Dual In-line Package
DPS	Deska plošných spojů
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
GPIO	General Purpose Input/Output
HDO	Hromadné dálkové ovládání
I2C	Inter-Integrated Circuit
ISR	Interrupt Service Routine
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light-emitting Diode
MCU	Microcontroller
NV RAM	Non-volatile Random Access Memory
RAM	Random Access Memory
RC	Resistor-Capacitor
RISC	Reduced Instruction Set Computing
RTC	Real Time Clock
SBW	Spy Bi Wire
SMD	Surface Mount Device
SPI	Serial Peripheral Interface
TTL	Transistor-transistor Logic
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
USB	Universal Serial Bus
USCI	Universal Serial Communication Interface

A Podklady pro výrobu

A.1 Vrstvy spojů

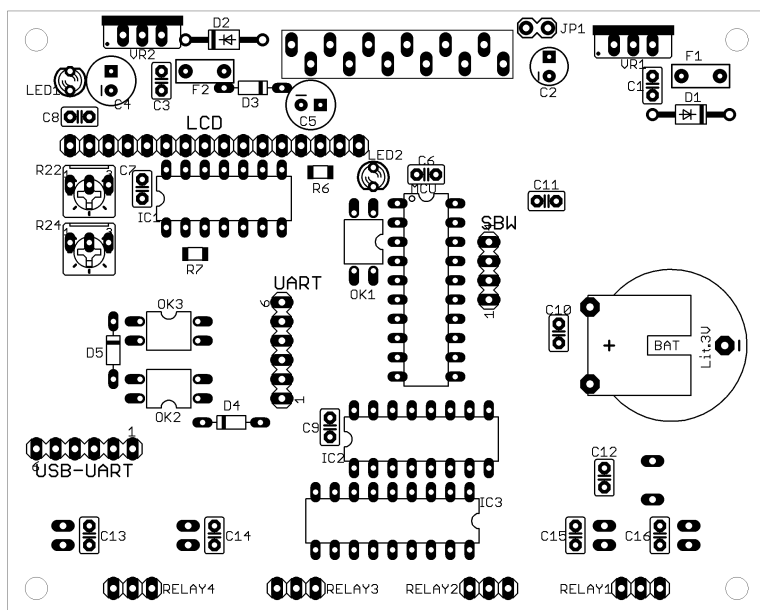


Obr. A.1 Horní vrstva spojů

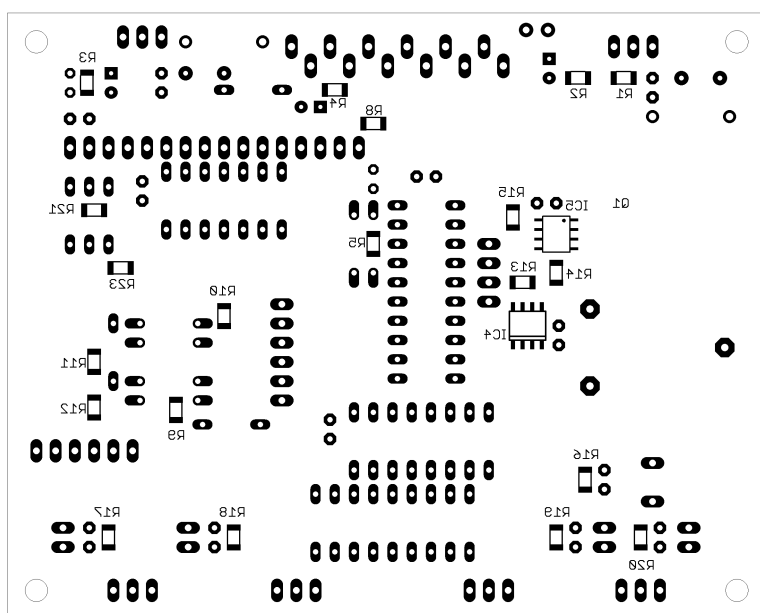


Obr. A.2 Spodní vrstva spojů

A.2 Osazovací plán

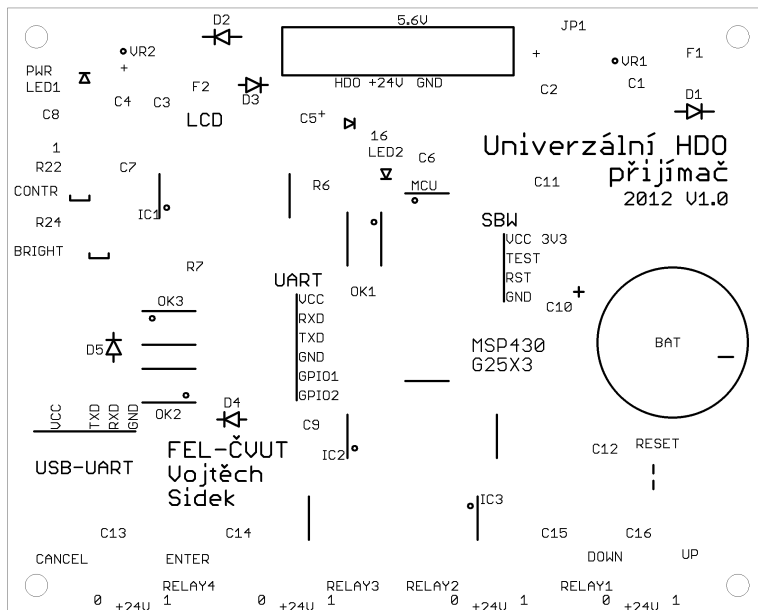


Obr. A.3 Osazovací plán - horní strana

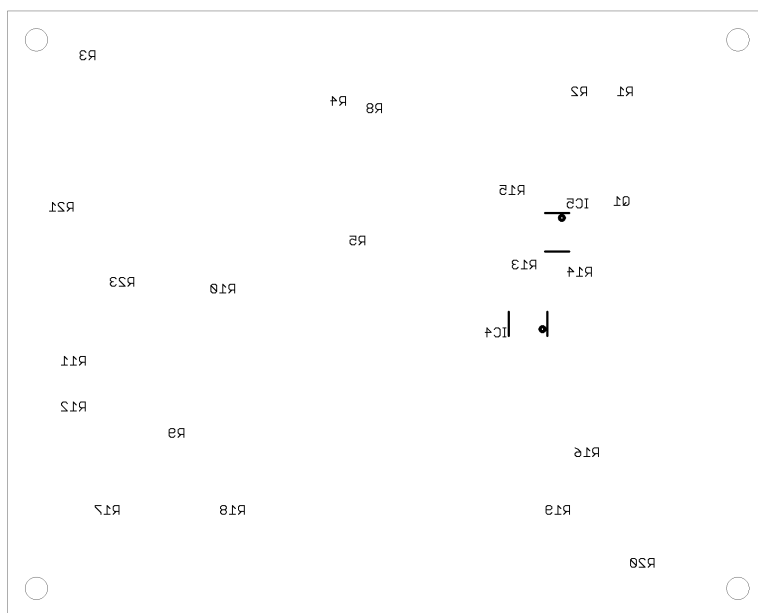


Obr. A.4 Osazovací plán - spodní strana

A.3 Vrstvy popisků



Obr. A.5 Horní vrstva popisků



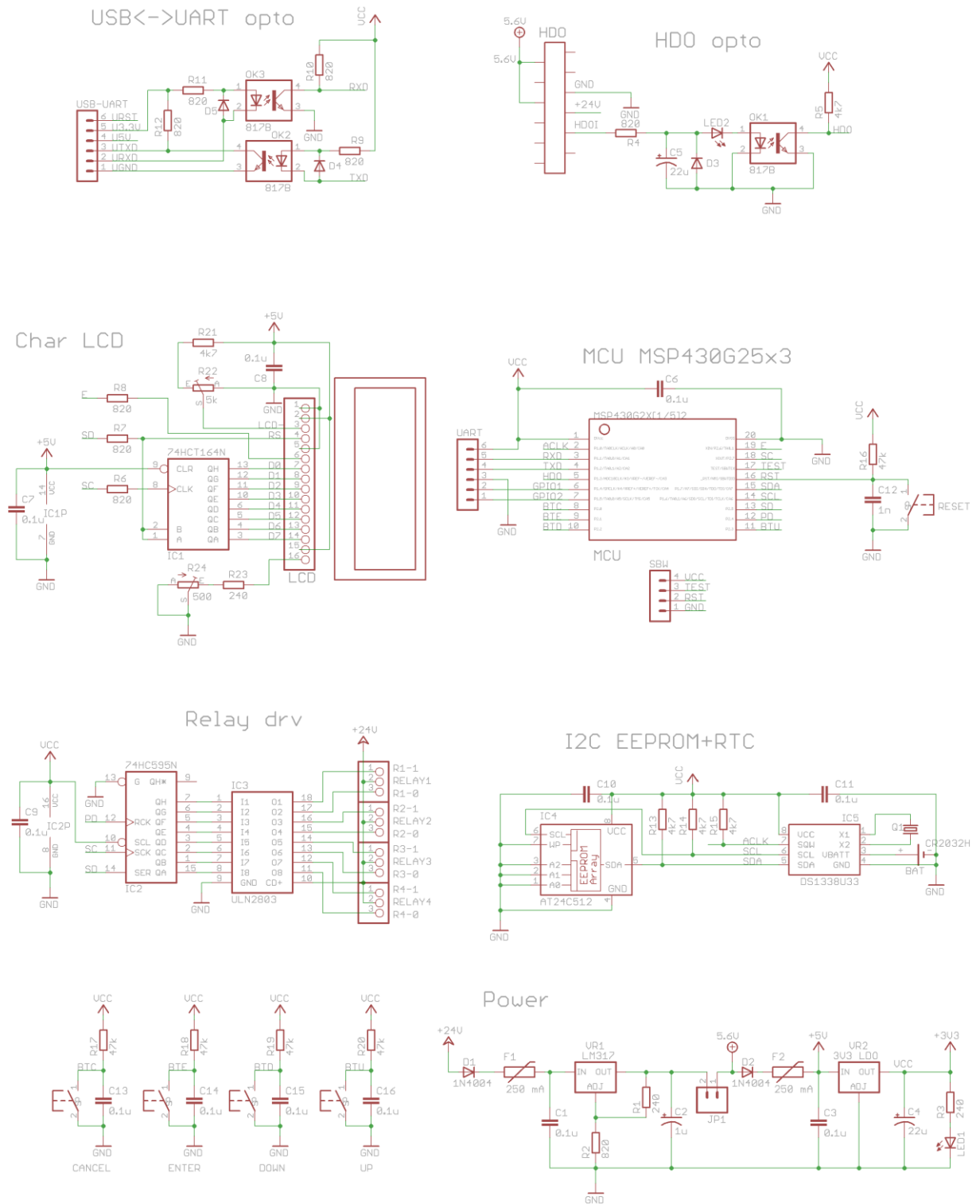
Obr. A.6 Spodní vrstva popisků

A.4 Seznam součástek

Počet	Označení	Hodnota	Popis
1	BAT	CR2032H	baterie 3V
12	C1, C3, C6-11, C13-16	100 nF	keramický kondenzátor
1	C2	1 uF	elektrolytický kondenzátor
2	C4, C5	22 uF	elektrolytický kondenzátor
1	C12	1 nF	keramický kondenzátor
2	D1, D2	1N4004	dioda
3	D3, D4, D5	1N4148	dioda
5	DOWN, CANCEL, ENTER, UP, RESET		tlačítko
2	F1, F2	250 mA	PTC pojistka
1	HDO		propojovací konektor FMX 100
1	IC1	74HCT164N	posuvný registr
1	IC2	74HC595N	posuvný registr
1	IC3	ULN2803	tranzistorové pole
1	IC4	AT24C512	I2C EEPROM
1	IC5	DS1338U33	I2C RTC
1	LCD	HD44780	displej 20x4 znaků
1	LED1	zelená	LED
1	LED2	červená	LED
1	MCU	MSP430G25x3-N20	mikrokontrolér
3	OK1, OK2, OK3	817B	optočlen
1	Q1	32768 Hz	krystal
3	R1, R3, R23	240 Ω	rezistor
9	R2, R4, R6-12	820 Ω	rezistor
5	R5, R13-15, R21	4k7 Ω	rezistor
5	R16-20	47k Ω	rezistor
1	R22	5k Ω	trimer
1	R24	500 Ω	trimer
4	RELAY1, RELAY2, RELAY3, RELAY4	3 pin	konektorová lišta
1	USB-UART	CP2102	modul USB-UART
1	VR1	LM317	regulátor
1	VR2	LD1117-33	low drop regulátor










Tab. A.1 Seznam součástek pro konstrukci

A.5 Schéma



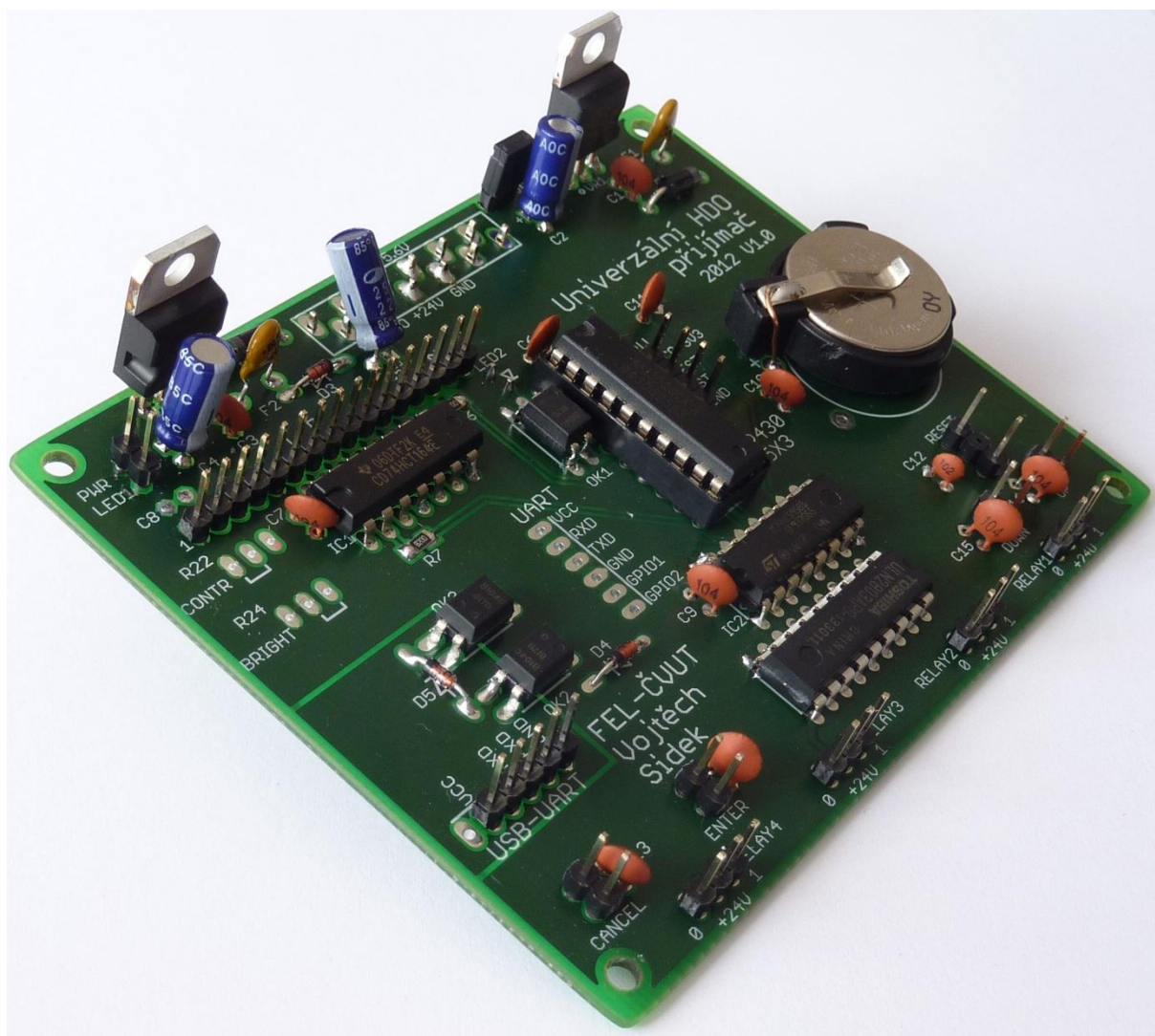
Obr. A.7 Schéma zapojení

B Obsah přiloženého CD

 datasheet	- dokumentace použitých komponent
 firmware	- zkompilovaný firmware a návod jak jej nahrát do MCU
 foto	- fotodokumentace
 pcb-eagle	- návrh desky plošných spojů ve formátu EAGLE v5
 pcb-gerber	- podklady pro výrobu desky plošných spojů
 src	- zdrojové kódy firmwaru Univerzálního přijímače HDO
 src-test	- zdrojové kódy testovacích verzí přijímače
 CCS-project.zip	- zkomprimovaný CCS v4.2 projekt firmwaru
 Dip_sidekvoj.pdf	- text diplomové práce

C Fotodokumentace

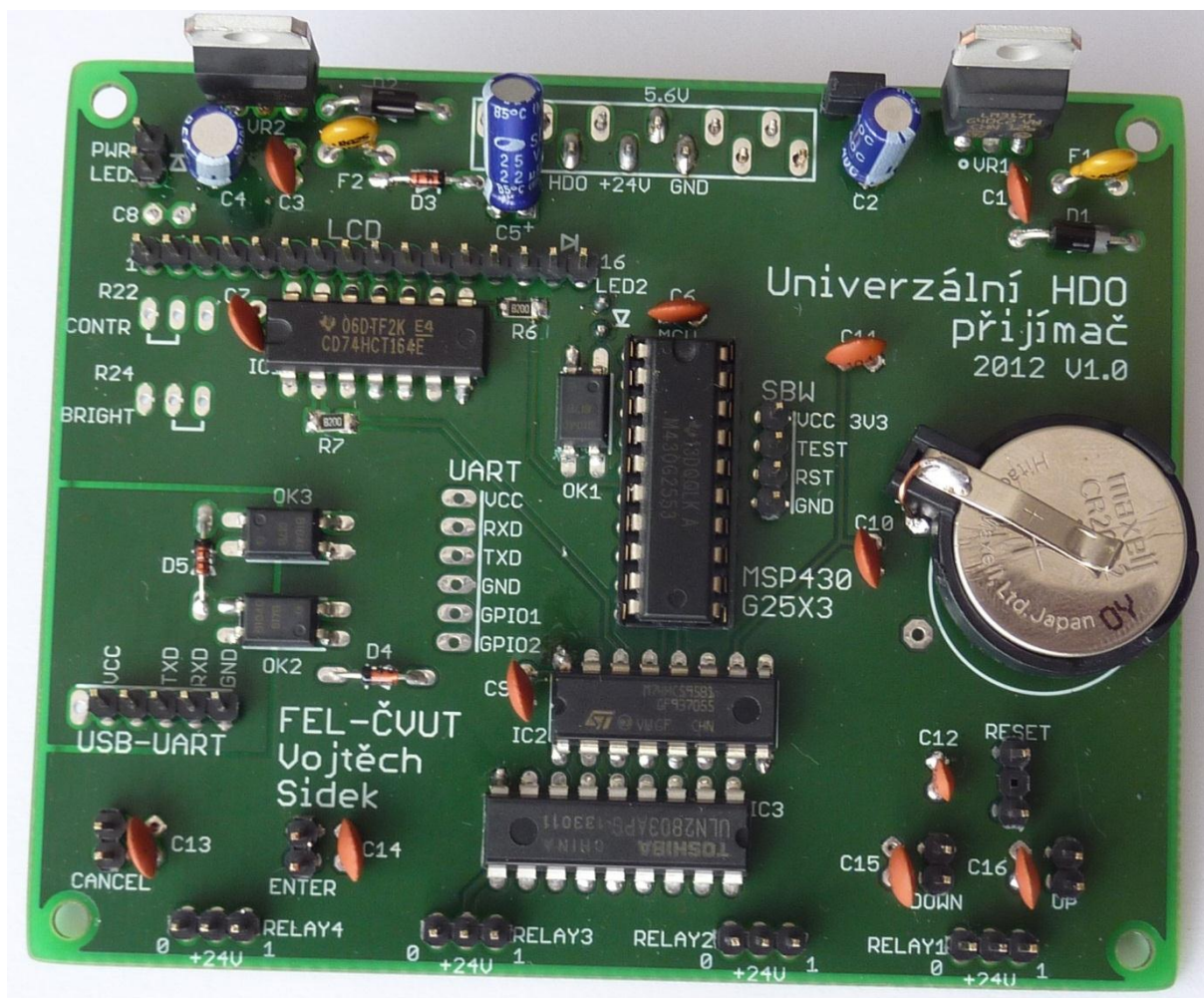
C.1 Univerzální přijímač HDO



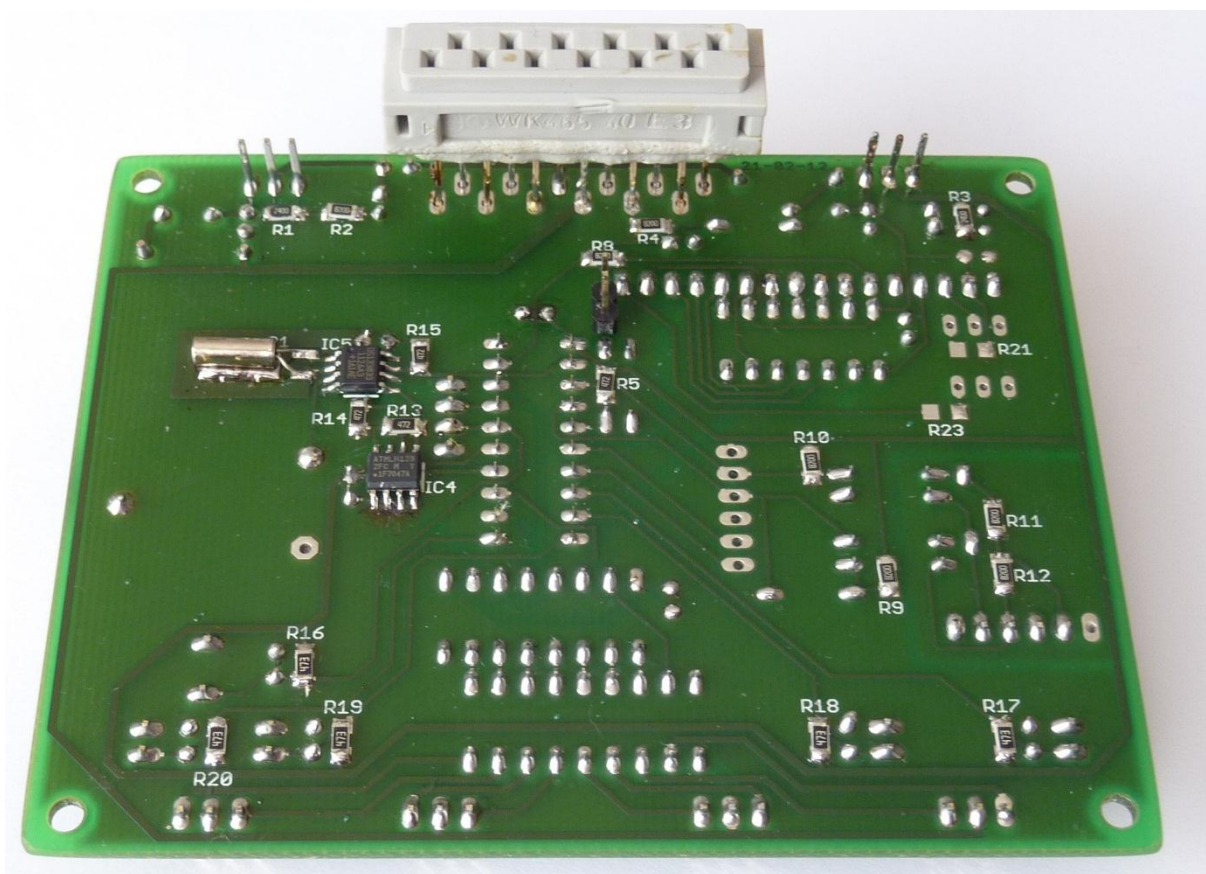
Obr. C.1 Osazená deska – pohled ze strany



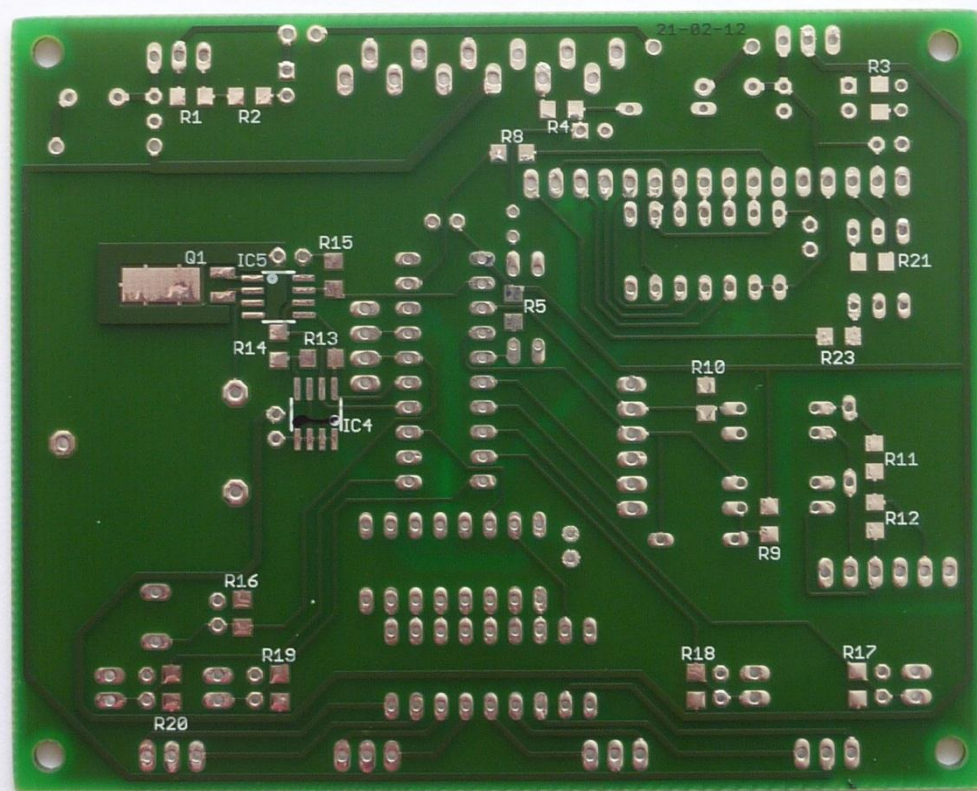
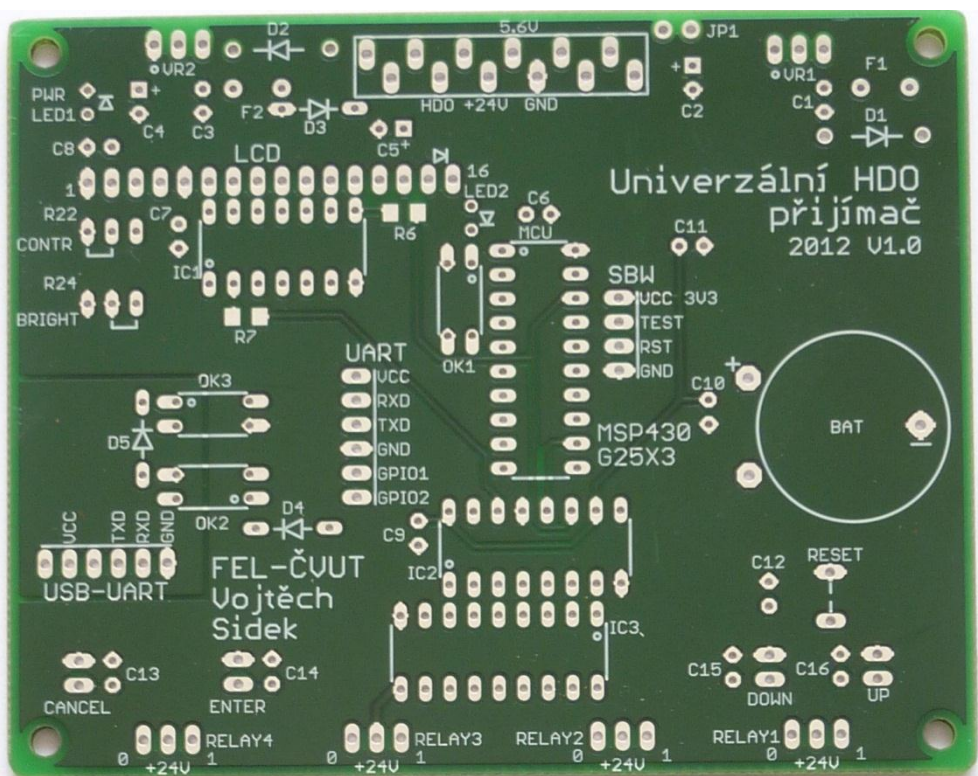
Obr. C.2 Přijímač vsazený do modifikovaného FMX 100



Obr. C.3 Osazená deska – pohled shora

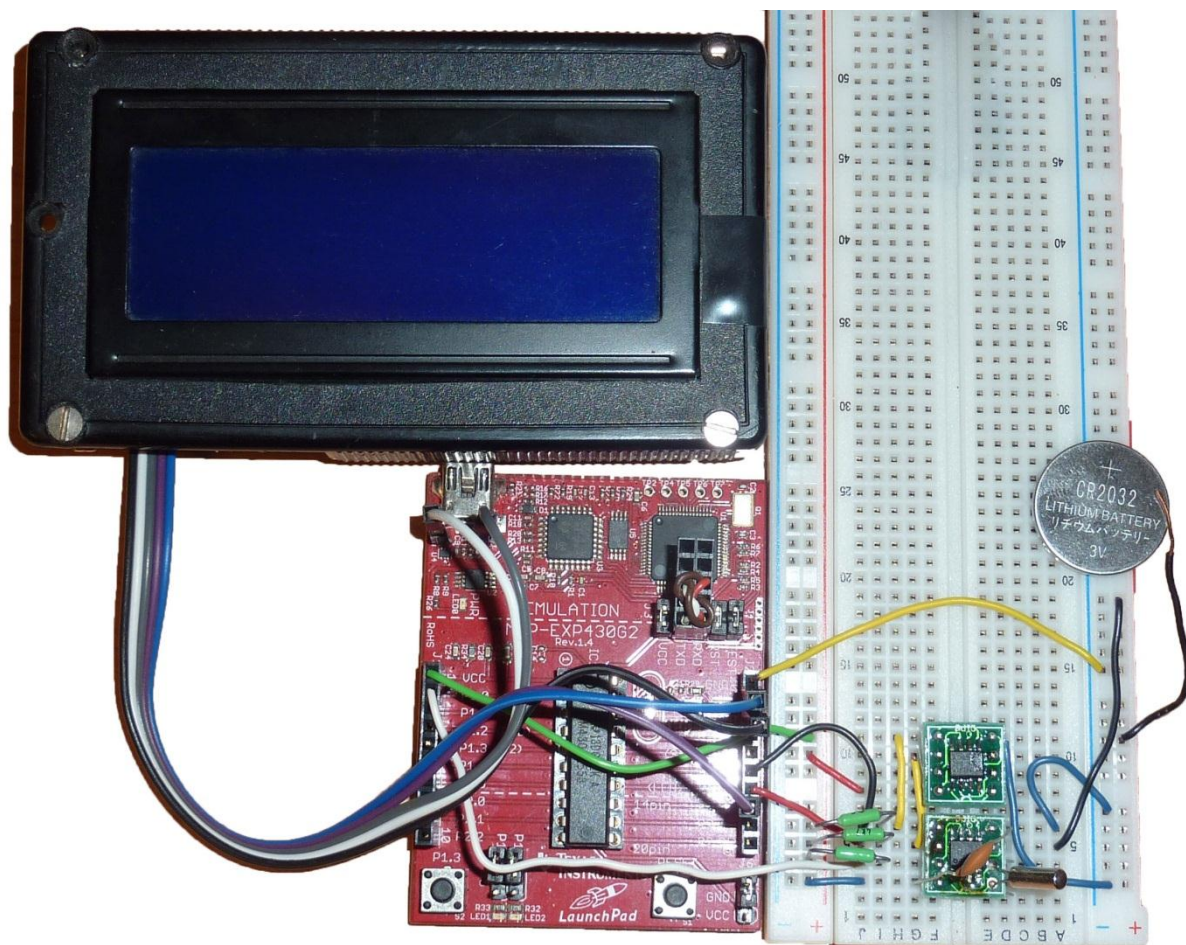


Obr. C.4 Osazená deska – pohled zdola

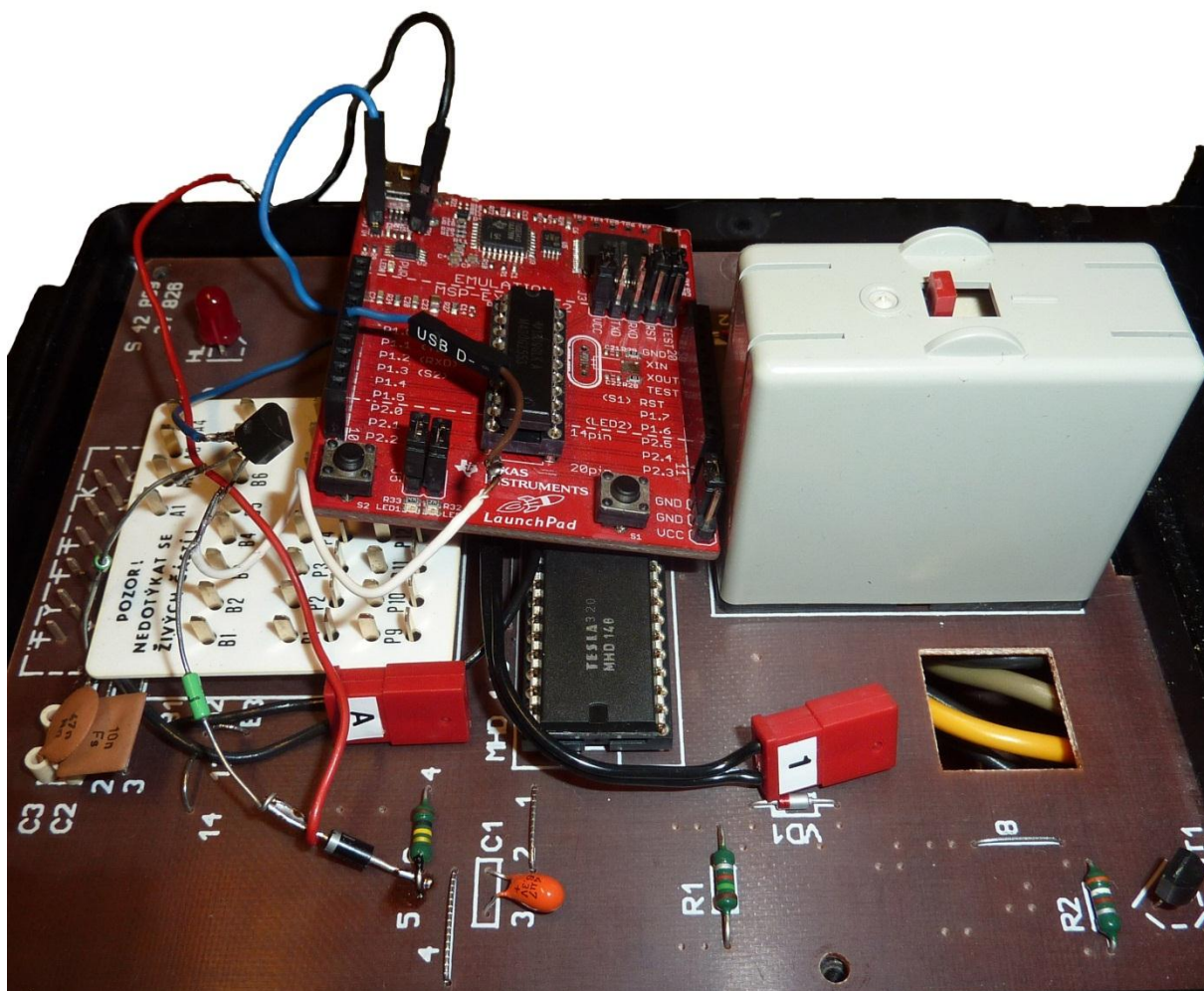


Obr. C.5 Neosazená deska

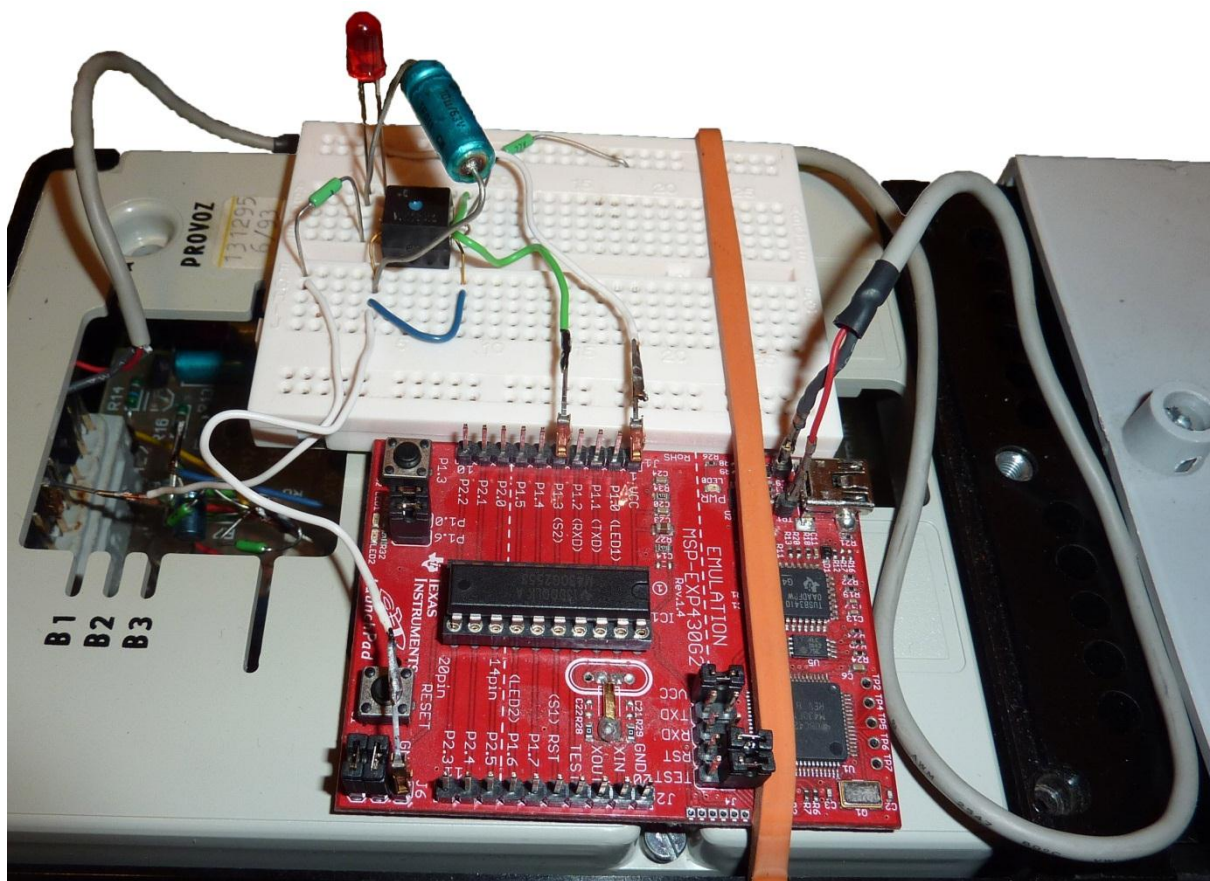
C.2 Testovací a vývojové verze



Obr. C.6 Vývojová verze na kontaktním poli

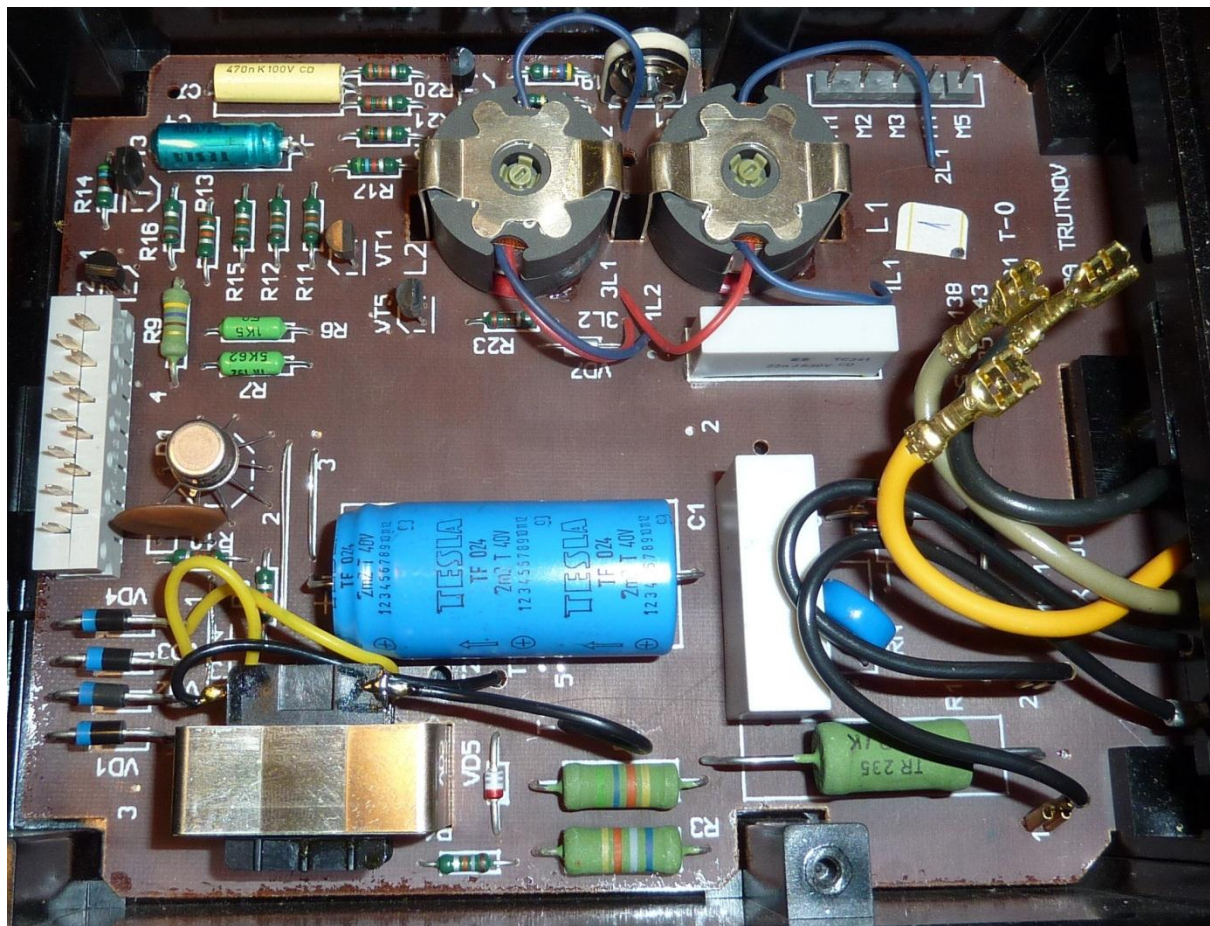


Obr. C.7 Testovací přijímač na FMX 100, revize 1



Obr. C.8 Testovací přijímač, na modifikovaném FMX 100, revize 2

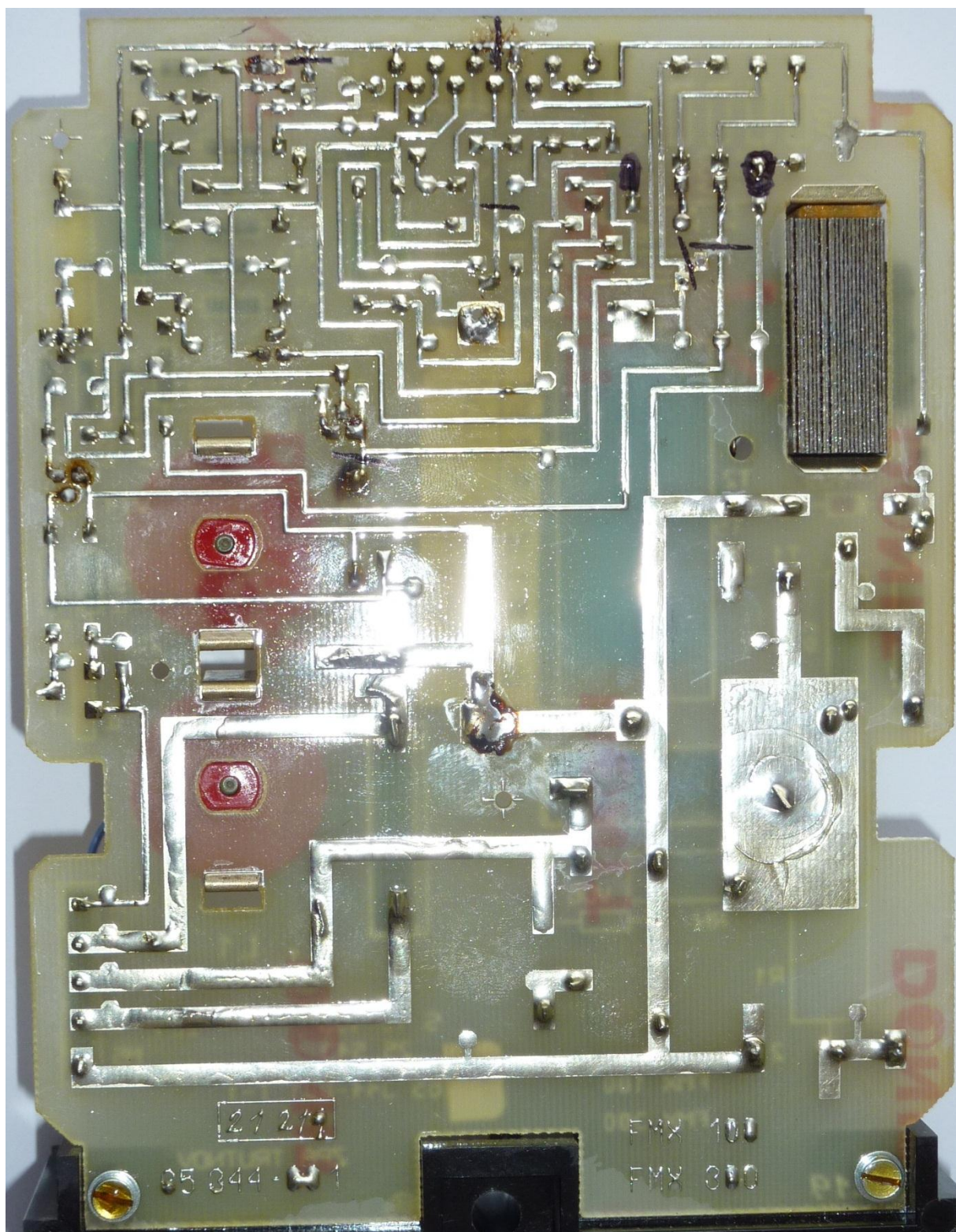
C.3 HDO přijímač FMX 100



Obr. C.9 FMX 100 - pohled dovnitř



Obr. C.10 FMX 100 - zapojení svorkovnice



Obr. C.11 FMX 100 - spodní deska po modifikaci