



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

**MONITOROVÁNÍ TECHNICKÉHO STAVU ČÁSTÍ
RADAROVÝCH SYSTÉMŮ**

TECHNICAL CONDITION MONITORING OF RADAR SYSTEMS COMPONENTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MAREK MIKLÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN NEVORAL

BRNO 2017

Abstrakt

Cílem této práce je navrhnout podsystém diagnostiky sekundárního přehledového radaru a vytvořit funkční prototyp bloku komunikace a testovacího generátoru. První část práce se věnuje popisu a rozdělení radarových systémů se zaměřením na radary určené pro řízení letového provozu. Hlavní pozornost je zaměřena na sekundární přehledové radary a popis jejich funkce. Navazující část se zabývá specifikací požadavků pro návrh systému diagnostiky a následně také samotným návrhem. Součástí této práce je návrh, výroba a testování prototypu bloku zajišťujícího komunikaci podsystému diagnostiky a funkci testovacího generátoru pro sekundární přehledový radar.

Abstract

The goal of this thesis is to design a diagnostic subsystem for secondary surveillance radar and to construct a functional prototype of communication and testing generator unit. The first part of the thesis aims at description and division of radar systems, with emphasis on air traffic control radars. Main attention is being focused on ATC secondary surveillance radars and description of their function. Following part deals with requirements specification for design of diagnostic system and the system design itself. Part of the thesis forms design, production and testing of prototype of block enabling communication of diagnostic subsystem and function of testing generator for secondary surveillance radar.

Klíčová slova

Radar, diagnostika, BITE, sekundární přehledový radar, komunikace, testovací generátor.

Keywords

Radar, diagnostic, BITE, secondary surveillance radar, communication, testing generator.

Citace

MIKLÍČEK, Marek. *Monitorování technického stavu částí radarových systémů*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Nevorál Jan.

Monitorování technického stavu částí radarových systémů

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto semestrální práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Jana Nevoralu. Další informace mi poskytli odborní konzultanti Ing. Zbyněk Hejda a Ing. Josef Filip. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....
Marek Miklíček
23. května 2017

Poděkování

Je mou milou povinností poděkovat vedoucímu mé práce Ing. Janu Nevoralovi za poskytnuté rady a odborné konzultace. Také bych rád poděkoval externím konzultantům Ing. Josefu Filipovi, Ing. Zbyněku Hejdovi, Jiřímu Tomeškovi a dalším za předmětné připomínky a poskytnuté informace. Dále bych rád poděkoval svým blízkým za podporu v tvůrčí činnosti a toleranci při vypracování této práce.

Obsah

1	Úvod	5
2	Radarové systémy	6
2.1	Historie a obecný popis radaru	6
2.2	Radary pro řízení letového provozu	7
2.3	Sekundární radar	9
2.3.1	Měření radaru	9
2.4	Komunikace dotazovače a odpovídače	11
2.5	Realizace sekundárního přehledového radaru	13
3	Návrh systému diagnostiky	16
3.1	Specifikace požadavků	16
3.2	Popis systému radaru	17
3.3	Návrh koncepce diagnostiky	19
3.3.1	Pasivní diagnostika	20
3.3.2	Aktivní diagnostika	20
3.4	Návrh bloku DIAG	21
4	Návrh hardwaru	23
4.1	Výběr platformy řídicího prvku	23
4.1.1	Zapojení mikrokontroleru	24
4.1.2	Debug rozhraní	25
4.2	Ethernet	25
4.2.1	Zapojení PHYTERU	26
4.3	RS-485	27
4.3.1	Zapojení budiče RS-485	27
4.3.2	Zapojení triggerů	28
4.4	Testovací generátor	29
4.5	Napájení	32
4.6	Deska plošného spoje	34
4.6.1	Deska DIAG	35
4.6.2	Deska DTG	36
5	Firmware	39
5.1	Operační systém	39
5.2	Rozhraní RS-485	40
5.3	Rozhraní Ethernet	40
5.4	Ovládání testovacího generátoru	41

6 Testování	42
6.1 Komunikační jednotka	42
6.1.1 Simulátor bloku radaru	42
6.1.2 Klientská aplikace	43
6.1.3 Testování komunikační jednotky	44
6.2 Testovací generátor	45
6.2.1 Testování testovacího generátoru	45
6.3 Zhodnocení testování	48
7 Závěr	50
Literatura	52
Přílohy	54
A Obsah CD	55
B Seznam požadavků	56
C Schéma desky DIAG	62
D Schéma desky DTG	66
E Deska plošného spoje DIAG	68
F Deska plošného spoje DTG	70
G Seznam součástek - Deska DIAG	72
H Seznam součástek - Deska DTG	75

Seznam obrázků

2.1	Princip funkce radaru [21]	6
2.2	Princip sekundárního přehledového radaru [5]	9
2.3	Směrová charakteristika hlavní a potlačovací antény [5]	10
2.4	Průběh dotazu módu 3/A (a) a C (b) [5]	12
2.5	Formát odpovědi módu 3/A [5]	12
2.6	Funkční schéma sekundárního přehledového radaru podporujícího mód S [12]	14
3.1	Rozdělení radaru na funkční bloky	17
3.2	Blokové schéma koncepce diagnostiky	19
3.3	Blokové schéma aktivní diagnostiky diagnostiky	21
3.4	Detailní blokové schéma bloku DIAG	22
4.1	Část schématu zapojení mikrokontroleru.	25
4.2	Funkční diagram obvodu KZS8081MLX [13]	26
4.3	Doporučené zapojení obvodu ADM2582E [1]	28
4.4	Blokové schéma testovacího generátoru	29
4.5	Funkční diagram obvodu RF3021 [19]	30
4.6	Funkční diagram obvodu HMC542BLP4E [2]	31
4.7	Schéma zapojení regulátoru ladícího napětí	34
6.1	Schéma zapojení simulátoru bloku radaru	43
6.2	Okno klientské aplikace	44
6.3	Průběh modulačního signálu	46
6.4	Spektrum modulovaného signálu	47
6.5	Spektrum nosného signálu	47
6.6	Komunikace s nastavitelným atenuátorem	48
6.7	Spektrum signálu na výstupu	48
C.1	Schéma DIAG – 1. část	62
C.2	Schéma DIAG – 2. část	63
C.3	Schéma DIAG – 3. část	64
C.4	Schéma DIAG – 4. část	65
D.1	Schéma DTG – 1. část	66
D.2	Schéma DTG – 2. část	67
E.1	Deska DIAG – horní strana	68
E.2	Deska DIAG – spodní strana	69
F.1	Deska DTG – horní strana	70

F.2 Deska DTG – spodní strana	71
---	----

Kapitola 1

Úvod

Radary pro řízení letového provozu jsou složitá zařízení, která musí splňovat velmi vysoké požadavky na spolehlivost a také zajištění nepřetržitého provozu bez výpadku. Aby mohly být tyto požadavky splněny, jsou součástí těchto systémů také podsystemy diagnostiky, jejich cílem je odhalování počínajících selhávání jednotlivých komponent zařízení. Odhalování poruch by mělo být automatické a probíhat bez potřeby připojení dalších externích přístrojů a mělo by umět přesně lokalizovat poruchu. Záměrem této práce je návrh systému diagnostiky pro sekundární přehledový radar a vývoj prototypu jedné z jeho komponent.

Vyvíjená součást musí splňovat všechny požadavky plynoucí z norem pro letecká zařízení tak, aby celý systém radaru mohl být certifikován pro reálné použití. Diagnostika musí obsahovat nejenom množství senzorů měřících rozličné veličiny, které udávají stav zařízení, ale také součást umožňující samotestování celého systému. Cílem je vývoj modulu, který bude zajišťovat sběr a přeposílání informací ze senzorů. Dále bude umožňovat generování přesných signálů pro testování přijímací trasy.

Vyvíjený modul je určen pro monopulsní sekundární přehledový radar M10SR určený pro civilní využití. Jedná se o polovodičový radar, který umí pracovat také v módu S (módy sekundárních radarů jsou vysvětleny v podkapitole 2.4). Radar je navržen tak, aby splňoval požadavky vyplývající z norem organizací ICAO a EUROCONTROL. Celý radar je v době psaní této diplomové práce ve stádiu vývoje.

Téma této práce jsem si zvolil proto, že se dlouhodobě zajímám o oblast leteckých systémů a hledal jsem téma práce z oblasti vestavěných systémů. V rámci této práce jsem tak získal možnost rozšířit své znalosti o problematice a také jsem měl možnost vyvinout součást většího zařízení, které bude v budoucnu reálně využíváno.

Diplomová práce je rozčleněna do sedmi kapitol. Úvodní kapitola seznamuje čtenáře s obsahem této práce a jejím členěním. V druhé kapitole jsou uvedeny základní definice a teoretické informace o fungování radarových systémů. Podrobněji se zde zaměřuji na radary určené pro řízení letového provozu a jejich rozdělení. Detailně je zde pak rozebrán princip funkce sekundárního přehledového radaru, protože cílem práce je vývoj součásti pro tento typ radaru (viz kapitola 2). Další kapitola se zabývá celkovým koncepčním návrhem systému diagnostiky, specifikací požadavků na diagnostiku a návrhem jednotlivých částí diagnostiky (viz kapitola 3). Podle zjištěných požadavků a návrhu podsystemu diagnostiky byl navržen prototyp (viz kapitola 4) a firmware pro řízení činnosti bloku (viz kapitola 5). Kapitola 6 se věnuje testování vytvořených součástí. V závěrečné části hodnotím vytvořený prototyp a navrhuji případné další úpravy (viz kapitola 7).

Kapitola 2

Radarové systémy

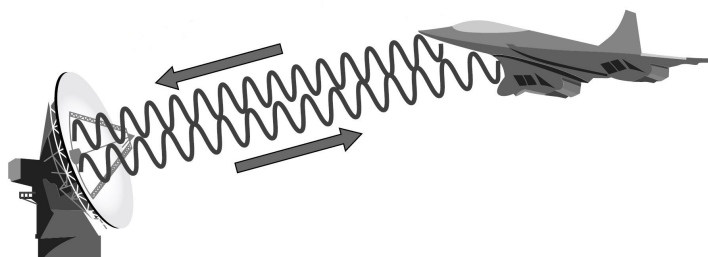
Tato kapitola představuje radarové systémy a popisuje princip jejich funkce. Dále se zaměřuje na radary pro řízení letového provozu a jejich rozdělení. Zvláště se pak zaměřuje na podrobný popis sekundárních radarů.

Informace v této kapitole byly čerpány ze zdroje [5], pokud není v textu uveden jiný zdroj informací.

2.1 Historie a obecný popis radaru

Slovo radar vzniklo z anglického názvu „Radio Detection and Ranging“, neboli rádiové rozpoznávání a zaměřování. Jedná se o zařízení určené pro vyhledávání vzdušných cílů. Radar k určení polohy objektů využívá odrazu elektromagnetického vlnění od objektů.

Základní princip radaru je založen na generování impulzů, které jsou pomocí antény vyzářeny do prostoru. Tento impuls se šíří vzduchem rychlostí světla, tedy přibližně 300 000 km/s. Jakmile vyslaný signál narazí na překážku, tak se část vlnění odrazí zpět směrem k anténě, jak je ilustrováno na obrázku 2.1. Radar se přepne do režimu přijímání a čeká na odražený signál. Jakmile anténa zachytí signál, ten vytvoří impuls v systému radaru. Časový rozdíl mezi vyslaným pulzem a zachyceným pulzem je přímo úměrný vzdálenosti od objektu, který byl radarovým paprskem ozářen.



Obrázek 2.1: Princip funkce radaru [21]

Historie radarů sahá do počátků 20. století, kdy se začaly objevovat první pokusy o využití radiových vln. První zařízení podobné radaru bylo sestrojeno už v roce 1904 a byl jím tzv. telemobiloskop, který vynalezl německý technik Christian Hülsmeier. Jednalo se

o zařízení, které pomocí radarových vln dokázalo určit vzdálenost lodě. Letecké radary se však začaly objevovat až v období před 2. světovou válkou. V průběhu války doznala radarová technika největšího rozmachu, kdy se jednotlivé mocnosti začaly značně zajímat o tuto technologii, pomocí které by dokázaly detekovat přicházející letecký útok, aby se mohly účinně bránit.

V současné době se principu radarů využívá nejen v letectví, ale také v širokém spektru odvětví, jako je například meteorologie (detekce srážek), automobilový průmysl (měření rychlosti a měření vzdálenosti), lodní doprava (detekce překážek), vojenské účely (navádění raket, dělostřelectvo), geografie (mapování terénu zemského povrchu), ale také pro ohřev jídla (mikrovlnná trouba).

Cílem této práce jsou radary pro řízení letového provozu, a proto se jimi budeme zabývat podrobněji.

2.2 Radary pro řízení letového provozu

Základní rozdělení radarů pro řízení letového provozu můžeme učinit podle jejich určení:

- **Přehledové radary** – slouží k vytvoření celkového obrazu o situaci ve vzdušném prostoru. Jejich funkce využívají ve střediscích pro řízení letového provozu. Pomocí informací získaných z těchto radarů jsou naváděna letadla, aby nedošlo ke kolizi nebo nebezpečnému přiblížení letadel k sobě. Kromě samotné polohy letadel mohou o letadlech získávat také další doplňující informace, jako je například výška letadla, identifikace letadla a další.
- **Přesné přibližovací radary** – nacházejí se většinou v areálech letišť a jsou určeny pro přesné navedení letadla na přistání. Jejich funkce je důležitá zejména za špatných meteorologických podmínek, které způsobují snížení viditelnosti. Tento typ radarů je schopen přesně sledovat dráhu letadla a určovat odchylky od standardní přistávací trajektorie. V dnešní době byly tyto radary většinou nahrazeny systémem Instrument Landing System (ILS), který je přesnější a umožňuje také automatizované přistání pomocí autopilota, tzv. autoland. Přesné přibližovací radary se dnes využívají pro vojenské účely nebo na letištích, kde nelze využít systému ILS.
- **Palubní radary** – jsou běžnou součástí vybavení letadla. Těchto radarů jsou dva druhy: radary zabraňující sražení letadel a radary meteorologické. Proti-srážkovými radary jsou dnes povinně vybavena všechna dopravní i vojenská letadla. Smyslem těchto zařízení je nezávisle na pozemních radarech hlídat okolí letadla, detekovat letadla v blízkosti a upozornit posádku na možnou kolizi. Tyto systémy se nazývají „Traffic alert & collision avoidance system“, zkráceně TCAS. Druhým typem palubních radarů jsou meteorologické radary, které slouží k detekci nepříjemných meteorologických jevů. Umožňují tím pilotovi dopředu rozeznat turbulence, aby se jim mohl vyhnout.

Dalším možným kritériem u radarů je rozdělení podle režimu, ve kterém vysílají elektromagnetické vlny:

- **Pulzní radary** – mají jedinou společnou anténu pro vysílání i příjem signálu. Systém radaru zajišťuje přepínání antény mezi vstupem a výstupem. Anténa se připojí na výstup a radar vyšle krátký elektromagnetický impulz, poté se radar přepne do režimu příjmu a čeká se na příjem odraženého signálu.

- **Radary s kontinuální vlnou** – radar vysílá do prostoru nepřerušovaný signál. Aby mohl odražený signál také přijímat, musí mít druhou anténu sloužící pouze pro zachytávání signálu.

Radary pro řízení letového provozu rozdělujeme podle principu funkce do tří kategorií:

- **Primární radary** – asi nejznámější druh radarů. Fungují na již výše popsaném principu odrazu elektromagnetického záření od objektů. Radar vyšle elektromagnetickou vlnu, která vzduchem putuje k objektům ve vzduchu, od kterých se část záření odrazí zpět k anténě radaru. Anténa signál zachytí a zobrazí informaci uživateli. U těchto radarů dochází k odrazům nejen od letadel, ale můžou je způsobit také jiné objekty odrážející elektromagnetické záření. Například to mohou být bouřková mračna nebo také hejna ptáků, vršky kopců, vršky budov a jiné. Takové nežádoucí odrazy musí umět systém radaru rozpoznat a odfiltrovat od letadel. Dále tím dochází k útlumu vyslaného signálu, vyslaný signál je mnohem větší než odražený signál, který se podaří zachytit na anténě. Další nevýhodou tohoto typu radarů je složité určení výšky letadla. Radar získá pouze 2D souřadnice, kde se letadlo v prostoru nachází. Tyto souřadnice radar získá pomocí změření rozdílu doby vyslání signálu a příjmu odraženého signálu, tím zjistí vzdálenost letadla od antény. Dále se získá azimut, což udává úhel natočení antény v době detekce letadla. Pomocí Dopplerova posuvu kmitočtu přijatého signálu lze vypočítat vzájemnou radiální rychlost radaru a cíle. Lze docílit i získávání 3D souřadnic o poloze letadla, a to tzv. rastrovým snímáním, kdy dochází i k vertikálnímu vychylování úzkého radarového paprsku. To lze však činit na úkor snížení rychlosti otáčení radaru, protože se musí v každém horizontálním směru vyčkat na návrat všech vertikálních signálů. I přes to, že vyzařovaný paprsek je velmi úzký, tak pokud se budou dvě letadla ve směru paprsku překrývat, nebo budou-li velmi blízko sebe, může je radar vyhodnotit jako jeden objekt.
- **Sekundární radary** – princip sekundárních radarů je založen na aktivní komunikaci mezi radarem a letadlem. Jelikož cílem této práce je vývoj součástky pro sekundární radar, budu se tomuto typu radarů věnovat podrobně v následující podkapitole 2.3.
- **Pasivní radary** – jsou to radary, které nevysílají žádný signál. Přijímají a analyzují elektromagnetické záření z okolí a snaží se odhalit pozici letadel pouze na základě zachytávání signálů. Využívají signálů rádií, televizí, klasických radarů i signálů vysílaných z letadla samotného. Jsou využívány hlavně pro vojenské účely, ale můžeme je najít i v civilním letectví, zejména pak na letištích. Jejich velkou výhodou je, že nevysílají žádný signál, a tím znemožní nepříteli zjistit pozici radaru. Protože k nepřátelskému letadlu žádný signál od radaru neputuje, tak ani nepřítel neví, že je sledován. Pasivní radary se většinou skládají z několika antén (přijímačů), které zachytávají záření z jejich okolí. Většinou jsou vzdáleny několik kilometrů až desítek kilometrů od sebe. Pomocí geometrického rozložení těchto antén a nimi zachyceného signálu lze určit přesnou polohu letadla. Využívá se principu časového (rozdílu mezi časy, kdy byl signál zachycen na jednotlivých anténách), směrového (využívají směrových charakteristik antén pro určení pozice příchozího signálu), Dopplerovského (vyhodnocuje se Dopplerův posuv kmitočtu v důsledku pohybu sledovaného objektu) nebo kombinací některých z uvedených principů pro přesnější určení. Nespornou výhodou je také cena u těchto radarů, protože nepotřebují vlastní vysílač, který bývá jednou z nejdražších součástí radaru. Nevýhodou je menší přesnost a závislost na okolních signálech.

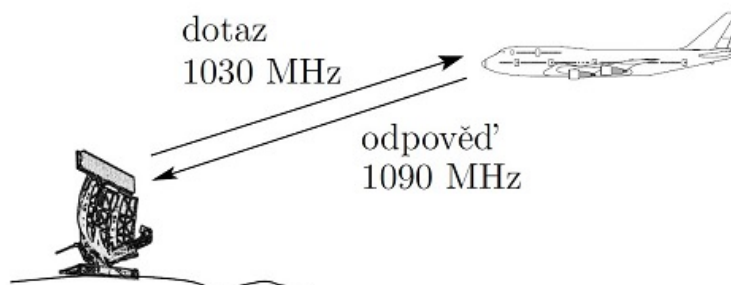
V praxi se však často setkáváme s kombinací více druhů radarů, aby se eliminovaly nevýhody plynoucí z typu radaru. Nejčastěji se užívá spojení, kdy, na anténu primárního radaru umísťuje anténa radaru sekundárního. Toto spojení umožňuje vyhledat přesně všechny vzdušné cíle a identifikovat je.

2.3 Sekundární radar

Sekundární radar je založen na principu aktivní komunikace mezi radarem a cílovým objektem. Radar vyšle signál k letadlu a místo jeho odrazu přijímá odpověď z tzv. odpovídače, který je umístěn v letadle. Vývoj tohoto typu radarů započal po druhé světové válce, kdy se postupně začala zvětšovat hustota letového provozu a bylo potřebné letadla identifikovat. Na přelomu padesátých a šedesátých let 20. století vydala Mezinárodní organizace pro civilní letectví (ICAO) dokument popisující sekundární přehledový radar (SSR – Secondary Surveillance Radar). Sekundární radary v dnešní době často slouží jako doplněk k primárnímu radaru pro identifikaci cíle.

Radar pro svou funkci vyžaduje, aby byl v letadle umístěn odpovídač (transpondér). Pokud toto zařízení zachytí vysílání z radaru, rozpozná v něm typ dotazu, a vyšle odpověď na tento dotaz. Aktivní vysílání z letadla prodlužuje dosah radaru, protože vysílaný signál je silnější než signál odražený od letadla v případě primárního radaru. Nevýhodou však je, že zaznamená pouze letadla vybavená odpovídačem.

Sekundární přehledový radar pracuje na přesných, normou stanovených, frekvencích v pásmu L. Dotazy vysílané radarem (dotazovač – interrogator) jsou na frekvenci 1030 MHz a odpovídače vysílají na frekvenci 1090 MHz, jak je možné vidět na obrázku 2.2. Signály jsou vysílány s vertikální polarizací.



Obrázek 2.2: Princip sekundárního přehledového radaru [5]

Tím, že všechny dotazovače a odpovídače vysílají na stejných frekvencích, může docházet k chybám. Jednou z nich je například tzv. grambling neboli překrývání odpovědí dvou odpovídačů nebo zachycení odpovědi vyvolané dotazem jiného radaru (tzv. fruiting).

2.3.1 Měření radaru

Tato podkapitola popisuje, jak probíhá měření jednotlivých veličin sekundárním radarem.

Měření vzdálenosti cíle

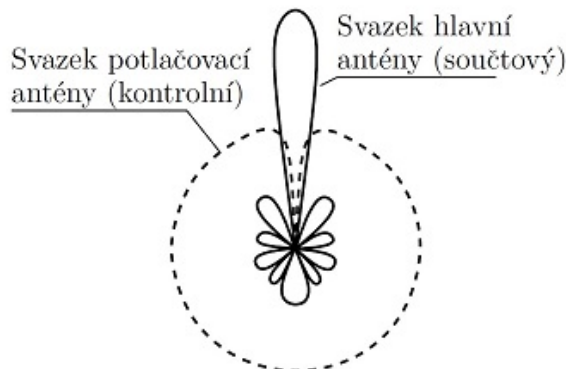
Vychází z naměřeného časového rozdílu mezi náběžnou hranou posledního vysílaného impulzu dotazu a náběžnou hranou prvního pulzu přijaté odpovědi [5]. Vzdálenost se vypočítá vztahem 2.1.

$$R = ((t_P - t_V) - 3 \mu s) * \frac{c}{2} \quad (2.1)$$

Kde t_P je čas příjmu náběžné hrany prvního impulzu, t_V je čas vyslání náběžné hrany posledního impulzu dotazu a c je rychlost šíření signálu (rychlost světla) [5]. Ve výpočtu je zahrnuto zpoždění odpovídače (stanovené normou na $3 \mu s$ [12]) a dvojnásobek doby pro cestu signálu – tedy cestu od radaru a zpět. Přesnost tohoto měření je dána normou definovaným zpožděním odpovídače, což odpovídá přesnosti $\pm 75m$. Rozlišovací schopnost radaru je limitována délkou vysílané odpovědi, která v módech A a C (pozn. významu jednotlivých módů se věnuje následující podkapitola 2.4) trvá $20,3 \mu s$, tomu odpovídá rozlišení $3,05 km$. Pokud je vzdálenost letadel menší, dochází k překrývání odpovědí, tzv. garbling. Existují metody, jak takový signál zrekonstruovat (tzv. degarbling), ale nejsou příliš spolehlivé. Pro rozlišení se využívá adresnost dotazů v módu S.

Měření azimutu cíle

Pro měření polohy cíle se využívá směrové charakteristiky antény radaru. Z toho plyne požadavek na co nejužší paprsek signálu vyzařovaného radarem, aby bylo měření co nej přesnější. Zde vyvstává problém s vysíláním a příjmem postranními svazky antény, které mohou způsobit nejednoznačnost v určení azimutu. Směrová charakteristika antény není pouze v požadovaném směru, ale v menším výkonu vysílá do všech směrů. Směrová charakteristika antény je znázorněna na obrázku 2.3. Aby mohly být tyto nechtěné signály eliminovány, je na sekundární radar přidána tzv. potlačovací anténa. Hlavní anténa vysílá signál označovaný jako součtový SUMA a potlačovací anténa vysílá signál kontrolní OMEGA. Odpovídač v letadle dokáže tyto signály rozlišit, a na signály vyslané potlačovací anténou vůbec neodpovídá. Obdobně je tomu při příjmu signálu, kdy radar dokáže rozlišit, jestli byl zaznamenán hlavní anténou nebo potlačovací anténou (nechtěné cíle). Pro větší zúžení přijmaného paprsku signálu se využívá další přidaná anténa, která generuje signál DIFF. Určení azimutu je méně přesné než u primárních radarů, protože sekundární radary pracují na nižší frekvenci, a mají tedy podstatně větší šířku svazku.



Obrázek 2.3: Směrová charakteristika hlavní a potlačovací antény [5]

Měření výšky cíle

Sekundární radar neumožňuje přímé měření výšky cíle. Získává se z odpovídače letadla pomocí dotazů v módu C, nebo adresném módu S.

Měření rychlosti cíle

Pro měření rychlosti nelze využívat Dopplerova jevu, protože signál je vysílán ze dvou různých zařízení. Rychlost lze určit výpočtem z rozdílu více naměřených souřadnic v jednotlivých otáčkách radaru.

2.4 Komunikace dotazovače a odpovídače

Komunikace dotazovače a odpovídače sestává z přesně definovaného tvaru dotazů a odpovědí podle jejich typu tzv. módu. Jednotlivé módy jsou přesně definovány v normě [12] a shrnuty v tabulce 2.1. Módy pro vojenské využití (IFF – Identification, friend or foe) jsou označovány čísly a módy určené pro civilní letectví jsou označovány písmeny. Dnes se využívají jen dotazy v módu A a C v civilním letectví a v módu 3 ve vojenském letectví. Módy A a 3 jsou shodné a pomocí nich se radar dotazuje na identifikaci letadla neboli číslo letu. Ostatní módy definované v normě [12] se dnes již nevyžívají, protože docházelo k záměnám za ostatní módy nebo již nevyhovují dnešním požadavkům.

Mód	Popis
1	IFF
2	IFF, individuální kódy
4	IFF, kryptomód
3/A	číslo letu
B	nevyžívá se (docházelo k záměnám s módy A a C)
C	barometrická výška letu
D	nevyžívá se (docházelo k záměnám s módy A a C)
S	adresný mód s přenosem vyžádaných dat

Tabulka 2.1: Seznam módů sekundárního radaru [5]

Mód 3/A

Tento mód je určen pro zjištění kódu letu. Kód je tvořen čtyřmi oktalogovými číslicemi (0-7777₀ tedy 4096 různých kombinací). Číslo letu pro lety nad Evropou uděluje centrálně organizace Eurocontrol. Existuje několik kódů se specifickým významem, viz tabulka 2.2.

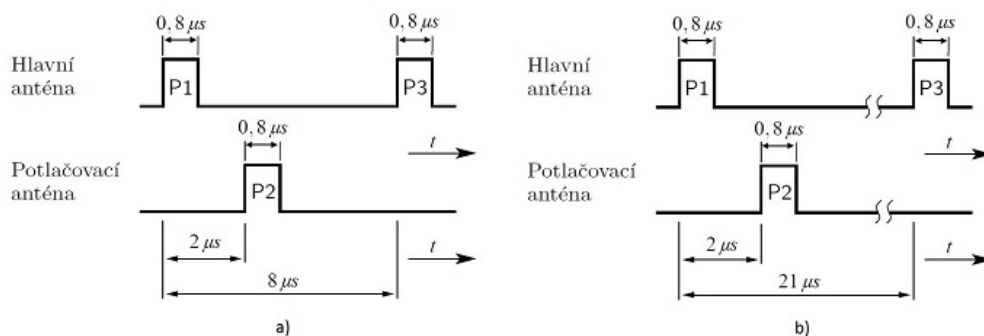
Dotaz je tvořen sérií pulzů P1, P2 a P3 o délce 0,8 μ s s časovými rozestupy uvedenými v obrázku 2.4.a. Pulz P2 je vysílán potlačovací anténou, to dle velikosti amplitudy zachyceného signálu umožňuje odpovídači detekovat, jestli se letadlo nachází ve vysílání hlavního svazku radaru. Pokud má pulz P2 větší amplitudu než pulz P1, je tento dotaz ignorován. Signál je amplitudově modulovaný na nosné frekvenci 1030 MHz.

Odpověď je tvořena 12 významovými bity a je ohraničena pulzy F1 a F2. Uprostřed signálu se nachází jedna volná pozice. Podrobný popis signálu je uveden na obrázku 2.5.

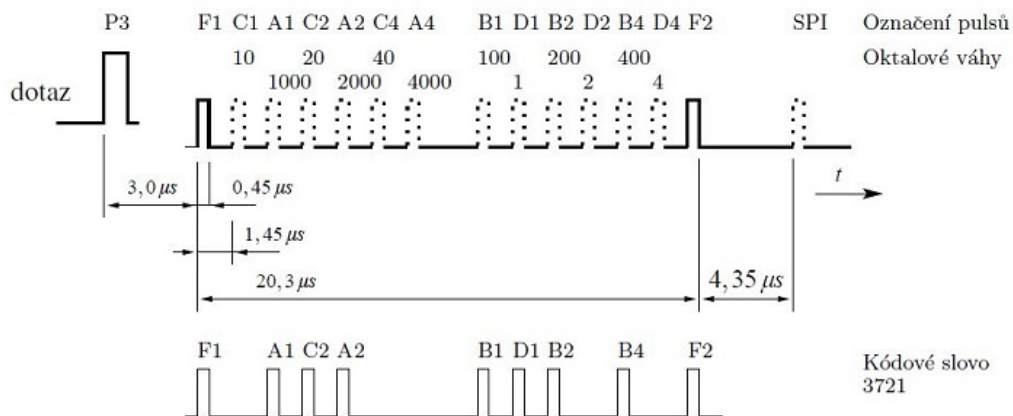
Speciální pulz SPI (Special Pilot Identification) je za odpovědi módu A vyslán na žádost pozemního řídicího po dobu 20s. Umožňuje ověření identity pilota.

kód (oktalově)	význam
7500	nezákonné vměšování (únos)
7600	ztráta spojení
7700	nouze
7777	používáno pro testovací cíle

Tabulka 2.2: Speciální kódy módu 3/A [5]



Obrázek 2.4: Průběh dotazu módu 3/A (a) a C (b) [5]



Obrázek 2.5: Formát odpovědi módu 3/A [5]

Mód C

Mód C je určený pro zjištění výšky letadla udávané palubním barometrickým výškoměrem. Dotaz v módu C se liší od dotazu v módu A pouze větším rozestupem mezi pulzy P1 a P3, viz obrázek 2.4.b.

Odpověď má stejnou strukturu jako u módu A pouze s tím rozdílem, že bit D1 je trvale v 0. Využívá tedy pouze 11 bitů pro přenos informace. K záměnám odpovědí by docházet nemělo, protože jsou vždy vázané na dotaz.

Mód S

Problémy, kterými trpěl původní návrh koncepce sekundárního radaru, řeší později přidaný mód S. Rozeznáváme dva podtypy tohoto módu, a to adresný dotaz a všeobecný dotaz.

Adresný dotaz je určen pouze pro adresované letadlo, ostatní jej ignorují. Stejně je tomu u starších odpovídačů, které tento mód nepodporují, takže vyhodnotí signál jako neplatný. Formát datové zprávy sestává z preamble, impulzy P1 a P2, a dlouhého pulzu datové zprávy kódované pomocí binární fázové modulace. Informace ve zprávě je obsažena na 56 nebo 112 bitech, z čehož posledních 24 bitů tvoří adresu odpovídače a zabezpečení cyklickým kódem. Potlačení nechtěných odpovědí je zajištěno pulzem P5 vyslaným přes potlačovací anténu. Na dotazy v tomto módu reagují odpovídače, i pokud je letadlo na zemi, u jiných módů tomu tak není.

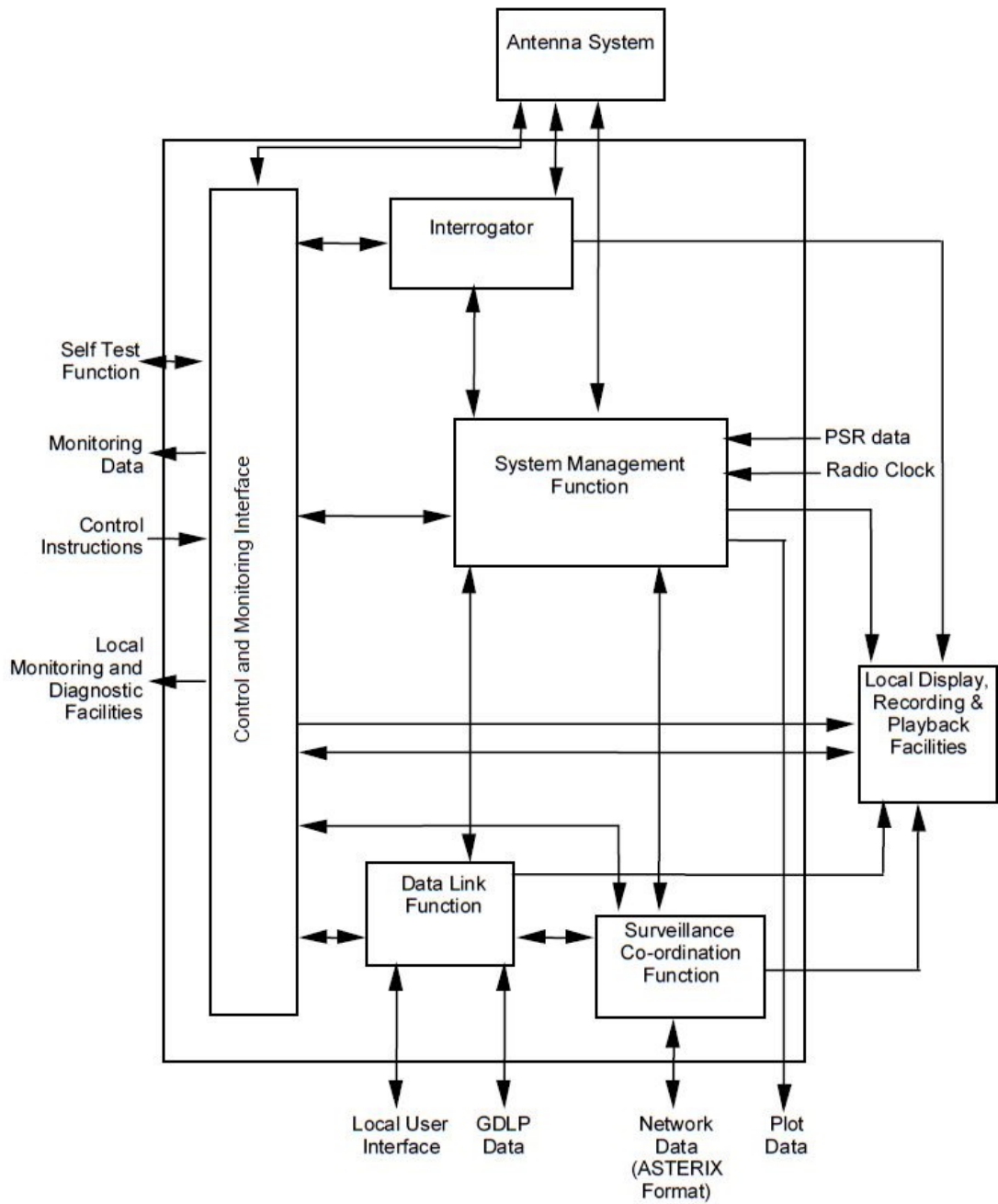
Všeobecný dotaz v módu S je rozšíření dotazů v módech A a C. Průběh datové zprávy je stejný, pouze je doplněn impulzem P4 následujícím $2 \mu s$ po nástupné hraně P3. Odpovídače nepodporující mód S odpovídají odpovědí jako u módu A nebo C. V případě, že odpovídač podporuje mód S, je v odpovědi opět obsažena datová zpráva jako u adresního dotazu.

2.5 Realizace sekundárního přehledového radaru

Popisem všech požadavků a návrhem funkční specifikace radaru se zabývá norma Eurocontrol 3.11 [9]. Návrh samotného radaru se tedy váže na obecné schéma z této normy, které najdeme na obrázku 2.6.

Funkčnost radaru je popsána vysvětlením funkce jednotlivých bloků ze schématu:

- **Anténní systém** – zajišťuje správnou funkčnost antény. Je složen ze tří hlavních částí: generátor dat azimutu, mechanismus pohybu antény a signálové části. Generátor dat azimutu je založen na přesném enkodéru, který zjišťuje směr natočení antény a udává, kterým směrem anténa vysílá. Mechanismus pohybu antény je složen z motorů, které otáčejí anténou, a rotační spojky, ta je určena pro řízení motorů. Příkazy pro řízení jsou přijímány od řídicí jednotky (CAM). Signálová část zajišťuje rozdělení signálů do správných částí antény (postranních laloků a krajních částí) tak, aby vyzařovaný paprsek byl co nejužší a zamezilo se nežádoucím jevům.
- **Dotazovač (Interrogator)** – je složen ze dvou částí, a to části přijímací a vysílací. Přijímač se stará o úpravu přijatého signálu. Je tvořen třemi identickými trasami, které upravují signály SUMA, OMEGA a DIFF. Tyto signály jsou přijímány z anténního systému. Signál je postupně upravován z analogového vysokofrekvenčního signálu na požadovanou úroveň zesílení, demodulací a filtrací signálu, až na digitální signál, u kterého je možné vyhodnotit obsaženou zprávu. Vysílací část je v podstatě podobná jen jí signál prochází v opačném směru. Je vytvořen dotaz, který je v modulátoru modulován, zesílen výkonovými zesilovači a odeslán do anténního systému.
- **Systémové řídicí funkce** – hlavní činností tohoto bloku je zajistit řízení celého radaru. Zajišťuje vyhodnocení přijatých digitálních signálů, potlačování nežádoucích odpovědí a úpravu informací, aby mohly být zobrazeny uživateli včetně doplnění



Obrázek 2.6: Funkční schéma sekundárního přehledového radaru podporujícího mód S [12]

informace o azimutu. Předávání získaných dat bloku, který zajišťuje koordinaci se sítí dohledových radarů.

- **Lokální zobrazení a nahrávání** – slouží pro zobrazení výstupu naměřených dat uživateli radaru.
- **Řídicí a monitorovací rozhraní** – umožňuje uživateli nastavovat a kontrolovat jednotlivé parametry radaru. V tomto bloku je obsažena diagnostika, která vyhodnocuje, jestli všechny součásti radaru pracují správně a případně autonomně přepíná na redundantní část. Upozorní také uživatele, že některá součást radaru nepracuje korektně. Tento blok zajišťuje i samo-testovací funkce radaru, které v době kdy radar nepracuje, prověřují a kalibrují jednotlivé součásti.
- **Dohledová koordinace** – slouží pro připojení radaru do sítě, a tím umožňuje přístup k informacím, které zjistil. Do sítě se odesílají informace o detekovaných cílech a času jejich detekce. Obsluze řízení letového provozu umožňuje zobrazovat informace z více radarů. Přenášené zprávy jsou standardizovány normami ASTERIX od organizace Eurocontrol.
- **Funkce datového spojení** – jedná se funkce módu S, který umožňuje datovou komunikaci s cílem a přenášení různých informací. Jedná se o součástku, která byla doplněna do původního návrhu sekundárního radaru po zavedení komunikačního módu S. Informace jsou získávány z pozemní sítě GDLP nebo z lokálního rozhraní radaru. Například může být prostřednictvím těchto funkcí přenášeny grafické informace o počasí nebo o letovém provozu [7].

Kapitola 3

Návrh systému diagnostiky

V této kapitole budou nejprve specifikovány požadavky na vyvíjený podsystém. Dále následuje popis navrhnutého radarového systému se zaměřením na požadavky plynoucí z jeho konstrukce. Závěr kapitoly se věnuje samotnému návrhu systému diagnostiky.

3.1 Specifikace požadavků

Hlavními organizacemi zabývajícími se standardizací požadavků pro mezinárodní letecký provoz jsou organizace ICAO (Mezinárodní organizace pro civilní letectví) a organizace Eurocontrol (Evropská organizace pro bezpečnost leteckého provozu). Konkrétní normy od těchto organizací zabývající se problematikou sekundárních přehledových radarů jsou norma Eurocontrol 3.11 - European Mode S Station Functional Specification [9] a norma ICAO Annex 10, Volume IV [12]. Normy od společnosti ICAO mají český překlad, který je formou výnosů součástí zákona o civilním letectví, zákon číslo 49/1997 Sb. Sekundárními přehledovými radary se zabývá tzv. letecký předpis L10/IV: Letecký předpis o civilní letecké telekomunikační službě, svazek IV - Přehledový radar a protisrážkový systém [17].

První ze jmenovaných norem, Eurocontrol 3.11 [9], stanovuje požadavky, které musí splňovat sekundární přehledový radar s módem S. Tato norma tedy je pro stanovení požadavků klíčová, bylo také přihlíženo na požadavky plynoucí z ostatních norem. Všechny požadavky na diagnostiku radaru z kapitoly 10 (Kontrola a monitorování) a jiné požadavky odkazované v textu normy jsou vypsány v příloze B.

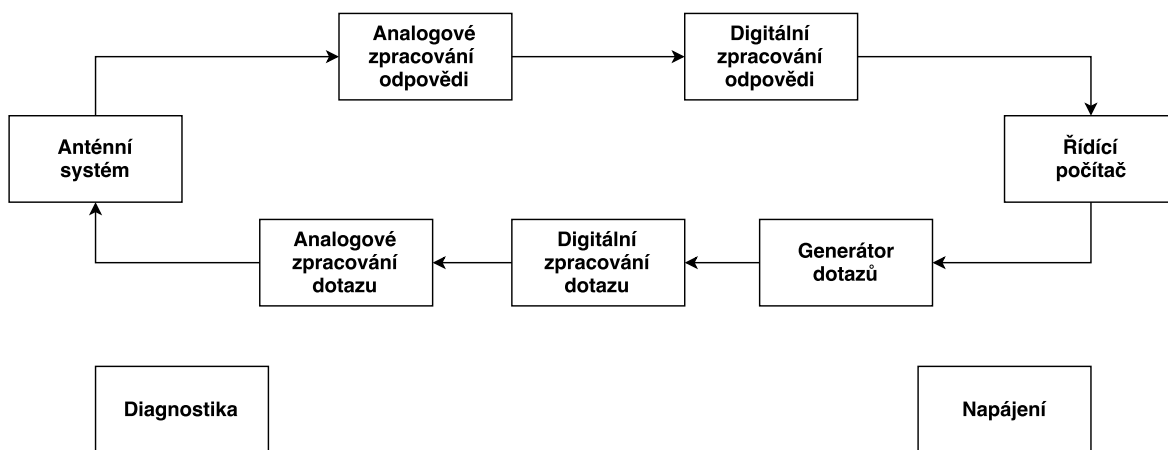
Dále je v práci shrnut obsah těchto požadavků. Hlavním cílem diagnostiky je zajistit, že radar bude zajišťovat trvalý dohled v požadovaném pokrytí. Diagnostika bude monitorovat stav všech hlavních součástí radaru a bude shromažďovat statistické informace o radaru a přenášených zprávách. Samotná funkčnost radarového systému nebude závislá na diagnostice, tedy pokud dojde k odpojení diagnostiky, bude radar pokračovat ve své funkci. Systém bude podporovat interní online BITE testování (za chodu systému) a offline BITE testování (když je radar v režimu údržby). Tyto testy musí být schopné detekovat všechna selhání, která mají vliv na výkonnost systému. Musí pokrývat minimálně 90% součástí. Minimálně 95% selhání musí být detekováno; izolováno musí být přinejmenším 95% selhání z těchto detekovaných poruch. Systém diagnostiky funguje bez potřeby připojení dalšího externího testovacího hardwaru. Každá zjištěná porucha musí být obsluze nahlášena nejpozději do dvou sekund od jejího detekování. Systém musí být navržen jako dvoukanálový, s možností přepínání mezi redundantními kanály. Maximální doba zotavení z chyby (MTTR) jednotky diagnostiky musí být menší než půl hodiny.

Norma ICAO Annex 10, Volume IV [12] se zabývá celkovým obecným stanovením funkčnosti systému sekundárních radarů a jejich používání. V normě se nezabývají předpisy pro samotnou konstrukci radaru. Neplnou z ní tedy žádné speciální požadavky na modul diagnostiky.

Další normou, která stanovuje požadavky na sekundární přehledový radar, je například vojenská norma STANAG 4193 vydaná organizací NATO. Radar však konstruujeme pro civilní používání, a proto se nebudeme požadavky z norem pro vojenské radary zabývat.

3.2 Popis systému radaru

Při návrhu diagnostiky systému je nutné vycházet z návrhu a znalosti celkového systému sekundárního radaru. Obecný návrh systému již byl představen v podkapitole 2.5. Podle tohoto obecného návrhu vzniklo fyzické rozdělení radaru na jednotlivé funkční bloky, které bude radar reálně obsahovat. Toto rozdělení je zobrazeno na schématu 3.1.



Obrázek 3.1: Rozdělení radaru na funkční bloky

Stručný popis jednotlivých bloků se zaměřením na možné specifické požadavky na diagnostiku:

- **Anténní systém** – zahrnuje antény, včetně funkcí pohybu antény, měření azimutu a přijímání signálu. V této části je potřeba se při kontrole zaměřit na správnost funkce motorů, hlídání stavu oleje v převodovce, přesnost měření azimutu a stav přepínacího relé.
- **Analogové zpracování odpovědi** – slouží k analogovému zpracování signálů zachycených anténami. Blok je složen ze tří stejných paralelních větví, kdy každá se stará o jeden ze signálů SUMA, OMEGA a DIFF. Nejprve je signál upraven na žádanou intenzitu pro zpracování a dále filtrován pomocí dolně propustných filtrů. Při diagnostice této části je vhodné se zaměřit na vstupní výkon, výstupní výkon a šumové číslo.
- **Digitální zpracování odpovědi** – Přijímá upravený analogový signál, demoduluje jej a zjišťuje obsah přijaté zprávy. Tento blok také zajišťuje potlačení chybných signálů (tzv. defruiting) a rekonstrukci překrytých signálů (tzv. degarbling). Diagnostika u tohoto bloku se zaměřuje na vstupní a výstupní (digitální) výkon, šumové číslo a zesílení přijímací trasy.

- **Řídicí počítač** – stará se o řízení celého systému radaru. Řídí zobrazování naměřených informací uživateli a zajišťuje normou předepsanou komunikaci. Jelikož je realizována univerzálním počítačem, není zde nutné diagnostikovat speciální parametry.
- **Generátor dotazů** – zajišťuje generování požadovaných dotazů podle parametrů stanovených normou. Zde je důležité kontrolovat správnost vygenerovaných dotazů.
- **Digitální zpracování dotazů** – stará se o rozdělení dotazů na signály SUMA a OMEGA. Dále také zajišťuje jejich správnou modulaci. Zde je potřeba hlídat vstupní výkon, výstupní výkon a šumové číslo.
- **Analogové zpracování dotazu** – tento blok má za úkol především zesílení signálu výkonovými zesilovači. Tomu odpovídá zaměření diagnostiky na vstupní výkon, výstupní výkon a šumové číslo.
- **Napájení** – Zajišťuje napájení všech součástí. Na blokovém schématu 3.1 není pro přehlednost znázorněno propojení, které je na všechny součásti. Nevznikají zde specifické požadavky na diagnostiku.
- **Diagnostika** – slouží ke sběru a vyhodnocení naměřených diagnostických údajů. Kontroluje správnost funkce radaru a stav jeho součástí. Blokové schéma 3.1 pro přehlednost neznázorňuje připojení, které je obousměrné ke každému bloku.

U všech popsaných bloků radaru jsou také obecné vlastnosti pro kontrolu, které jsou pro všechny bloky stejné. Jsou to například: teplota, funkčnost ventilátoru, napájení atd. Dále je potřebné do systému zahrnout i senzory umístěné na radaru, například kouřový senzor, anemometr, teplotní senzor v kontejneru, dveřní senzor a další – dle potřeby. Systém musí umožňovat připojení dalších senzorů podle potřeb zákazníka. Pod diagnostiku také spadá správa napájení a řízení přepnutí na náhradní zdroj v případě výpadku hlavního napájení.

Redundance systému radaru

Účelem podsystému diagnostiky je nejen odhalit závadu v systému, ale také autonomně zachovat funkci radaru. K tomuto účelu slouží redundantní (záložní) část systému. Nutnost redundance plyne také z normy Eurocontrol 3.11 [9], která stanovuje, že systém musí být vícekanálový, tedy musí obsahovat redundantní část. Norma však blíže nespecifikuje, která část systému má být redundantní ani způsob redundance.

Redundance v systému má odůvodnění ve zvýšení odolnosti systému proti výpadku. Pokud některý z bloků selže, je zastoupen redundantní částí a systém tak zůstává v provozu. Při selhání bloku, který nemá zálohu, nastává tzv. kritický výpadek. To je takový výpadek, který vyřadí celý systém z provozu.

U některých částí systému redundance není možná. Jednou z takových částí je například blok anténního systému.

Možné varianty redundance systému:

- **Bez redundance** – jak již bylo popsáno výše, tak systém bez jakékoliv redundance je podle normy Eurocontrol 3.11 [9] nepřijatelný. V případě takového systému by porucha na kterémkoliv bloku vyřadila systém z provozu.
- **Redundance dvou nezávislých kanálů** – zapojení redundantní části jako dvou paralelních kanálů. Tyto kanály jsou spojeny pouze na vstupu a výstupu. Oba kanály vykonávají stejnou funkci paralelně v plném zatížení. V případě detekce poruchy

v jednom z kanálů systém autonomně přepne na druhý kanál a pokračuje v provozu se současným upozorněním obsluhy na poruchu. Pokud dojde k selhání v obou kanálech, tak nastane kritický výpadek, který vyřadí systém z provozu.

- **Redundance s plným propojením** – dva redundantní kanály, kde stejné bloky obou větví jsou na vstupu i výstupu spojeny. Tímto propojením získáme další navýšení odolnosti proti výpadekům. Systém může libovolně kombinovat bloky z obou kanálů. Kritický výpadek nastane až v případě výpadku dvou stejných bloků. Tato varianta je však velmi náročná na řízení a také na samotnou konstrukci.

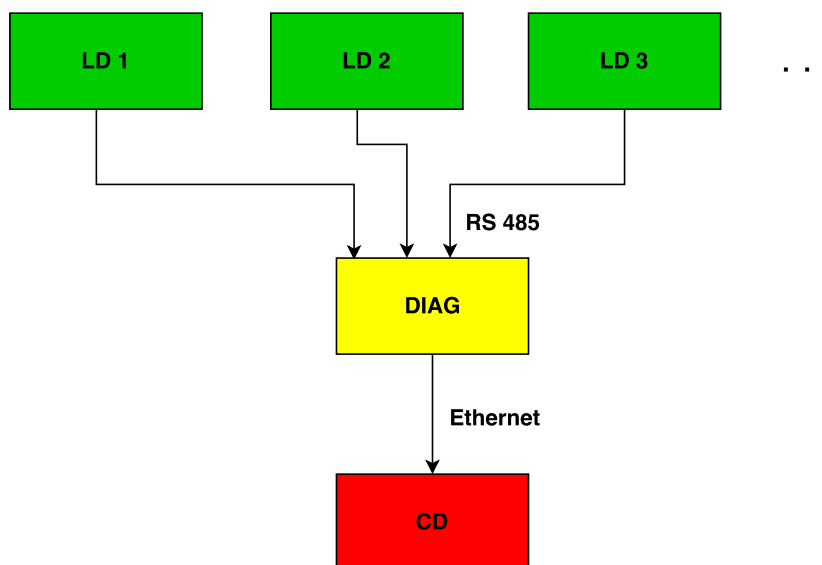
Po zvážení všech variant byla zvolena varianta s redundancí dvou nezávislých kanálů. Tato varianta splňuje všechny požadavky na systém a také jednoduchost na její implementaci. Redundance s plným propojením by byla příliš komplikovaná.

3.3 Návrh koncepce diagnostiky

Návrh systému diagnostiky pro sekundární přehledový radar má podle zadání práce být zaměřen na standard BITE a také povinnost obsažení BITE plyne z normy Eurocontrol 3.11 [9]. Built-in test equipment (zkráceně BITE) je diagnostika zařízení, která se snaží o detekci a izolaci selhávajících součástí bez potřeby jakéhokoliv externího vybavení. Komplexně lze říci, že BITE zahrnuje vše od diody indikující, že systém je pod napětím až po zabudovaný generátor testovacích signálů, které slouží k prozkoumání stavu systému [8].

Diagnostiku BITE lze rozdělit na pasivní BITE, jehož účelem je monitorování systému pomocí informací získaných ze zabudovaných senzorů, a aktivní BITE, které má za úkol zjišťovat stav systému pomocí vygenerovaných testovacích signálů. Pro účely diagnostiky systému radaru využijeme oba dva typy BITE.

Systém diagnostiky byl navržen tak, že se skládá ze tří bloků, jak je vyobrazeno na blokovém schématu 3.2. Na schématu je také možné vidět navrženou komunikaci mezi jednotlivými bloky diagnostiky. Funkce jednotlivých bloků je popsána níže.



Obrázek 3.2: Blokové schéma koncepce diagnostiky

I samotný systém diagnostiky byl navržen jako redundantní, kdy každý bude monitorovat oba kanály systému. Jednotlivé kanály diagnostiky budou navzájem propojené na úrovni bloku CD, aby mohly vzájemně komunikovat. Pro přehlednost rozdělíme popis diagnostiky podle funkce na dvě části: pasivní diagnostika a aktivní diagnostika. Tyto části odpovídají jednotlivým typům aktivní a pasivní BITE.

3.3.1 Pasivní diagnostika

Odpovídá části pasivního BITE a jejím účelem je sběr a vyhodnocení informací získaných ze zabudovaných senzorů.

Blok LD (lokální diagnostika) je součástí každé z fyzických částí systému, které jsou popsány v podkapitole 3.2. Na každé desce jsou umístěny senzory, které sledují různé parametry součásti. Protože jednotlivé senzory jsou různých druhů a typů, je třeba ke každému senzoru specifickému přístupu. Lokální diagnostika zajišťuje tento specifický přístup, čte a shromažďuje informace ze všech senzorů z desky, na které se nachází. Získané informace pak převádí do jednotné digitální formy a po sériové lince je přenáší do bloku DIAG. Při startu systému je zapotřebí přenést všechny informace a dále při běhu systému se již přenášejí pouze hodnoty, které se změní. Díky tomu jsou méně vytěžovány jednotlivé komunikační linky.

Cílem bloku DIAG je, že ze sériových linek čte jednotlivé informace od všech bloků LD. Tyto informace sbírá a vytváří z nich souhrnné pakety, které následně posílá přes síťové rozhraní Ethernet do nadřazeného bloku CD.

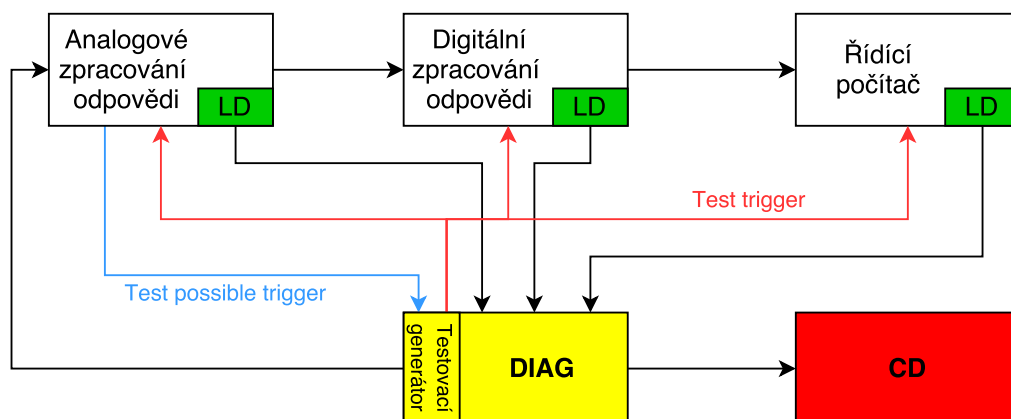
Blok CD (Centrum diagnostiky) je navržen jako universální počítač, jehož naprogramovaný software bude hlavou celé diagnostiky. Tento blok bude ze sítě přijímat informace a zajišťovat jejich vyhodnocení. Na základě těchto informací bude rozhodovat o případné rekonfiguraci systému (přepnutí na redundantní kanál). Další funkcí bude komunikace s uživatelem, tedy pokud se vyskytne porucha, upozorní uživatele na vadnou součást, kterou je třeba vyměnit. Blok bude také jednotlivé informace ukládat a umožňovat zobrazování statistických údajů.

3.3.2 Aktivní diagnostika

Funkce této části bude odpovídat aktivnímu BITE. Základem bude generátor testovacího signálu, který bude simulovat odpověď od odpovídače letadla. Generátor signálu bude součástí bloku DIAG. Blokové schéma tohoto generátoru je možné vidět na obrázku 3.3.

Generátorem odpovědi budou vygenerovány jednotlivé signály testovací odpovědi. Tento generátor bude umožňovat generování odpovědi pro všechny podporované módy. Signál odpovědi musí přesně dodržet parametry časování stanovené normou ICAO [12]. Nosný signál pro modulaci bude generován sinusovým oscilátorem na frekvenci 1090 MHz. Modulátor zajistí požadovanou modulaci signálu podle módu generované odpovědi. Pomocí atenuátorů bude možné upravit sílu výstupního výkonu signálu, aby bylo možné sledovat, jak systém reaguje na signály o různém výkonu. Testovací signál bude možné utlumit až na hodnotu odpovídající minimální citlivosti radaru. Po náš konkrétní radar je tato hodnota stanovena na -85 dBm.

Takto vygenerované signály jsou dány na vstup bloku analogového zpracování odpovědi, který normálně zpracovává signál přijatý z antény. Současně se signálem je také generován signál „Test Trigger“, který značí, že signál na vstupu je testovací. Pomocí tohoto signálu se také zajistí, že se testovací odpověď nedostane na standardní výstup. Sběr jednotlivých naměřených informací zajistí část sběru informací popsaná výše.



Obrázek 3.3: Blokové schéma aktivní diagnostiky diagnostiky

Aktivní testování radaru bude probíhat také za provozu radaru. Proto bude do bloku DIAG zaveden signál „Test Possible Trigger“, který bude značit, že radar je ve stádiu klidu mezi odpověďmi a je tedy možné provést test. Testování bude také možné, pokud systém není v provozu.

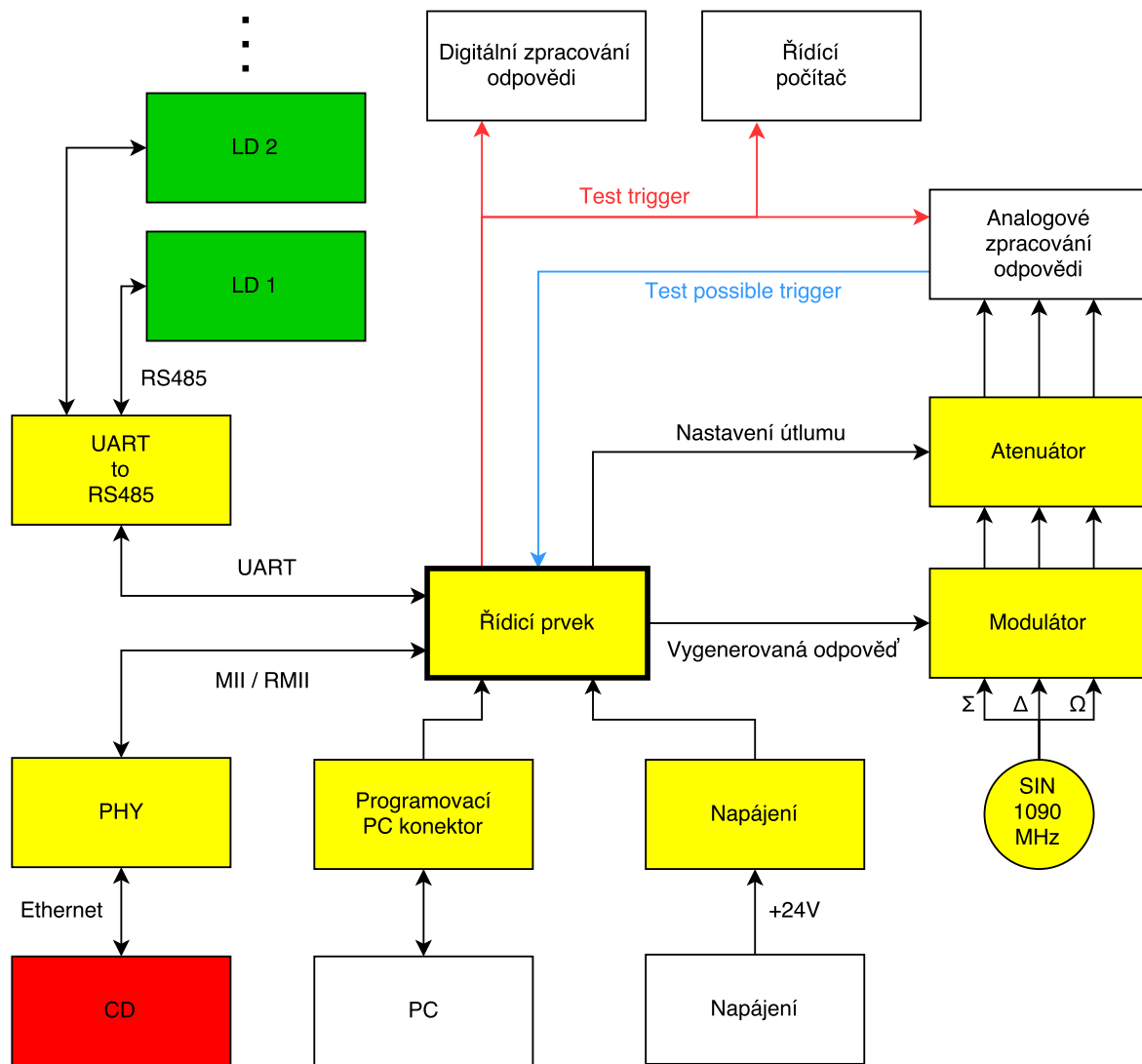
3.4 Návrh bloku DIAG

Cílem této práce je vytvořit funkční prototyp bloku DIAG a otestovat jej. Proto se při návrhu zaměříme na jeho detailní popis. Funkčnost tohoto bloku byla již vysvětlena v podkapitole 3.3. Na obrázku 3.4 je zobrazeno detailní blokové schéma této desky, včetně všech potřebných bloků a jejich vzájemného propojení.

Hlavním prvkem tohoto bloku je řídicí prvek, který zajišťuje řízení celého bloku DAIG. K napájení řídicího prvku a všech potřebných částí je určen blok napájení. Zdrojem napětí pro tuto část je přívod z napájecího bloku radaru. Programovací konektor je určen pro aktualizaci verzi firmwaru a také pro ladění při vývoji.

Komunikace s bloky Lokálních diagnostik jednotlivých desek je zajištěna pomocí sběrnice RS-485. Pro převod na úroveň této sběrnice je určen převodník, který s mikrokontrolerem komunikuje pomocí sériového rozhraní UART. Pro komunikaci s nadřazeným blokem CD je navržena komunikace po sběrnici Ethernet. Podporu síťové vrstvy MAC zajišťuje mikrokontroler, který bude pomocí určeného rozhraní komunikovat s blokem PHY zajišťujícím fyzickou vrstvu.

Testovací generátor funguje tak, že mikrokontroler vygeneruje požadovanou odpověď, která je v modulátoru modulována na nosný signál z bloku oscilátoru. Zde je také odpověď rozdělena na jednotlivé signály. Ty dále postupují do bloku řízených atenuátorů, kde je nastaven útlum signálu. Poté jsou signály vyslány přímo do bloku Analogového zpracování odpovědi, kde jej systém radaru začne zpracovávat. Test je řízen pomocí signálů „Test Trigger“ a „Test Possible Trigger“.



Obrázek 3.4: Detailní blokové schéma bloku DIAG

Kapitola 4

Návrh hardwaru

V předchozí kapitole byly stanoveny obecné požadavky kladené na vyvíjenou součást, tedy výše popsaný blok DIAG. Cílem této kapitoly je popsat návrh a realizaci hardwaru této jednotky. Nejprve se budeme zabývat výběrem jednotlivých komponent, poté návrhem zapojení, tvorbou schématu a desky plošných spojů realizující blok DIAG.

Výsledná schémata jsou v přílohách C a D. V přílohách G a H je možné najít seznam všech použitých součástek. Obrázky výsledných desek plošných spojů jsou v přílohách E a F.

4.1 Výběr platformy řídicího prvku

Hlavními kritérii kladenými na platformu určenou pro řízení bloku DIAG jsou dostatek potřebných periférií (Ethernet, UART a další), dostatečný výkon pro zpracování dat a možnost generování odpovědi pro generátor testovacího signálu.

Jako vhodné varianty pro řízení dané jednotky se dají uvážit použití programovatelného hradlového pole (FPGA) a nebo mikrokontroleru.

- **Programovatelné logické pole (FPGA)** – jedná se o polovodičové zařízení založené na matici konfigurovatelných logických bloků propojených přes programovatelné propojky. Obvody FPGA můžou být uživatelem naprogramovány na požadovatelnou aplikaci nebo funkcionalitu. Tímto se odlišují od specifických integrovaných obvodů (ASIC), které jsou naprogramovány již z výroby a nelze program měnit [18].

Pro programování těchto obvodů jsou nejčastěji využívány jazyky VHDL nebo Verilog, které jsou určené k popisu hardwaru. Jak již vyplývá z předcházející věty, jedná se o programování na úrovni popisu činnosti hardwaru. Což dává návrháři velké možnosti přizpůsobit si obvod svým potřebám, ale také dostáhnout velkého výpočetního výkonu. Nevýhodou této platformy je zejména vyšší pořizovací cena, ale také cena za vývoj firmwaru. Další nevýhoda plyne z nutnosti použití externí paměti pro program. Nejsou zde předurčené periferie jako u mikrokontrolerů, ale veškerou jejich obsluhu od signálové úrovně musí vytvořit programátor.

Jelikož je možné platformu FPGA libovolně přizpůsobit potřebám návrhu, tak splňuje veškerá kritéria, která byla na výběr platformy kladena.

- **Mikrokontroler** – je to jednočipový mikropočítač, který v jednom pouzdře obsahuje všechny podstatné části mikropočítače. Jako je například aritmetická jednotka, paměť, A/D převodník, periferie a další.

V dnešní době se nejčastěji program pro mikrokontrolery vytváří v jazyce C, lze však také využít i jazyky nízkoúrovňového programování, jako je Asembler. Přítomnost veškerých periférií, ale hlavně knihoven od výrobců pro práci s nimi, ulehčuje programátorovi práci při vytváření firmwaru. Na trhu je dostupné velké množství mikrokontrolerů od různých výrobců, což umožňuje zvolit si mikrokontroler podle potřebných vlastností. Nevýhodou mikrokontrolerů je nižší výpočetní výkon (oproti FPGA) a počet periférií, který je pevně stanovený (nelze jej navýšit v případě potřeby).

Problémovým kritériem by při použití mikrokontroleru mohlo být generování signálu odpovědi, neboť mikrokontrolery nejsou určeny ke generování přesného signálu. Tato vlastnost musela být experimentálně ověřena. Za použití vhodné taktovací frekvence hodinového signálu mikrokontroleru a programu na úrovni instrukcí assembleru bylo prokázáno, že lze potřebný signál generovat v dostačující kvalitě. Ostatní kritéria jsou splnitelná v závislosti na konkrétním typu zvoleného mikrokontroleru.

Nakonec bylo rozhodnuto zvolit platformu mikrokontroleru, jelikož bylo ověřeno, že splňuje veškeré kladené požadavky. Umožňuje také rychlejší vývoj firmwaru a celkově nižší cenu. Konkrétně byl zvolen mikrokontroler ATSAM4E16E z řady SAM4E od výrobce Atmel, v pouzdře LQFP 144. Následující informace byly čerpány ze zdroje [14] a datasheetu [4].

SAM4E16E

Jedná se o 32bitový mikrokontroler založený na architektuře ARM. Architektura je založena na vysoce výkonném 32bitovém jádře ARM Cortex-M4 RISC. Mikrokontroler umožňuje taktování na frekvencích až 120 MHz a k jeho programování lze využít rozhraní JTAG nebo Serial Wire.

Mikrokontroler disponuje 1 MB flash a 128 KB SRAM pamětmi. Obsahuje také 16 kB velkou ROM paměť s vestavěným bootovacím kódem. Umožňuje připojení další externí paměti.

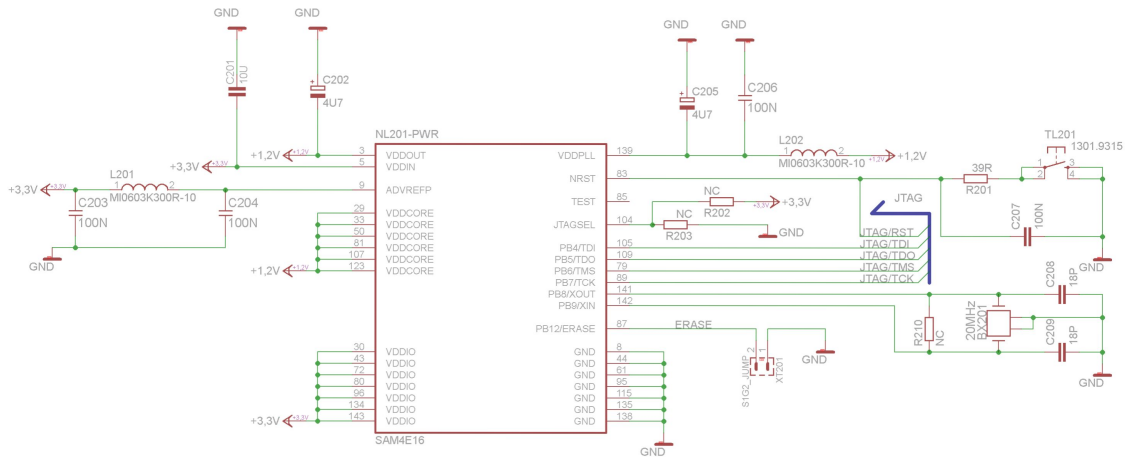
Hlavní předností mikrokontroleru je výbava rozhraními pro komunikaci high-speed USB 2.0, 10/100 Mbps Ethernet a dvě USART rozhraní podporující módy ISO7816, IrDA®, RS-485, SPI, Manchester a Modem. Dalšími rozhraními, které je možné využít, jsou dvě UART, dvě TWI, HSMCI, CAN, tři SPI, dvě I²C a jiné.

V mikrokontroleru je integrován napěťový regulátor, interní oscilátor (4,8,12MHz a 32KHz), A/D převodník, pulsně šířkový modulátor (PWM) a další periferie. Umožňuje také využití vestavěné floating point jednotky a kryptografického modulu.

4.1.1 Zapojení mikrokontroleru

Při návrhu zapojení mikrokontroleru bylo postupováno podle doporučení z datového listu [4] a vychází z reálného zapojení na vývojovém kitu SAM4E Xplained Pro Evaluation Kit. Část schématu zapojení mikrokontroleru je na obrázku 4.1, celkové schéma zapojení je v příloze C.

Napájecí napětí pro mikrokontroler bylo zvoleno o velikosti 3,3 V. Jeho zapojení je popsáno v podkapitole 4.5. Pro filtraci napájení mikrokontroleru byl ke každému napájecímu vývodu MCU navržen keramický kondenzátor o velikosti 100 nF. U referenčního napětí pro A/D převodník a napájení oscilátoru byly kondenzátory doplněny o feritové perličky pro filtraci šumu. Napěťový regulátor, který je integrován v mikrokontroleru, byl doplněn



Obrázek 4.1: Část schématu zapojení mikrokontroleru.

o kondenzátory s vyšší kapacitou pro stabilizaci napájení, konkrétně $10 \mu\text{F}$ na vstupu a $4,7 \mu\text{F}$ na výstupu.

Jako externí oscilátor pro taktování mikrokontroleru byl zvolen SMD oscilátor o frekvenci 20 MHz. Jedná se o maximální přípustnou frekvenci oscilátoru pro daný mikrokontroler. Frekvence byla volena s ohledem na potřebu generování signálu pro testovací generátor. Mikrokontroler umožňuje dále zvýšení taktovací frekvence pomocí interních násobiček. K oscilátoru byly připojeny dva keramické kondenzátory o velikosti 18 pF a ploška pro rezistor ke stabilizaci kmitočtu. Rezistor bude osazen až podle potřeby.

4.1.2 Debug rozhraní

Návrh debugovacího rozhraní vychází z programátoru určeného pro tento mikrokontroler. Programátor a debugger Atmel ICE podporuje rozhraní JTAG, SWD, DPI, TPI a další. Zvolil jsem rozhraní JTAG připojeného přes 10 pinový konektor s roztečí vývodů 1,27 mm. Typ konektoru a jeho zapojení bylo zvoleno podle kabelu programátoru tak, aby mohl být připojen přímo bez redukce.

V návrhu schématu bylo navrženo tlačítko umožňující restartování mikrokontroleru. Vývod z pinu ERASE je vyveden na konektor, který umožňuje pomocí jumperu přivedení napětí na tento pin. Po přivedení logické 1 na tento pin dojde k vymazání interní flash paměti. Toho se využívá při programování mikrokontroleru, například při nahrávání tzv. bootladeru.

4.2 Ethernet

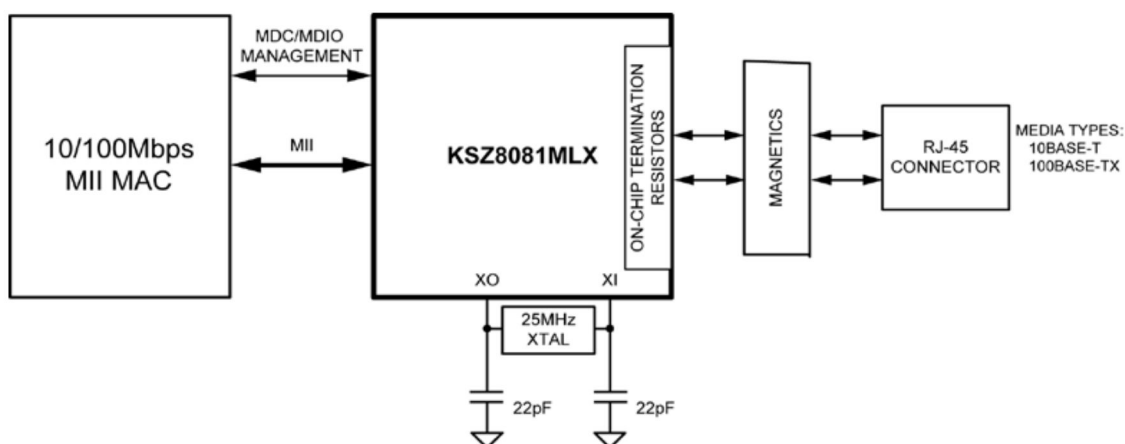
Rozhraní Ethernet je soubor technologií určených pro budování počítačových sítí typu LAN (tj. domácích nebo firemních sítí) [11]. Toto rozhraní zajišťuje fyzickou a linkovou (spojovou) vrstvu referenčního modelu ISO/OSI a umožňuje tak implementaci libovolného síťového protokolu. Ethernetové rozhraní s konektorem RJ-45 pro kabel s kroucenými páry je dnes standardním síťovým rozhraním, kterým jsou běžně vybavována elektronická zařízení.

Komunikace probíhá na pomoci tzv. ethernetových rámců. Každý rámec je složen z preambule, SFD (označení začátku rámce), fyzických adres cílového a zdrojového zařízení, typu vyššího protokolu (Ethernet II) nebo délky dat (IEEE 802.3), data s případnou výplní a

CRC kontrolní součet. V přenášených datech může být implementován vyšší protokol síťové vrstvy.

Pro realizaci ethernetového rozhraní je nutné zajistit implementaci fyzické a linkové vrstvy. Realizace linkové vrstvy je zajištěna přímo mikrokontrolerem, který je vybaven periferií zajišťující tuto vrstvu. Fyzickou vrstvu zajišťuje tzv. PHY (PHYTER). Jedná se o integrovaný obvod určený k tomuto účelu. K propojení těchto dvou částí slouží rozhraní MII nebo jeho redukováná verze RMII.

Výběr PHYTERu vychází z vývojového kitu SAM4E Xplained Pro Evaluation Kit, kde je použit obvod KSZ8081MLX od výrobce Micrel. K zapojení tohoto obvodu vydal Atmel aplikační poznámku, ve které popisuje jeho použití. Na obrázku 4.2 je znázorněn funkční diagram tohoto obvodu. Konektor jsem zvolil, standardní RJ-45 ve verzi s oddělovacím transformátorem pro ochranu obvodu a také s led diodami indikujícími činnost rozhraní. Konkrétně se jedná o konektor LMJ20881014140DLET3 od výrobce AMPHENOL.



Obrázek 4.2: Funkční diagram obvodu KZS8081MLX [13]

4.2.1 Zapojení PHYTERU

Zapojení vychází z doporučení podle datového listu PHYTERu [13] a ze zapojení na vývojovém kitu SAM4E Xplained Pro Evaluation Kit.

Pro napájení PHYTERu bylo zvoleno napětí o velikosti 3,3 V stejně jako u mikrokontroleru. Ke každému napájecímu pinu je připojen keramický kondenzátor o velikosti 100 nF pro filtraci napájení. Další kondenzátory na napájení jsou podle doporučení z datového listu [13]. Na pinu VDDA_3V3 je filtrování kondenzátory doplněno o feritovou perličku podle doporučení z datového listu [13].

Taktování PHYTERu zajišťuje externí SMD oscilátor s frekvencí 25 MHz. Zapojení oscilátoru bylo doplněno předepsanými keramickými kondenzátory o velikosti 22 pF a rezistorem o velikosti 1 M Ω , který slouží ke stabilizaci frekvence oscilátoru.

Propojení PHYTERu a mikrokontroleru je realizováno přes rozhraní MII. K propojení jsou dále přidány rezistory, které inicializují PHYTER do zvolené konfigurace. Zapojení rezistorů je voleno tak, aby mohla být inicializační konfigurace změněna, a proto jsou vyve-

deny plošky pro rezistory, které nebudou osazeny. Výrobce stanovuje hodnotu pro pull-up odpory na 4,7 K Ω a 1 K Ω pro pull-down odpory.

Inicializační konfigurace PHYTERu je nastavena na implicitní adresu 001 a použití rozhraní MII. Dále je nastaveno vypnutí izolace, rychlost 100 Mb/s v módu half-duplex, povolení auto-negace, nastavení adresy 0 jako všesměrové (broadcast) adresy a zakázání testovacího módu.

4.3 RS-485

Jedná se o průmyslový standard sériové komunikace definovaný v roce 1983 sdružením EIA. Sběrnice RS-485 umožňuje komunikaci až 32 zařízení, kdy je pouze jeden vysílač aktivní a ostatní přijímají. Novější zařízení umožňují komunikaci i pro více připojených uzlů a při použití opakovačů je možné připojit libovolný počet zařízení [6].

Při vysílání se používá diferenciálního kódování dat, tedy rozdílu napětí na komunikačních vodičích. Jedna polarita představuje logickou nulu a opačná zase logickou jedničku. Rozdíl mezi napěťovými potenciály musí dosahovat minimálně 0,2 voltů.

Pro přenos se využívá kroucené dvoulinky se stíněním, což zabezpečuje nízkou úroveň rušení. Na obou koncích musí být datová linka ukončena terminálními odpory. Toto zapojení umožňuje komunikaci až na vzdálenost 1200 metrů při rychlosti 100 kb/s.

Topologie sítě je navržena jako jedna linka s odbočkami k jednotlivým uzlům. Lze využít zapojení pro polo-duplexní nebo plně-duplexní přenos.

Pro realizaci tohoto rozhraní byl zvolen obvod ADM2582EBRWZ od výrobce Analog Devices. V obvodu je zahrnut oddělovací transformátor pro ochranu obvodu před vnějšími vlivy. Bylo zvoleno plně-duplexní zapojení umožňující obousměrnou komunikaci. Propojení s mikrokontrolerem je zajištěno přes porty USART, které lze nastavit do módu RS-485, jsou tak přímo určeny pro realizaci tohoto rozhraní.

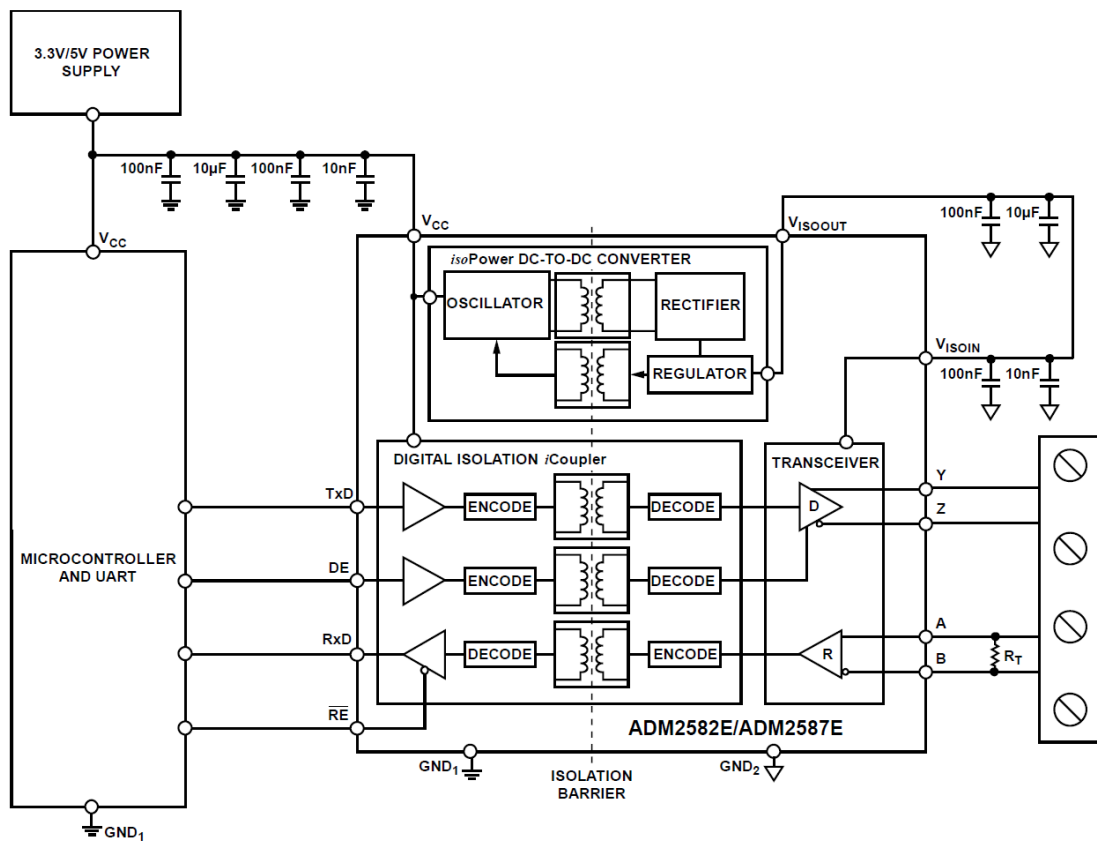
Standard RS-485 nedefinuje žádný konektor pro tuto sběrnici, a tak byl zvolen, stejně jako u rozhraní Ethernet, konektor RJ-45. Původně bylo zamýšleno využití konektoru CAN 9, ale u kabelů s tímto konektorem nejsou kroucené páry, což snižuje odolnost proti rušení. Byl zvolen konektor WEBP 8-8 LED od výrobce CONNFLY pro jeho nízkou cenu. Konektor je vybaven stíněním a také led diodami, které nebudou využity. Jako kabel byl vybrán ethernetový FTP kabel. Po využití v reálných podmínkách by však bylo vhodnější použití kabelu se dvojitým stíněním, například kabelu 7206A od výrobce BELDEN. Tento kabel je přímo určen pro sběrnice RS-485 a současně je určen pro vedení této sběrnice na dlouhé tratě.

Bylo rozhodnuto toto rozhraní duplikovat, aby byla zajištěna větší odolnost proti případným poruchám. Při normálním provozu to může být využito pro zvýšení propustnosti komunikace, kdy jednotka diagnostiky může komunikovat na obou rozhraních zároveň.

4.3.1 Zapojení budiče RS-485

Zapojení vychází z doporučení uvedených v datovém listě obvodu [1] – viz obrázek 4.3. Podle doporučení jsou na vstupním napájení zapojeny kondenzátory, které byly doplněny o feritovou perličku pro filtraci napájení. Výrobce taktéž doporučuje kondenzátory na výstupním izolovaném napětí, které byly zapojeny dle datového listu [1]. Jako napájecí napětí bylo opět zvoleno napětí o velikosti 3,3 V.

Komunikační piny RX a TX jsou přímo propojeny s mikrokontrolerem a jeho rozhraním USART. Toto rozhraní lze konfigurovat do módu RS-485 nebo jej lze využívat jako



Obrázek 4.3: Doporučené zapojení obvodu ADM2582E [1]

standardní UART rozhraní. Piny RE a DE jsou připojeny k I/O pinům mikrokontroleru, aby mohlo být nastaveno povolení a čtení nebo zápisu dat. Piny lze taktéž překonfigurovat pomocí odporů na připojení na zem, respektive na napětí, což by zajistilo trvalé povolení těchto funkcí.

Pro ochranu přijímače a omezení čtení šumu bylo zvoleno „fail-safe“ zapojení, kdy na pin A byl přidán odpor o velikosti 1 k Ω proti napětí a na pin B stejný odpor proti zemi. Na oba diferenciální páry jsou připraveny plošky na terminální rezistor, ale bude osazen pouze u vstupního páru A-B. Na diferenciální páry komunikačních vodičů jsou připojeny souřadové tlumivky pro potlačení vzniklého šumu.

4.3.2 Zapojení triggerů

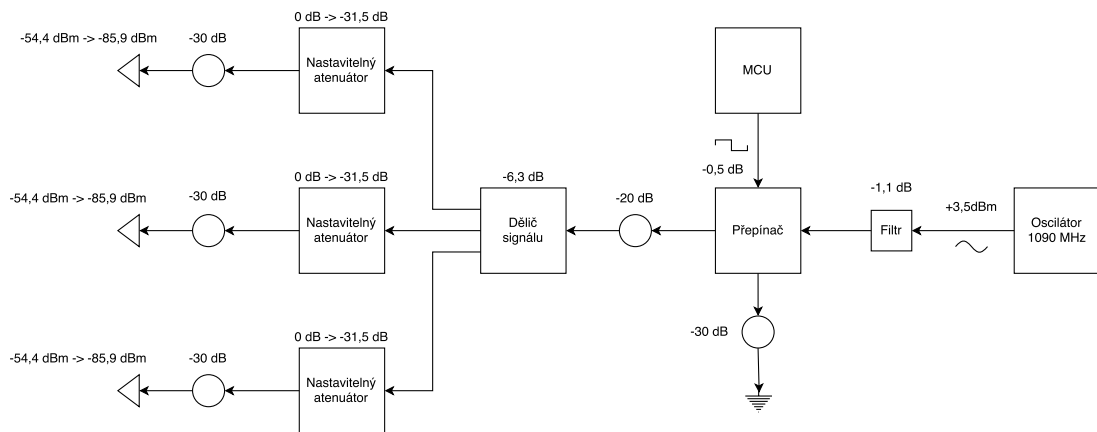
Trigger signály budou sloužit k signalizaci testovacího režimu a možnosti vstoupit do testovacího režimu. Tyto signály jsou přidruženy do kabelu spolu s rozhraním RS-485, kde využívají zbývající tři vodiče v kabelu. Jeden signál zůstává nevyužitý a bude sloužit jako rezerva pro možné budoucí využití.

Signální vodiče jsou spojeny přímo s mikrokontrolerem na jeho vstupně výstupních pinech. Pro ochranu mikrokontroleru jsou vodiče připojeny na TVS diodové pole, které chrání před přepětím vzniklým například statickou elektřinou. Dále je každý z těchto vodičů připojen na odporový dělič, který může být osazen pro případné snížení hodnoty napětí na 3,3 V. Jedná se o přípravu na variantu, že přicházející trigry by měly vyšší napětí, například

5 V. Pokud bude napětí vstupujících signálů kompatibilní s mikrokontrolerem, bude část odporového děliče zkratována pomocí rezistoru s nulovým odporem a zbytek neosazen.

4.4 Testovací generátor

Hlavní částí aktivní diagnostiky popsané v podkapitole 3.3.2 je generátor testovacího signálu, který zajišťuje generování amplitudově modulovaného přesného vysokofrekvenčního signálu. Generování a modulování signálu musí být velmi přesné, a proto je kladen zvýšený důraz na výběr komponent. Na obrázku 4.4 je znázorněno spojení jednotlivých komponent testovacího generátoru.



Obrázek 4.4: Blokové schéma testovacího generátoru

Aby se zamezilo rušení šířenému přes zemní potenciál, tak došlo k rozdělení na zem pro VF trasu a zem napájecí. Zem pro VF trasu jsem označil jako AGND. Obě země jsou následně spojeny prostřednictvím cívky o indukčnosti $1 \mu\text{H}$.

Oscilátor

Jednou z důležitých komponent je oscilátor generující přesný nosný signál o frekvenci 1090 MHz. Pro tento účel byl zvolen obvod ROS-1090-219+ od výrobce Mini Circuits. Jedná se o nastavitelný oscilátor, který je možné nastavit v rozsahu 1030 až 1090 MHz. Nastavení probíhá pomocí ladícího napětí, které je na obvod přivedeno. Závislost ladícího napětí na frekvenci a teplotě je popsána v datovém listě obvodu [16].

Pro napájení této součástky je určeno napětí o velikosti 5 V. Napájecí i ladící napětí jsou filtrovány dvojicí keramických kondenzátorů o velikosti 100 nF a feritové perličky zapojené mezi nimi.

Oscilátor generuje signál o výstupním výkonu +3,5 dBm, což je dostatečně silné pro plánované vložení attenuátorů k úpravě výkonu signálu. Impedance přenosového média (vodiče) je výrobcem stanovena na 50Ω , která musí být dodržena po celé trase VF signálu.

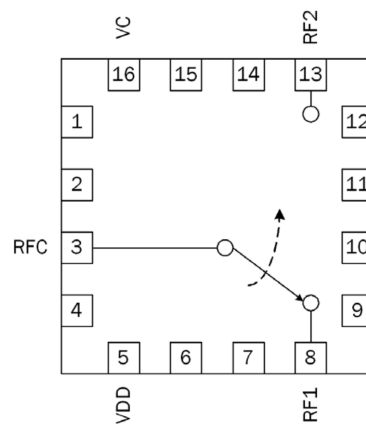
Filtr

Filtr je určený na blokování vyšších frekvencí, které by se mohly objevovat na výstupním signálu z oscilátoru. Byl zvolen filtr typu dolní propust, konkrétně filtr LFCN-1000 opět od výrobce Mini Circuits. Tento filtr blokuje frekvence vyšší jak 1000 MHz. Blokované pásmo

se překrývá s generovaným nosným signálem, avšak vložený útlum při této frekvenci je ještě dostatečně malý. Podle údajů výrobce by měl při frekvenci 1090 MHz vložený útlum činit přibližně 1,3 dB. Výrazně vyšší útlum nastává až u signálů o frekvenci 1300 MHz a více. Díky filtru zbavíme generovaný signál nechtěných vyšších harmonických signálů.

Amplitudový modulátor

Pro docílení amplitudové modulace signálu byl vybrán přepínač, kterému na vstup je přiveden filtrovaný signál z oscilátoru a výstup je přepínán mezi VF trasou a terminální trasou signálu. Přepínání je ovládáno pomocí modulačního signálu, který je generován z mikrokontroleru a nese zprávu odpovědi. Přesná struktura a význam signálu je popsána v části 2.4. Pokud je modulační signál v logické 1, tak je nosný signál pouštěn na výstup do VF trasy. V případě logické nuly je nosný signál uzemněn přes terminální trasu.



Obrázek 4.5: Funkční diagram obvodu RF3021 [19]

Jako prvek přepínače byl zvolen obvod RF3021 od výrobce RFMD [19]. Na obrázku 4.5 je funkční diagram tohoto obvodu. Jedná se o rychlý přepínač s vysokou izolací, který je napájen napětím o velikosti 5 V, toto je filtrováno pomocí dvou kondenzátorů (100 nF a 10 nF) a tlumivky zapojené mezi nimi. Velikost ovládacího napětí je od 3 V, což umožňuje přímé napojení na signál generovaný z výstupního pinu mikrokontroleru. Útlum vložený přepínačem pro signál o frekvenci 1 GHz činí 0,5 dB.

Rozdělení signálu

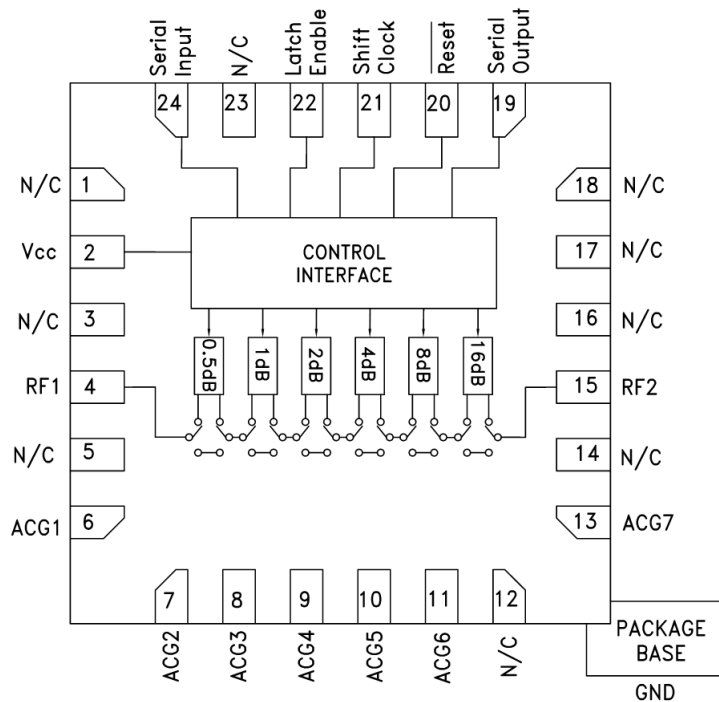
Testovací generátor má za úkol simulovat signály zachycené třemi anténami, je tedy nutné rozdělit signál na tři výstupní signály. Jiná možnost rozdělení signálu by mohla být přímo z vodiče, ale takové rozdělení by mělo neznámé parametry ovlivňující signál. Proto byl k tomuto účelu vybrán dělič signálu SYPS 3-12W od výrobce Mini Circuits [15]. Tento obvod umožňuje rozdělení vstupního signálu do frekvence 1200 MHz na tři výstupní přímé signály (bez fázového posunutí).

Rozdělením signálu dojde k útlumu signálu na výstupních portech. Celkový útlum při frekvenci 1090 MHz činí průměrně 6,3 dB na každém kanálu. Další parazitní vlastností obvodu je fázové posunutí mezi jednotlivými výstupy, které je maximálně 1,4 stupně a amplitudový rozdíl mezi signály o maximální velikosti 0,5 dB.

Nastavitelný útlum

Do každé signálové větve je vložen nastavitelný atenuátor, který umožňuje nastavení různého útlumu jednotlivých signálů. Podle výkonu jednotlivých signálů jsou v sekundárním radaru vyhodnocovány odpovědi, které jsou ve hlavním svazku radaru, jak již bylo popsáno v kapitole 2.

Jako obvod s funkcí nastavitelného atenuátoru byl zvolen HMC542BLP4E od výrobce Analog devices. Funkční diagram obvodu je znázorněn na obrázku 4.6. Obvod je napájen napětím o velikosti 5V a je kompatibilní se signály od napětí 3 V. Pro filtraci napájení je připojen kondenzátor – podle doporučení výrobce obvodu, který je doplněn feritovou perličkou. Na piny ACG1 až ACG7 byly připojeny externí kondenzátory o velikosti 330 pF – podle doporučení z datového listu obvodu [2].



Obrázek 4.6: Funkční diagram obvodu HMC542BLP4E [2]

Tento atenuátor umožňuje vložení útlumu až do velikosti 31,5 dB s krokem po 0,5 dB. Nastavení vloženého útlumu probíhá sériovou komunikací přes rozhraní SPI a potvrzovací signál. Jednotlivé atenuátory jsou připojeny na jedno rozhraní SPI k mikrokontroleru a každý obvod na jeden vstupně výstupní pin mikrokontroleru pro potvrzující signál LE. Přes rozhraní SPI je do registru atenuátoru nahrána 8 bitová zpráva, jejíž logické úrovně určují nastavení jednotlivých útlumových částí obvodu. Kladným pulzem na potvrzovacím signálu LE je - podle hodnoty z registru - nastaven útlum obvodu. Obvod umožňuje také sériové spojení jednotlivých obvodů, ale této vlastnosti nebylo využito.

Resetovací piny všech atenuátorů jsou připojeny na resetovací obvod spínaný z I/O pinu mikrokontroleru. Resetovací obvod je tvořen unipolárním tranzistorem typu MOSFET, který po přivedení napětí do báze zkratuje přívod napětí na resetovací piny a obvody se restartují. Je zde také vytvořen zpožďovací RC článek, který zdržení obvodů ve stavu resetu

po dobu přibližně 10 ms. Zpoždění RC členu bylo vypočteno ze vztahu:

$$t = -\log((V - V_c)/V)R * C$$

Kde V je napájecí napětí 5 V, V_c je napětí logické 1 tedy 3 V, hodnota paralelních kondenzátorů je $C = 3 * 100$ nF a požadované zpoždění $t = 10$ ms. Výsledná hodnota odporu vyšla 4,7 k Ω .

Konektory

Jako konektory pro připojení testovacího generátoru do systému radaru byly zvoleny standardní RF konektory typu SMA. Byl vybrán typ konektoru, který je pravoúhlý a je určen pro montáž do DPS.

Fixní atenuátory

Na trase VF signálu je rozmístěno několik fixních atenuátorů, které slouží ke snížení výkonu signálu na požadovanou mez. Hranice citlivosti radaru je stanovena na úroveň -85 dBm a při návrhu je snahou se k této hodnotě přiblížit. Jako fixní atenuátory byly zvoleny komponenty z řady PAT od výrobce Mini Circuits. Zvolené velikosti mají hodnotu vloženého útlumu 20 a 30 dB. Atenuátor o velikosti 20 dB je vložen před dělič signálu a útlumy o velikosti 30 dB jsou vloženy za každý z nastavitelných atenuátorů. V součtu je tedy výstupná výkon signálu každé trasy v rozmezí -54,4 dBm až -85,9 dBm podle zvoleného útlumu nastavitelného atenuátoru. Navržené rozmezí tak umožňuje ověřit spodní hranici citlivosti přijímače radaru.

Terminální trasa

Na tuto trasu je přiveden signál z modulujícího spínače, který je určen k terminaci. V této trase je zapojen fixní atenuátor o útlumu 30 dB, sloužící pro snížení výkonu signálu. Dále je signál přiveden na rezistor s odporem 50 Ω , který je připojen na zem. Hodnota odporu terminálního rezistoru musí být shodná s impedancí trasy VF signálu, jinak by docházelo k rušení.

Blokovací kondenzátory

Po celé délce trasy VF signálu, včetně terminální trasy, jsou mezi jednotlivými komponentami umístěny blokovací kondenzátory. Tyto kondenzátory souží k blokování stejnosměrné složky o nízké frekvenci. V případě vysokofrekvenčního signálu se tyto kondenzátory projevují téměř jako zkrat, tedy nijak neovlivňují přenášený signál. Slouží tedy jako filtr typu horní propust. Hodnota kondenzátorů byla stanovena na hodnotu 100 pF.

4.5 Napájení

Podle výběru součástek vplynuly jejich požadavky na napájení, které můžeme rozdělit do dvou skupin: součástky s napájecím napětím 3,3 V a 5 V. Další požadavek je na přesné ladící napětí k oscilátoru, které musí umožňovat mírné doladění pro získání přesné požadované frekvence. Požadované napěťové úrovně napájení je zapotřebí zregulovat ze vstupního napětí.

Napájecí napětí

Blok diagnostiky bude napájen z bloku napájení sekundárního přehledového radaru napětím o velikosti 24 V. Jako konektor pro přivedení napětí byl zvolen konektor MX-43045-0200 od výrobce Molex. Jedná se o pravoúhlý konektor do DPS se zacvakávacím systémem zajištění konektoru proti vypadnutí. Kabel lze do konektoru připojit pouze jedním směrem a nehrozí tak riziko se záměnou polarit napětí.

Napětí z konektoru je dále vedeno přes pojistku, která chrání zařízení před případným zkratem. Pojistka byla zvolena o velikosti 1 A tak, aby byla dostatečná proudová rezerva při maximálním odběru zařízení. Dále je ve směru napětí připojena usměrňovací dioda jako další prvek chránící zařízení proti případnému otočení polarit napětí. Byla zvolena standardně používaná dioda 1N4007 v SMD pouzdře. Následně je napětí filtrováno přes feritovou perličku.

Napětí 5 V

Pro regulaci napětí ze vstupních 24 V na hodnotu 5 V byl zvolen často používaný napěťový regulátor 7805 v pouzdře TO220. Stabilizátor umožňuje odběr proudu až do velikosti 1 A. Na vstupu stabilizátoru je připojen tantalový kondenzátor s kapacitou 4,7 μF určený do napětí až 35 V. K výstupu stabilizátoru je připojen opět tantalový kondenzátor, tentokrát o kapacitě 0,22 mF. Oba kondenzátory jsou zapojeny dle doporučení výrobce avšak jejich kapacity byly naddimenzovány.

O filtraci napětí se stará tlumivka o velikosti 82 μH a také odrušovací kapacitní filtr NFM21PC104R1E3D od výrobce Murata. Filtr byl zvolen z toho důvodu, že napájené komponenty jsou zapojeny ve VF trase a jejich případné rušení by mohlo ovlivňovat také generovaný signál. Za filtrem je ještě umístěn tantalový kondenzátor s kapacitou 10 mF, pomáhá stabilizátoru při náhlém zvětšení odběru tak, aby nedocházelo k poklesu napětí.

Napětí 3,3 V

K úpravě napětí na hodnotu 3,3 V ze vstupního napětí byl zvolen DC/DC převodník TMR 3-2410 od výrobce Traco Power. Jedná se o izolovaný převodník s výkonem 3 W, který může dodávat proud do velikosti 700 mA. Převodník je také chráněn proti případnému zkratu.

Původní návrh počítal s využitím izolačních vlastností převodníku, a tuto větev od ostatního napájení úplně odizolovat. Mohlo by zde však docházet k problémům se signály svedenými do jiného zemního potenciálu. Proto bylo rozhodnuto země obou částí převodníku propojit.

Zapojení vychází z doporučení od výrobce [22] ale bylo značně naddimenzováno. Vstupní napájení je přivedeno na tantalový kondenzátor o velikosti 4,7 mF, tlumivka s indukčností 82 μH a keramického kondenzátoru o kapacitě 10 μF . Teprve poté je napětí přivedeno na převodník. Na výstupu filtraci zajišťuje dvojice kondenzátorů, 47 mF a 1 μF , další tlumivka s indukčností 82 μH a opět další dvojice kondenzátorů se stejnou kapacitou jako předchozí dvojice.

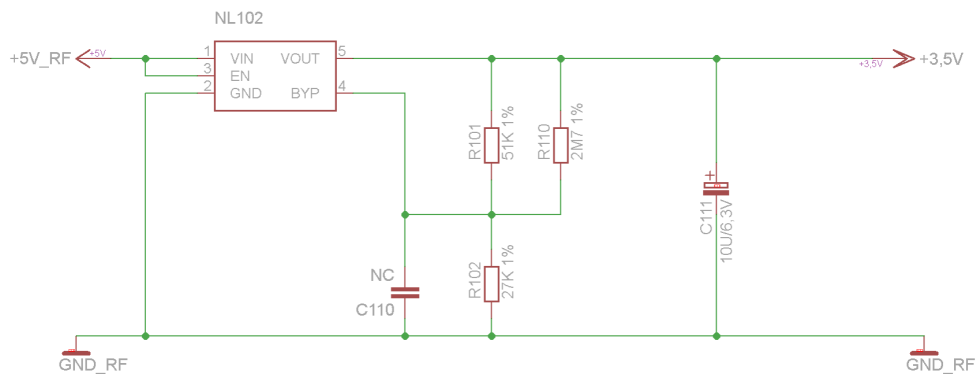
Ladící napětí

Aby oscilátor pracoval na požadované frekvenci, musí být k němu přivedeno přesné ladící napětí o velikosti 3,5 V. Jako regulátor byl zvolen obvod SPX3819M5-L od výrobce Exar. Jedná se o nastavitelný napěťový regulátor, jehož napětí je nastaveno pomocí odporového

děliče umístěného mezi výstupním a bypass pinem. Zapojení je zobrazeno na obrázku 4.7. Velikost odporů se dopočítává podle vzorce který udává výrobce [10]:

$$V_{OUT} = 1.235V * (1 + R_{101}/R_{102})$$

Dále je stanoveno, že velikost odporu R_2 musí být vyšší než $10\text{ k}\Omega$ a pro nejlepší výsledky v rozmezí $22\text{ k}\Omega$ až $47\text{ k}\Omega$. Hodnoty odporů byly stanoveny pro ladící napětí $3,5\text{ V}$ na hodnoty $R_{101} = 51,1\text{ k}\Omega$ a $R_{102} = 27\text{ k}\Omega$. Vypočítaný odporový dělič byl dále doplněn dalším paralelním odporem s hodnotou $2,7\text{ M}\Omega$, který by svým nahrazením jinou hodnotou odporu mohl být použit pro jemné doladění požadovaného výstupního napětí, a tím i přesnou frekvenci oscilátoru.



Obrázek 4.7: Schéma zapojení regulátoru ladícího napětí

Filtraci výstupního napájení zajišťuje kondenzátor o velikosti $10\text{ }\mu\text{F}$. Na bypass pin je připojen kondenzátor umožňující spojení na zem, tento však nebude osazen.

Indikační diody

Všechny napěťové úrovně v obvodu jsou připojeny na LED diody, které mají za úkol indikovat, že je napětí přivedeno. Byly zvoleny zelené led diody v SMD pouzdře o velikosti 0603, jejichž maximální proud protékající diodou je 5 mA . Podle Ohmova zákona byl ke každé z diod vypočítán odpor regulující proud, který diodou protéká. U napěťové úrovně $1,2\text{ V}$ z regulátoru obsaženého v mikrokontroleru bylo potřeba doplnit spínací tranzistor, aby byla překročena napěťová mez, kdy se dioda rozsvítí a současně byl proudový odběr z mikrokontroleru co nejnižší.

4.6 Deska plošného spoje

Návrh schématu i desky plošných spojů byly vytvořeny v editoru Eagle od společnosti CadSoft. Tento program umožňuje tvorbu elektrotechnických schémat a podle něj návrh desky plošného spoje. Software také obsahuje editor součástek, který byl využit k vytvoření několika nestandardních komponent.

Na návrh plošného spoje obsahujícího trasy s VF signálem jsou kladeny zvýšené požadavky, aby byla zachována dostatečná kvalita signálu. Vliv na kvalitu signálů má také

materiál dielektrika, ze kterého je deska plošného spoje zhotovena. Existují speciální materiály určené pro tento účel, avšak jejich cena je značně vyšší než u běžně používaných materiálů.

Z finančních důvodů byl vytvářený blok diagnostiky rozdělen na dvě desky plošných spojů tak, že jedna bude tvořena pouze blokem testovacího generátoru. Pro tuto desku bude použit materiál vhodný pro plošný spoj obsahující trasy s VF signálem. Druhá deska bude vytvořena ze standartně používaného materiálu s označením FR4. Oba plošné spoje pak budou propojeny kabelem, který bude zajišťovat jak napájení desky testovacího generátoru, tak i přenos signálů do této desky. Tyto desky byly pojmenovány jako deska DIAG (diagnostika) a DTG (deska testovacího generátoru).

Obrázky s výslednou podobou obou desek jsou v příloze E pro desku DIAG a pro desku DTG v příloze F.

4.6.1 Deska DIAG

Při návrhu této desky bylo postupováno tak aby byla nejenom co nejlépe obvodově funkční ale také s ohledem na minimalizaci nákladů na výrobu, rozmístění součástek pro snadné osazování a především na odolnost desky.

Cílem při návrhu bylo rozmístit komponenty tak aby vzniklo rozpození podle jednotlivých funkčních celků. Dalším záměrem bylo umístit všechny konektory na jeden okraj desky aby mohla být vestavěna do zařízení. Tento požadavek se nevztahuje na konektor určený k propojení s deskou DTG. Předpokládám umístění v jednom zařízení a pevné interní propojení obou desek.

V následujících odřázkách jsou stručně popsány jednotlivé části návrhu:

- **Vrstvy plošného spoje** – pro jednoduchost výroby a nižší finanční náklady byl zvolen dvouvrstvý spoj, tedy oboustranný plošný spoj. Aby bylo možné tento požadavek v návrhu splnit, jsou obě vrstvy univerzální a kombinují jak rozvody napájení, zemění tak také signálové spoje. Pro ušetření místa budou také součástky umístěny na obou stranách desky ale hlavní snahou je co nejvíce součástek umístit na stranu horní.
- **Zemění** – volné plochy obou vrstev jsou vylité polygonem připojeným na GND. Tímto se dosáhne kvlatitnějšího spojení součástek se zemí, sníží se možné šíření rušivých signálů ale také zmenší plocha mědi která je potřeba při výrobě odleptat. Jdnotlivé zemnicí polygony na obou stranách desky jsou propojeny prokovy aby nevznikali samostatné nepřipojené ostrůvky mědi. Prokovení obou zemnicích vrstev zabraňuje šíření rušení tak, že lépe odvádí rušivé signály na zem. K tomuto účelu jsou také určeny prokovy umístěné okolo obou oscilátorů. Signálové vodiče byli co nejvíc vedeny ve shlucích, tak aby prostory pro zemnicí polygony byli co největší v jednom kuse.
- **Blokování napájení** – kondenzátory a tlumivky určené pro filtraci a blokování napájení byly umístěny co nejbliže k jednotlivým napájecím vývodům integrovaných obvodů. U mikrokontroleru musela být část těchto součástek osazena ve spodní vrstvě. Splnil se tím požadavek na co nejbližší umístění u vývodů a vzniklo místo pro vedení signálových spojů z mikrokontroleru.
- **Vodiče sběrnic** – na signálové trasy sběrnic MII a RS-485 jsou kladeny požadavky na podobnou délku vodičů, aby nedocházelo k posunutí jednotlivých bitů. Mírný rozdíl délek však není kritický, protože rychlost sběrnic není tak vysoká, aby to mělo vliv na posun. Kritické vodiče byly vedeny co nejbliže u sebe, aby jejich délka byla podobná.

Blízkost párových vodičů je výhodná také z pohledu rušení, kdy toto rušení působí na oba vodiče stejně.

- **Vodiče napájení** – velikost průřezu napájecích vodičů je přizpůsobena proudu, který bude trasou protékat. K jednotlivým napájecím pinům integrovaných obvodů jsou přivedeny co nejbližší široké napájecí spoje, poté co nejkratším úzkým vodičem propojeny na piny. Je to z důvodu, že úzké spoje se více zahřívají protékajícím proudem.
- **Bezpečnost** – bezpečnostní zajištění proti přepětí způsobenému elektrostatickými výboji slouží k ochraně integrovaných obvodů před zničením. Každý vstup z konektoru je proti tomu chráněn. U Ethernetu je tato ochrana zajištěna pomocí oddělovacího transformátoru v konektoru. Linky sběrnice RS-485 jsou chráněny taktéž oddělovacím transformátorem, který je integrován přímo v integrovaném obvodu. Z tohoto důvodu jsou také izolované jednotlivé země mezi konektorem RS-485 a integrovaným obvodem. K ochraně trigger signálů je zapojeno pole transilových diod. Jeho zapojení je vedeno tak, že signál z konektoru je přímo veden na transil, a až z jednotlivých pinů transilu jsou odbočeny signálové cesty na mikrokontroler. Kovové části konektorů jsou připojeny na zem.
- **Chlazení součástek** – aby byl zlepšen odvod tepla u komponent, kde se předpokládá jejich zahřívání, byla pod jejich pouzdra rozlita měď připojená na zem. Pro lepší tepelnou vodivost byla alespoň částečně tato měděná vrstva odmaskována. Další zlepšení odvodů tepla zajišťují prokovy umístěné pod součástkami, které odvádí teplo také na spodní vrstvu mědi.
- **Popisky a značení** – z důvodu lepší orientace při osazování byl zvolen potisk desky označením jednotlivých součástek. Usnadní to také orientaci při případné změně konfigurace zapojení. Dále jsou vytištěny i popisy jednotlivých konektorů, signalizačních diod a tlačítek. Do protilehlých rohů desky byly umístěny symboly čtverce a trojúhelníku, aby při případném strojovém osazení byla jednoznačně určena orientace desky.

4.6.2 Deska DTG

Jak již bylo zmíněno výše, deska DTG bude obsahovat trasy s VF signálem, na které jsou kladeny vyšší požadavky, aby byla zachována správná obvodová funkčnost. Informace k problematice návrhu vysokofrekvenčních obvodů byly čerpány ze zdroje [20].

Při návrhu desky DTG bylo postupováno podle stejných pravidel a postupů jako u desky DIAG s ohledem na VF trasy, pro které platí přísnější pravidla. V následujících částech jsou stručně rozebrány problémy, které se při návrhu desky DTG vyskytly:

- **Materiál plošného spoje** – jako materiál na výrobu desky testovacího generátoru byl zvolen materiál AD-350 od výrobce Arlon. Existují i vhodnější materiály od jiných výrobců, například materiály od výrobce Rogers, ale jejich cena je značně vysoká. Zvolený materiál se vyznačuje nízkou permitivitou dielektrika $\epsilon = 3,5$ F/m. Byla vybrána tloušťka dielektrika 0,762 mm a měď s tloušťkou 35 μm . Stejně jako u desky DIAG byla zvolena dvouvrstvá deska.
- **Impedance VF tras** – impedance VF trasy je stanovena použitými komponenty, zejména oscilátorem, který generuje signál. Impedance trasy byla stanovena na 50

Ω . Pokud by impedance obvodu nebyla přizpůsobena, mohly by se objevit některé z následujících negativních jevů: tzv. stojaté vlnění, vnesení jalové složky impedance, odrazy signálů, útlum signálů a další.

Velikost charakteristické impedance vodiče na plošném spoji je přímo závislá na jeho šířce. Ve výpočtu však musíme zohlednit také rozměry dielektrika a jeho permitivitu. Impedanci spoje ovlivňuje také nepájivá maska nanesená na spoj, z tohoto důvodu bylo rozhodnuto trasy s VF signálem odmaskovat, tedy nepřekrývat nepájivou maskou. Výpočet šířky spoje v mikropáskovém vedení byl vypočítán pomocí následujícího vzorce:

$$w = \frac{7,48 * h}{e^{(Z_0 * \frac{\sqrt{\epsilon_r + 1,41}}{87})}} - 1,25 * t$$

kde w je šířka spoje, Z_0 je impedance trasy, t je tloušťka vodiče, h je tloušťka dielektrika a ϵ_r je relativní permitivita materiálu dielektrika. Byla vypočtena šířka vodiče $w = 1,55$ mm.

V místech, jako je například připojení na součástku, je nutné šířku vodiče zmenšit. Zúžení vodiče však musí být postupné, jinak by to mohlo mít nepříznivé vlivy na obvod. Pokud by zúžení bylo napojeno přímo, tak by se vodič choval jako impedanční transformátor a negativně by tím ovlivnil impedanci celé trasy. Přívod vodiče VF trasy k součástce musel být při návrhu DPS vymodelován polygonem, aby bylo zužování postupné.

- **Vedení VF tras** – pro VF vedení není důležitá pouze šířka vodiče, ale také délka, záhyby a také vzájemné umístění. Podle doporučení [20] by – pokud možno – co nejkratší a vedení mezi body co nejpřímější. Dále je doporučeno, že vedení nesmí obsahovat pravoúhlé rohy, protože se v takových místech vyskytuje silné elektromagnetické pole. Vyzářování elektromagnetické energie spotřebovává energii signálu, způsobuje jeho útlum a vytváří rušení. Vzájemná vzdálenost jednotlivých tras je také důležitým aspektem z pohledu elektromagnetického rušení. Doporučená vzdálenost mezi vodiči je minimálně trojnásobek šířky vodiče. Zejména v místě rozdělení signálů nebylo toto doporučení možné dodržet, a tak byl zvolen kompromis mezi šířkou desky a vzájemnou vzdáleností.
- **Zemění** – bylo rozhodnuto o rozdělení zemění na dvě části, a vytvořit tak tzv. analogovou zem pro zemění součástek pracujících s VF signálem. Jednotlivé země jsou od sebe izolovány a následně spojeny v jediném místě přes cívku o velikosti $1 \mu\text{H}$. Toto rozdělení se běžně využívá z důvodu zamezení šíření rušení od digitální části obvodu. Obě země jsou ve svých částech obvodu vylity polygonem na obou vrstvách plošného spoje. Záměrem při rozlité polygonu bylo oddělení jednotlivých VF tras od sebe a oddělení napájení od signálů. Z tzv. digitální země byl utvořen rámeček okolo celého plošného spoje, který slouží ke stínění.

Šířka izolační mezery mezi zemí a trasou s VF signálem je doporučena na trojnásobek šířky vodiče. Toto doporučení zde nebylo dodrženo z důvodu rozlité země mezi jednotlivými trasami. Pokud bychom se doporučením řídili, nebyla by mezi trasami spojena země, a proto bylo zvoleno kompromisní řešení. Za šířku izolační mezery byl zvolen dvojnásobek šířky VF trasy.

- **Zemníci prokovy** – prokovy mezi vrstvami země slouží k lepšímu uzemění a odvedení rušivých signálů. Rozmístění prokovů pod a v blízkém okolí součástek byly voleny podle doporučení z datového listu. Pokud datový list součástky doporučení neobsahoval, byly umístěny pod pouzdro prokovy, jak z důvodu zemění, tak také z důvodů chlazení součástky. Prokovy umístěné podél VF tras jsou určeny k zabránění šíření rušení, které tyto trasy můžou vyzařovat do okolí. Další prokovy jsou umístěny volně do plochy plošného spoje pro zlepšení uzemění. Vzdálenost těchto prokovů byla volena dle doporučení [20], které udává vzdálenost čtyřnásobku až desetinásobku průměru prokovu. Doporučené rozmezí bylo dodrženo na celé ploše desky.
- **Vedení signálových tras** – v původním návrhu bylo počítáno s vedením signálových tras po spodní straně desky. Toto však není možné, neboť VF trasy musí mít v celé své délce nepřerušovanou vrstvu zemění na spodní vrstvě. Ideálním řešením by byla vícevrstvá deska, kde by jedna vrstva tvořila nepřerušovanou zem a další sloužila k vedení signálů. Výroba takové desky by však byla příliš finančně nákladná, a tak bylo zvoleno vedení po obvodu desky a posunutí konektorů SMA do vnitra plošného spoje. Křížení jednotlivých vedení je realizováno přes spodní vrstvu, mimo trasy VF.
- **Synchronizace signálů** – vzájemné synchronizace všech tří signálů docílíme stejnou délkou všech VF tras. K tomuto účelu byl využit nástroj Meander, a podle něj byla upravena délka tras za děličem signálů. Zbytek trasy je symetrický, tedy stejně dlouhý. Mírné posunutí signálů nastává v součástce děliče signálů. Přesná synchronizace může být posléze doladěna délkou jednotlivých koaxiálních kabelů.
- **Povrchová úprava plošného spoje** – z důvodu, že na VF trasy nesmí být nanesena nepájivá maska mohlo by zde docházet časem k oxidaci měděného spoje. Bylo rozhodnuto využít povrchovou úpravu imerzního zlacení pro zabránění tomuto jevu. Jedná se o nanesení vrstvy niklu a zlata o tloušťce v řádech jednotek mikrometrů na všechny odmaskované měděné plochy.
- **Popisky a značení** – do protilehlých rohů plošného spoje byly umístěny symboly čtverce a trojúhelníku – pro jedznačné určení natočení desky. Popisky součástek bylo rozhodnuto netisknout, protože zde není velké množství součástek a nebude zde problém při osazení. Označení desky bylo umístěno do horní vymaskované vrstvy spoje.

Kapitola 5

Firmware

Úkolem firmwaru je zajistit řízení všech periférií, zprostředkování komunikačních linek a generování ovládacích signálů pro testovací generátor. Všechny tyto činnosti je zapotřebí zkoordinovat tak, aby nedocházelo k výpadkům komunikace.

Pro vývoj firmwaru bylo využito vývojové prostředí Atmel[®] Studio 7, které je přímo výrobcem mikrokontroleru doporučeno pro použití k vývoji firmwaru pro Atmel[®] SMART ARM[®] a Atmel AVR[®] mikrokontrolery. Jedná se o integrované vývojové prostředí (IDE), které je volně dostupné ke stažení na webových stránkách výrobce [3].

Mezi nástroje, které jsou integrovány ve vývojovém prostředí, patří prostředky pro ladění programu, které umožňují krokování firmwaru, sledování obsahu proměnných, paměti a stavu mikrokontroleru.

Součástí softwaru jsou i integrované knihovny pro práci s podporovanými mikrokontrolery a vývojovými kity. Další podstatnou částí vývojového prostředí jsou ovladače periférií, které je možné přidat přes nástroj ASF Wizard. Ovladače nabízí programátorovi implementované funkce pro nastavení a využívání zvolených periférií. V Atmel Studiu můžeme najít ukázkové příklady, které vysvětlují práci s jednotlivými ovladači a perifériemi.

Popis firmwaru můžeme rozdělit do jednotlivých funkčních celků podle periférií.

5.1 Operační systém

Z důvodu snadnějšího ovládání a řízení jednotlivých procesů uvnitř mikrokontroleru bylo rozhodnuto využít jádro operačního systému FreeRTOS, který je určen pro vestavěná zařízení. Tento reálný operační systém je poskytován pod upravenou licenci GPL s dodatečnými omezeními a výjimkami. Operační systém je zároveň podporován výrobcem mikrokontroleru Atmel a jeho verze 7.3.0 je dostupná ve vývojovém prostředí Atmel Studio.

Využití jádra operačního systému umožňuje vývojáři práci s několika procesy, úlohami, semaforem, mutexy a nebo softwarovými časovači. Zároveň systém zajišťuje jejich plánování a pseudoparalelní vykonávání podle zvoleného režimu.

Operační systém byl nakonfigurován na využívání preemptivního plánování úloh s prioritami přiřazenými k jednotlivým procesům. Maximum přiřazených priorit, vzhledem k počtu úkolů, je 5, kde nižší číslo znamená vyšší prioritu procesu. Dále byla nastavena omezení velikosti použité paměti a zásobníku. Zásobník je při inicializaci naplněn známou hodnotou a je kontrolován obsah posledních 16 bytů, aby nedošlo k přetečení zásobníku.

V programu nejprve proběhne nastavení mikrokontroleru a inicializace všech periférií (MII, SPI, USART a další). Následně jsou vytvořeny jednotlivé úlohy (tasky), kde je na-

stavena i prioritou jejich plánování. Popis jednotlivých úloh bude specifikován dále. Poté je spuštěn plánovač procesů, který již se stará o spuštění jednotlivých úloh. Tyto úlohy jsou reprezentovány funkcí, kde každá z nich obsahuje nekonečnou smyčku, ve které se program pohybuje. Pro případ výpadku z nekonečné smyčky, například pokud by nastal chybový stav, je za každou smyčkou kód k smazání úlohy z plánovače.

5.2 Rozhraní RS-485

Obě komunikační linky RS-485 jsou připojeny k mikrokontroleru přes rozhraní USART. Toto rozhraní umožňuje nastavení do několika různých módů, z nichž jeden je určen přímo pro řízení sběrnice RS-485. Odlišností tohoto módu je pouze to, že umí řídit povolovací signál budiče, což je výhodné pro poloduplexní zapojení. Pro plně duplexní linky tento mód nepřináší žádné výhody, a tak nebyl využit. Rozhraní USART bylo nakonfigurováno do běžného módu UART a signály povolující budiče jsou při inicializaci mikrokontroleru nastaveny do stavu povoleno.

Parametry komunikace jsou nastaveny na rychlost 9600 Bd. Formát dat je definován na data o délce 8 bitů s jedním stop bitem. Kontrola dat pomocí parity je vypnuta. Implementovaná plně duplexní komunikace je založena na principu dotaz – odpověď. Nejprve mikrokontroler vyšle data s adresou cílového zařízení, následně všechny připojené bloky porovnají přijatou adresu a poté blok se shodnou adresou vyšle odpověď se změněnými daty.

Data vyslaná z mikrokontroleru do bloku obsahují dvě části. Horní polovina bitů udává adresu cíle a spodní polovina udává příkaz. Data odpovědi od bloku obsahují adresu cíle v horní polovině a dolní polovinu tvoří maska hodnot. Jednotlivé hodnoty poté následují po úvodní zprávě.

Řízení obou sběrnic je založeno na stavovém automatu. Po inicializaci začíná komunikace na první sběrnici. Pokud nějaké zařízení neodpovídá nebo je jeho komunikace přerušena, tak se s daným zařízením snažíme komunikovat po záložní sběrnici. Jestliže ani tato komunikace není úspěšná, tak ohlásíme že zařízení je nedostupné. Pokud je komunikace se zařízením úspěšná tak postupně dochází k přepínání na další připojená zařízení. Kompletní vyčtené informace z jednoho zařízení jsou pomocí fronty předány úloze, která zajišťuje odesílání dat po Ethernetu.

5.3 Rozhraní Ethernet

Propojení PHYTERu s mikrokontrolerem je zajištěno přes rozhraní MII. V knihovných vývojového prostředí Atmel studio je obsažen ovladač lwIP (lightweight IP), který implementuje jak řízení sběrnice, tak i základní síťové protokoly TCP/IP. Tento ovladač je uzpůsoben pro použití ve vestavěných systémech, které mají malou operační paměť. LwIP je možné volně využívat pod licencí open source.

Firmwarová aplikace je navržena jako server, ke kterému se budou připojovat klientské aplikace a komunikovat s ním. Server bude využívat protokolu TCP, jenž zajišťuje spolehlivé doručování paketů, včetně jejich správného pořadí.

Po zapnutí mikrokontroleru je provedena inicializace rozhraní Ethernet. Mikrokontroleru je zde přiřazena fyzická adresa 10.20.30.40.50.60 a dále pevná IP adresa 192.168.10.124. Maska sítě je nastavena na hodnotu 255.255.255.0 a adresa brány na 192.168.10.250. Všechny adresy byly zvoleny jako statické, protože síť bude uzavřena a budou k ní připojeny jen pře-

dem známá zařízení. Komunikace serveru je nastavena na port 43044. Následně jsou volány funkce `tcp_listen()` a `tcp_accept()`, které umožní klientům navázat spojení se serverem.

V programu jsou vytvořeny dva úkoly pro operační systém, které obsluhují rozhraní Ethernet. Úkol reprezentovaný funkcí `zpracuj_data()` zajišťuje zpracování přijatých zpráv a jejich případné přeposílání přes frontu do úkolu obsluhujícího rozhraní RS-485. Odesílání dat je zajištěno úkolem `odesli_data()`. Tento čte data z fronty od rozhraní RS-485, sestavuje je do formátu paketu a odesílá je klientovi. Každý odeslaný paket obsahuje všechna změněná data z jednoho bloku.

Data v paketu začínají unikátním symbolem `$`. Následuje označení typu paketu, kde `CMD` označuje příkaz a `ZST` označuje paket se změnou stavu. Pakety typu `CMD` jsou přijímány od nadřazeného systému, naopak pakety typu `ZST` jsou z bloku diagnostiky odesílány. Za označením následuje oddělovač v podobě symbolu `,`. V případě typu paketu `CMD` následuje adresa cílového zařízení, druh příkazu oddělené oddělovačem a případně následují hodnoty. U paketu typu `ZST` za označením následuje adresa bloku, od kterého data pocházejí, maska dat a jednotlivá data. Všechny hodnoty jsou opět odděleny oddělovačem.

5.4 Ovládání testovacího generátoru

Funkce pro řízení testovacího generátoru jsou rozděleny do několika částí:

Nastavení atenuátorů

Nastavení atenuátorů začíná přijetím příkazu z rozhraní Ethernet. Nastavení hodnot probíhá přes sériové rozhraní SPI, ve kterém mikrokontroler na sběrnici pracuje jako master. Vyslaná data jsou doručena všem nastavitelným atenuátorům, kde se s pulzy hodinového signálu nasunou do posuvného registru. Pulzem na dedikovaném vodiči LE je zvolenému atenuátoru nastavena hodnota útlumu – podle obsahu jeho posuvného registru. První dva bity v datech slouží pouze jako výplň a neovlivňují činnost obvodu. Zbýlých 6 pozic v datech reprezentuje jednotlivé části atenuátoru od 0,5 dB až po 16 dB. Hodnota posledního bitu (LSB) na sběrnici nastavuje 16 dB část atenuátoru. Hodnota logické nuly na pozici znamená připojení atenuátoru o dané hodnotě do obvodu, tedy zvýšení útlumu o tuto hodnotu. Útlum všech obvodů je nastaven postupně.

Generování signálu

Signál ovládající prvek modulátoru je generován přímo v mikrokontroleru přes výstupní pin. Na pinu je nastavena logická hodnota a poté jsou přímo vloženy instrukce assembleru `nop`, jejichž počtem je zajištěna požadovaná délka pulzu nebo mezery mezi pulzy. Instrukce jsou v programu přímo vloženy, protože zde nebylo vhodné použít zpoždovací funkce nebo cykly. Při jejich použití nebylo možné přesně docílit požadovaného tvaru signálu. Počet instrukcí `nop` do přepnutí logické úrovně byl nastaven podle osciloskopu.

Spuštění testu

Rozlišujeme tři možné testy: periodický test, test na příkaz od obsluhy a test dynamického rozsahu. Periodický test je spuštěn po uplynutí doby časovače v mikrokontroleru. Zbýlé dva testy jsou ovládány pomocí příkazů přijatých od obsluhy. Spuštění testu je povoleno náběžnou hranou na triggru `Test possible`.

Kapitola 6

Testování

Testování funkčnosti vytvořeného prototypu lze rozdělit na dvě hlavní části, a to část komunikace a část testovacího generátoru. Testování je zaměřeno na ověření funkce celého navrženého systému.

6.1 Komunikační jednotka

Testování vytvořené jednotky nebylo možné v reálných podmínkách radaru, protože ostatní vyvíjené součásti nejsou ve stavu, kdy by bylo možné jejich využití. Pro účely testování a ověření funkčnosti proto musely vzniknout součásti simulující činnost těchto bloků. Dále byla vyvinuta aplikace, která realizuje část nadřazeného bloku diagnostiky CD, tak aby mohla být demonstrována funkce diagnostického systému.

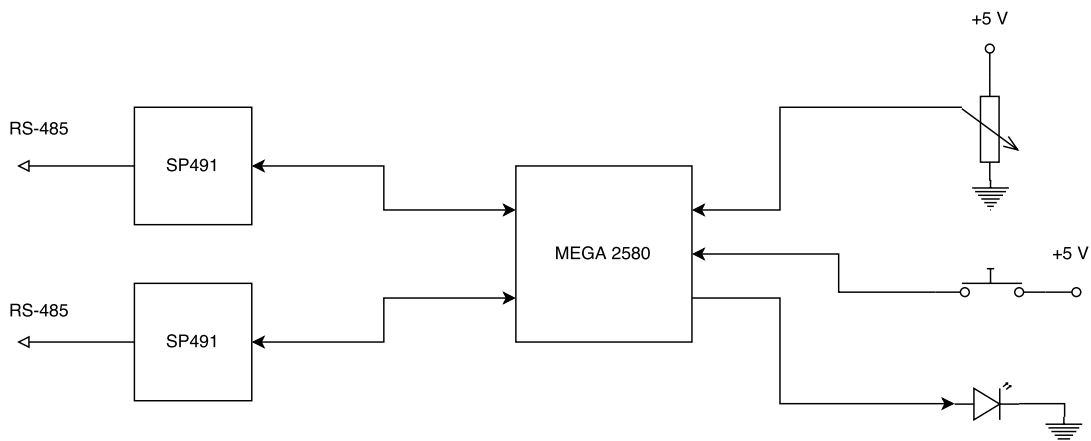
6.1.1 Simulátor bloku radaru

Simulátor bloku radaru zajišťuje simulaci diagnostické části (LD) jednotlivých bloků radaru. Přijímá příkazy od bloku DIAG přes sběrnici RS-485 a odesílá zpět odpovědi. Jeden ze simulátorů zajišťuje generování signálu triggru Test possible.

Jako základ simulátoru byl zvolen vývojový kit MEGA2580 založený na mikrokontroleru ATmega2580 od výrobce Atmel. Jedná se o 8 bitový mikrokontroler, s 4 rozhraními UART, AD převodníkem a množstvím I/O výstupů. Aby simulátor mohl komunikovat přes sběrnici RS-485, je nutné využít budič. Pro tento účel byl zvolen integrovaný obvod SP491 od výrobce EXAR, který zvládá plněduplexní komunikace na této sběrnici. Zvolený obvod obsahuje také povolující piny pro čtení a zápis dat. Vypínání budiče pro zápis na sběrnici RS-485 je důležité, aby mohla po sběrnici komunikovat jiná připojená zařízení. Pokud nedojde k odpojení budiče od sběrnice a obvod nepřejde do stavu vysoké impedance, je sběrnice zarušena a data na sběrnici jsou znehodnocena.

Jako alternativa nahrazující vstupy ze sensorů byly zvoleny prvky umožňující interakci s uživatelem. Tak aby mohlo být ověřeno, že jednotlivé změny se promítnou na výstup z bloku diagnostiky. K tomuto účelu bylo zvolen mikropínač připojený k I/O pinu, potenciometr připojený k AD převodníku. Jako další hodnota od senzoru bude sloužit náhodně generované číslo z mikrokontroleru. Pro ověření příkazů v opačném směru byla zvolena LED dioda připojená k I/O pinu. Celkové zapojení je znázorněno na obrázku 6.1.

Firmware simulátoru zajišťuje řízení komunikace přes dvě sériová rozhraní UART, čtení hodnot ze simulovaných sensorů a vykonávání přijatých příkazů. Komunikace je nastavena tak, že mikrokontroler očekává zprávu na prvním rozhraní. Pokud přijde zpráva, je podle



Obrázek 6.1: Schéma zapojení simulátoru bloku radaru

adresy ověřeno, zda-li je určena danému zařízení a následně je vykonán příkaz obsažený ve zprávě. Pokud očekávaná komunikace na prvním rozhraní nenastane, dojde k přepnutí na druhé rozhraní a případně dále zase na první. Přepínání se děje dokud není přijata zpráva s adresou shodnou s adresou zařízení.

Při přijetí příkazu na zjištění stavu jsou aktualizovány hodnoty z jednotlivých vstupů a vygenerováno náhodné číslo simulující další senzor. Ze změněných hodnot je vytvořena maska, aby bylo možné dohledat, která hodnota byla změněna. Přes rozhraní, po kterém byl přijat příkaz, jsou odeslána data ve stanoveném formátu. Význam jednotlivých implementovaných příkazů je vysvětlen v tabulce 6.1. Pro větší přehlednost jsou příkazy pro rozhraní RS-485 a Ethernet sjednoceny. Poslední sloupeček v tabulce udává, na kterém rozhraní je příkaz zasílán.

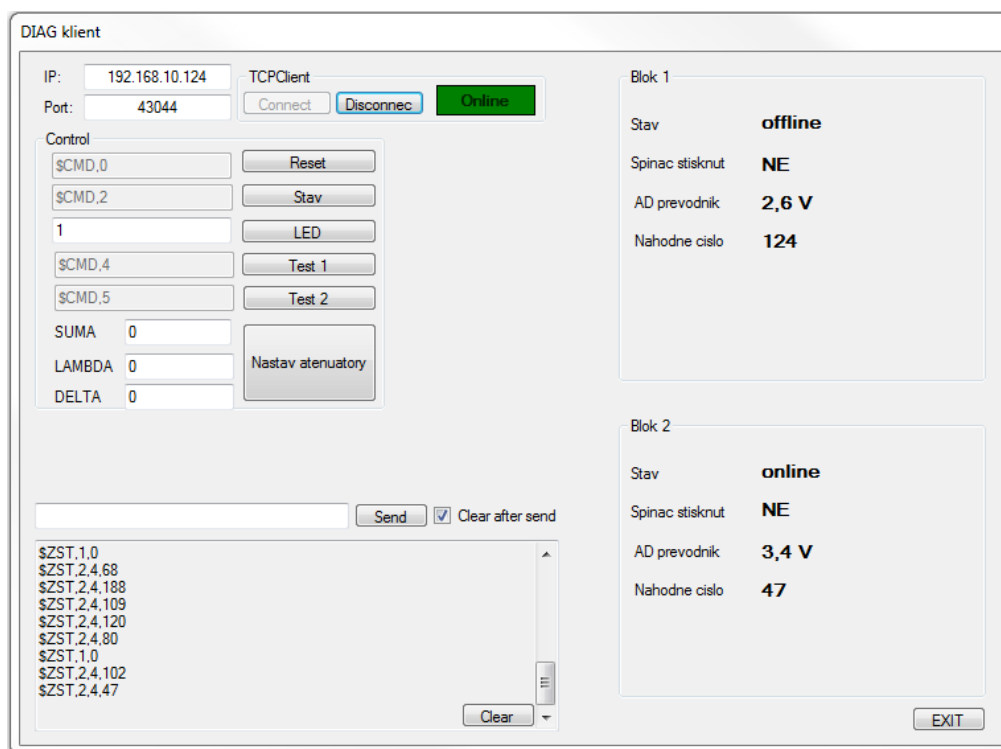
Kód příkazu	Význam	Rozhraní
1	čtení změny stavu	RS-485
2	čtení všech stavů	RS-485, Ethernet
3	přepni LED	RS-485, Ethernet
4	spust test přijímací trasy	Ethernet
5	spust dynamický test přijímací trasy	Ethernet
6	nastav atenuátory	Ethernet

Tabulka 6.1: Implementované příkazy

6.1.2 Klientská aplikace

Jako simulace nadřazeného bloku CD byla vytvořena jednoduchá klientská aplikace, která uživateli vizualizuje simulovaný stav připojených zařízení a umožňuje ovládání jak komunikační jednotky, tak i testovacího generátoru. Aplikace byla vyvinuta ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio 2015, které má volně dostupnou licenci pro studenty a individuální vývojáře. Vyvinutá aplikace je určena pro použití pod operačním systémem Microsoft Windows.

Po zapnutí aplikace jsou uživateli zobrazena dvě textová pole s předvyplněními hodnotami IP adresy a portu. Po kliknutí na tlačítko *Connect* je vytvořeno TCP spojení, které se snaží připojit k bloku diagnostiky. Při neúspěchu připojení je uživatel upozorněn zprávou. Pokud je připojení úspěšné, zobrazí se uživateli ovládací tlačítka, popisy informující o stavu jednotlivých bloků a pole zobrazující syrová data z rozhraní Ethernet. Okno aplikace je zobrazeno na obrázku 6.2.



Obrázek 6.2: Okno klientské aplikace

Kliknutím na tlačítko *Connect* se kromě připojení zároveň odešle příkaz ke zjištění stavu všech zařízení. U jednotlivých tlačítek sloužících k odesílání příkazů jsou zobrazeny popisy v podobě odesílaných dat. Tlačítko *Nastav atenuatory* má vedle sebe umístěné 3 textové pole pro zadání hodnoty útlumu jednotlivých kanálů. Význam jednotlivých příkazů je dán tabulkou 6.1.

Informace přijaté z bloku diagnostiky jsou extrahovány z přijatého paketu a následně zobrazeny uživateli v pravé části okna. Podle přijaté adresy a masky jsou rozpoznány hodnoty, které byly změněny a tyto jsou v okně aplikace aktualizovány.

6.1.3 Testování komunikační jednotky

Pro účely testování byly sestaveny dva kusy simulátoru bloku radaru, popsaného v části 6.1.1. Tyto byly pomocí kabelů připojeny k rozhraním sběrnice RS-485 na desce DIAG. Deska DIAG byla dále připojena prostřednictvím ethernetového kabelu k počítači, na kterém byla spuštěna klientská aplikace.

Při oživování desky DIAG a pokusu o naprogramování mikrokontroleru byl zjištěn problém, kdy programátor detekoval nízké napětí na připojeném mikrokontroleru. Tento problém byl způsoben chybějícím spojem mezi konektorem a napětím 3,3 V. Chybějící spoj byl nahrazen drátovým propojením.

Dalším zjištěným problémem při oživení desky bylo nefunkční rozhraní Ethernet. Tento problém byl částečně způsoben nevhodně zvoleným konektorem, jehož typ není podporován zvoleným obvodem PHYTERu. Ani po výměně konektoru za správný typ však nedošlo k odstranění problému. Po uskutečněných měřeních lze odhadovat, že toto bylo způsobeno špatným připájením některého z pinů mikrokontroleru a nebo PHYTERu. Opravením pájených spojů na jednotlivých obvodech jsme docílili funkčního rozhraní Ethernet.

Po úspěšném rozchození celkového zapojení byla ověřena funkčnost komunikační jednotky pomocí připojených simulovaných bloků a klientské aplikace. Úspěšně byla otestována funkčnost všech implemenovaných příkazů a stabilita celého testovaného systému.

6.2 Testovací generátor

Stejně jako u komunikační jednotky nebylo možné pro testování využít reálné součásti radaru. Musela být zvolena alternativní varianta testování na osciloskopu a spektrálním analyzátoru. Pro tyto účely byl využit osciloskop LeCroy WaveRunner 640Zi, který zvládá vzorkování signálu až do frekvence 4 GHz. Na ověření spektra signálu byl využit spektrální analyzátor Anritsu MS2724C.

Osazení součástek na desce DTG provázely komplikace, protože ruční osazení některých součástek, zejména v pouzdrech QFN, je velmi složité. Stejně jako u desky DIAG se objevil problém se špatně připájenými součástkami. Tento problém však byl odstraněn přepájením jednotlivých vývodů. Dalším zjištěným problémem při ručním osazení byla dobrá tepelná vodivost desky. Pro připájení součástky musela být zvýšena teplota pájení a tím vzniklo riziko poškození součástky.

Při oživování desky DIAG byly osciloskopem proměřeny generované signály. U signálu ovládajícího prvek amplitudového modulátoru byly zjištěny parazitní vlastnosti způsobené indukčností vedení. Při změně logické úrovně se na hraně signálu vyskytoval Diracův impulz prodlužující hranu. Teto impulz je nebezpečný zejména při sestupné hraně, kdy krátkodobé záporné napětí může poškodit elektronické obvody.

Bylo nutné tento jev kompenzovat pomocí kondenzátoru s malou kapacitou připojeného na signál proti zemi. Dalším prvkem kompenzace je rezistor o malém odporu vložený do cesty. Tyto součástky spolu tvoří filtr v podobě integračního článku, který zmenší velikost impulzu. Podobné kompenzace byly provedeny také na desce DTG.

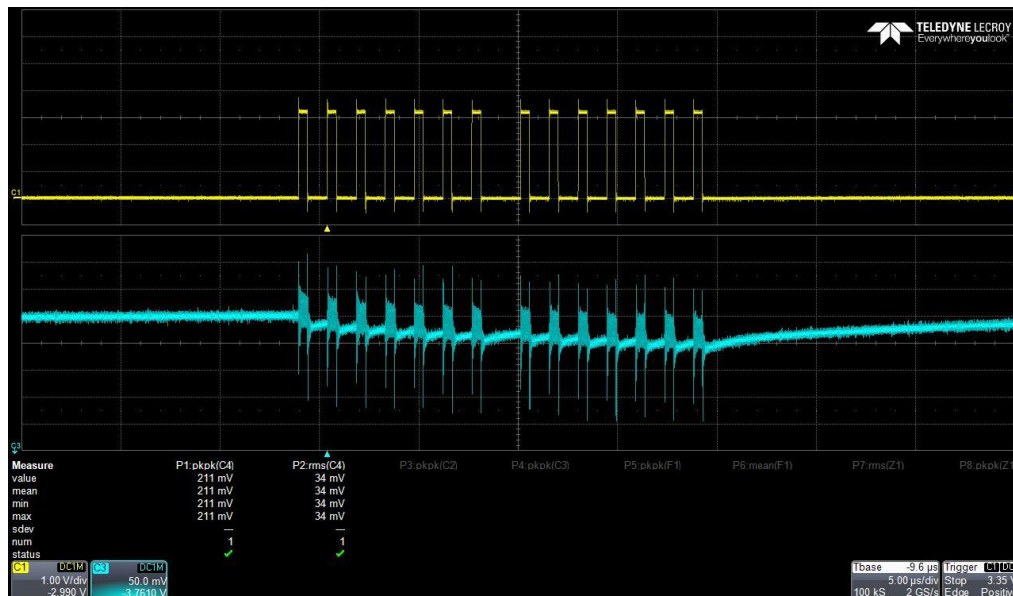
Druhým zjištěným nedostatkem bylo rozlité zemnicího polygonu pod obvody nastavitelných atenuátorů. Tento problém vznikl při návrhu špatným pojmenováním prokůvů umístěných pod pouzdrem součástek. Návrhový editor tak při propojování součástek tuto oblast nespojil se zemí. Tato vada byla opravena připájením měděného plíšku, který byl následně pocínován. Pokud by problém nebyl odstraněn, mohlo by docházet k přehřívání obvodů nastavitelných atenuátorů, protože by nedocházelo k odvodu tepla do plochy.

6.2.1 Testování testovacího generátoru

Jak již bylo zmíněno výše, k testování byl využit osciloskop pro ověření jednotlivých průběhů a spektrální analyzátor ke kontrole „čistoty“ signálu.

Měření průběhu modulačního signálu

Na zaznamenání průběhu modulačního signálu byl využit osciloskop. Naměřený průběh je zobrazen na obrázku 6.3. Sonda osciloskopu připojená na kanále 1 (žlutý signál) byla připojena na testovacím bodě signálu SIG. Druhá sonda byla připojena na výstup prvku modulátoru (modrý signál) a ukazuje průběh modulovaného signálu ve výstupní trase.



Obrázek 6.3: Průběh modulačního signálu

Měření spektra signálu modulovaného signálu

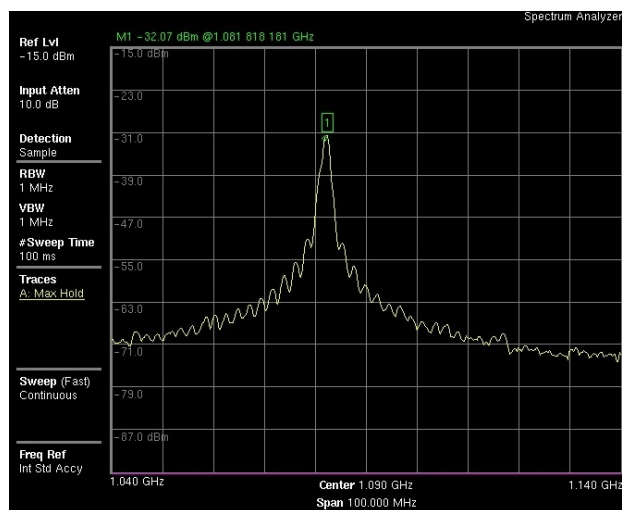
Aby bylo spektrum zřetelnější od šumu, bylo měření prováděno na vstupu nastavitelného atenuátoru, kde by se podle návrhu měla úroveň signálu pohybovat okolo -25 dBm. Naměřená úroveň signálu byla -32,07 dBm. Měření však bylo ovlivněno útlumem připojené sondy a kabelu. Výstup měření je zobrazen na obrázku 6.4.

Měření spektra nosného signálu

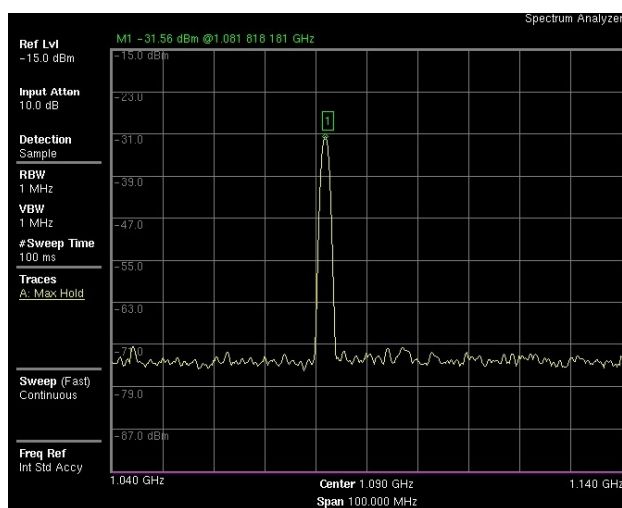
Střed spektra nosného signálu by se měl pohybovat na frekvenci 1090 MHz. Na obrázku 6.5 lze vidět, že signál je mírně posunutý a amplituda spektra je na frekvenci 1081 MHz. Tato odchylka může být kompenzována přenastavením odporového děliče ladícího napětí. Měření opět probíhalo na vstupu nastavitelného atenuátoru a úroveň signálu je ovlivněna připojenou sondou a kabelem.

Měření útlumu nastavitelných atenuátorů

Použité nastavitelné atenuátory vkládají útlum v rozmezí 0 až 31,5 dB podle nastavení v registru atenuátoru. Ověření nastavení útlumu nebylo úspěšné. Při pokusech o nastavení atenuátoru nebyla na výstupu detekována žádná změna útlumu. Lze předpokládat, že atenuátor zůstal v neznámém stavu po přivedení napájení a na nastavovací komunikaci

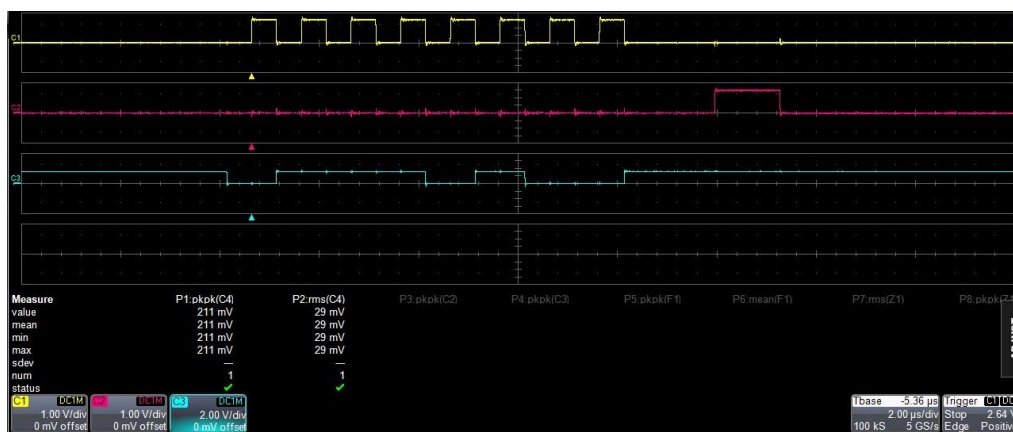


Obrázek 6.4: Spektrum modulovaného signálu



Obrázek 6.5: Spektrum nosného signálu

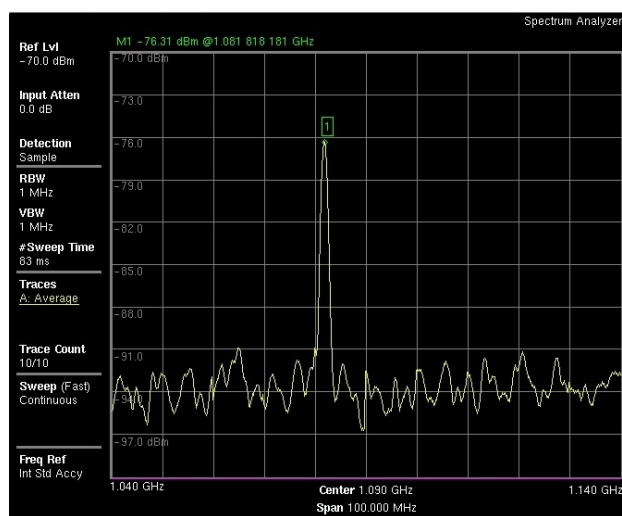
nereagoval. Toto mohlo být pravděpodobně způsobeno překrytím hran datového signálu s hodinovým signálem, kdy obvod nedokázal detekovat úroveň datového signálu. Nastavení posunutí datového signálu vůči hodinovému mikrokontroler neumožňoval. Na obrázku 6.6 je zobrazen průběh komunikace přes rozhraní SPI s atenuátorem. Na prvním kanále (žlutý) byl zaznamenán hodinový signál, druhý kanál (červený) zachycuje povolovací pulz a třetí kanál (modrý) obsahuje datovou zprávu.



Obrázek 6.6: Komunikace s nastavitelným atenuátorem

Měření spektra na výstupním konektoru

Na výstupním konektoru byl zaznamenán signál o síle $-76,31$ dBm. Bohužel hodnotu nebylo možné měnit kvůli nefunkčnímu nastavování atenuátorů. Výsledek měření je zobrazen na obrázku 6.7.



Obrázek 6.7: Spektrum signálu na výstupu

6.3 Zhodnocení testování

V předchozích podkapitolách bylo popsáno testování jednotlivých funkčních celků vytvořeného bloku DIAG, který zajišťuje komunikaci podsystému diagnostiky a funkci testovacího generátoru pro sekundární přehledový radar. Pro ověření funkčnosti, testování a ladění bloku DIAG vznikla klientská aplikace simulující blok CD a dva totožné simulátory bloků LD radarových komponent.

Během ožívování jednotlivých desek byly objeveny nedostatky z návrhu hardwaru. Dále se při oživení projevily parazitní vlastnosti ovlivňující signál. Tyto nebylo možné při návrhu dostatečně odhadnout. Všechny objevené závady se povedlo opravit nebo alespoň částečně kompenzovat tak, aby výsledný hardware byl plně funkční.

Na testovacím zapojení byla úspěšně ověřena funkčnost bloku DIAG. Postupně byla ověřena funkčnost jednotlivých příkazů a reakce systému na výpadky jednotlivých sběrnic RS-485 nebo celých zařízení. Dále byla ověřena stabilita systému pomocí dlouhodobého testování.

Pomocí osciloskopu a spektrálního analyzátoru byla ověřena funkčnost testovacího generátoru pro testování přijímací trasy sekundárního radaru. Výstupní signál měl požadované parametry avšak mírně posunuté na nižší frekvenci. Tuto vadu je možné kompenzovat úpravou ladícího napětí. Byl zjištěn problém s nastavitelnými atenuátory, které nereagovaly na nastavovací data. Výstupní úroveň signálu tak nemohla být měněna.

Vytvořený blok DIAG nemohl být otestován v reálném radarovém systému, neboť jeho zbývající části byly stále ve fázi návrhu. Lze předpokládat, že vytvořený blok DIAG by v reálných podmínkách sekundárního radaru splňoval kladené požadavky. Pro využití v reálných podmínkách by muselo dojít k úpravám firmwaru, a to zejména k úpravě komunikačního protokolu. Tento byl vytvořen pro účely testování a pravděpodobně by nevyhovoval reálným potřebám. Dalšími úpravami by musel projít testovací generátor, kde byl zjištěn problém s posunutím frekvence a nastavením útlumu trasy

Aby mohl být sekundární radar s blokem DIAG certifikován, musel by být blok podroben dalšímu testování. Bylo by nutné ověřit jeho chování v závislosti na změnách teploty. Dále by musely být provedeny testy elektromagnetické kompatibility (EMC) a další testy vyžadované pro certifikaci zařízení v kategorii letecké pozemní zařízení.

Kapitola 7

Závěr

Předmětem diplomové práce byl návrh systému diagnostiky pro sekundární přehledový radar a vytvoření prototypu jednotky zajišťující komunikaci a funkci testovacího generátoru pro sekundární radar. Všechny cíle práce byly splněny.

Jelikož se nejedná o jednoduché zařízení, bylo nutné nejprve nastudovat, jak zařízení funguje. Dále prostudovat jednotlivé normy, které specifikují požadavky na systém a přesně definují funkce systému. Z těchto norem byl vytvořen soupis požadavků na diagnostiku. Další požadavky vzešly ze samotného návrhu zařízení, který bylo nutné také detailně nastudovat.

Z těchto získaných informací vznikl návrh systému diagnostiky. Bylo nutné rozdělit funkci na jednotlivé diagnostické části a navrhnout způsob komunikace mezi nimi. Podle návrhu systému diagnostiky byl navržen prototyp bloku DIAG zajišťující komunikaci diagnostického systému. Bylo vytvořeno detailní obvodové schéma a navrženy, vyrobeny a oživeny desky plošných realizující tento blok.

Během oživení bylo zjištěno několik nedostatků z návrhu v podobě špatně zvoleného konektu a nerealizovaného spoje. Obě vady však byly odstraněny. Další zjištěný nedostatek se projevil pravděpodobně v podobě tzv. studeného spoje. Tato vada vznikla při ručním osazování součástek. Pro osazování součástek ve složitých pouzdrech, jakým je například mikrokontroler, je vhodnější použití strojního osazování, které je však finančně nákladnější.

K otestování funkčnosti bloku DIAG musely být vytvořeny simulátory bloků LD a klientská aplikace simulující blok CD. Připojením těchto simulátorů byla úspěšně ověřena funkčnost navrženého obvodu a vytvořeného firmwaru. Funkčnost jednotky testovacího generátoru byla ověřena pomocí měřicích přístrojů. Byl zde objeven problém s nastavením útlumu trasy. Bez nastavení útlumu nelze provádět test dynamického rozsahu přijímací trasy, ale lze ověřit její funkčnost.

Vytvořený prototyp je funkční a může tak sloužit k testování a dalšímu vývoji sekundárního radaru M10SR. Jak již bylo zmíněno v podkapitole 6.3, lze předpokládat, že by po úpravách firmwaru a testovacího generátoru bylo možné reálné použití bloku DIAG v sekundárním radaru.

Jako možné úpravy, vylepšení či doporučení bych navrhnul například využití výše zmínovaného strojového osazování desek plošných spojů, aby se předešlo problémům se špatně osazenými součástkami. Další úpravou, která by stála za zvážení, je využití sběrnice CAN spolu s protokoly řídicími komunikaci po této sběrnici. Pokud by došlo ke změně požadavků a bylo vyžadováno dedikované spojení s každou částí radaru bylo by nutné změnit platformu a využít například programovatelného hradlového pole (FPGA).

Literatura

- [1] Analog Devices: *ADM2582E/ADM2587E*. [Online; navštíveno 14.3.2017].
URL http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADM2582E_2587E.pdf
- [2] Analog Devices: *HMC542BLP4E*. [Online; navštíveno 17.3.2017].
URL <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc542b.pdf>
- [3] Atmel: *Atmel Studio 7*. [Online; navštíveno 26.3.2017].
URL <http://www.atmel.com/microsite/atmel-studio/>
- [4] Atmel: *SAM4E Series*. [Online; navštíveno 5.3.2017].
URL http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-11157-32-bit-Cortex-M4-Microcontroller-SAM4E16-SAM4E8_Datasheet.pdf
- [5] BEZOUŠEK, Pavel a Pavel ŠEDIVÝ: *Radarová technika*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2004, ISBN 978-80-01-03036-3.
- [6] BIES, Lammert: *RS485 serial information*. [Online; navštíveno 9.3.2017].
URL <https://www.lammertbies.nl/comm/info/RS-485.html>
- [7] BUSSOLARI, Steven R.: *Mode S Data-Link Applications for General Aviation*. 1994, [Online; navštíveno 19.12.2016].
URL https://www.ll.mit.edu/publications/journal/pdf/vol107_no2/7.2.10.modesdatalink.pdf
- [8] COPPOLA, Anthony: *A Design Guide for Built-in Test (BIT)*. Duben 1979, [Online; navštíveno 4.1.2017].
URL <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a069384.pdf>
- [9] EUROCONTROL: *European Mode S Station Functional Specification*. Květen 2005, [Online; navštíveno 19.12.2016].
URL <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/nm/surveillance/surveillance-mode-s-european-mode-s-functional-specification-20050509.pdf>
- [10] Exar: *SPX3819*. [Online; navštíveno 19.3.2017].
URL <https://www.exar.com/content/document.ashx?id=22106&type=datasheet&part=spx3819>
- [11] HELD, Gilbert: *Ethernet networks: design, implementation, operation, management. 4th ed.* New York: Wiley, 2003, ISBN 04-708-4476-0.

- [12] ICAO: *Annex 10 - Volume 4: Aeronautical Telecommunications - Surveillance and Collision Avoidance Systems*. Listopad 2010, [Online; navštíveno 17.12.2016].
URL <http://cockpitdata.com/Gallery/download/34>
- [13] MICREL: *KSZ8051MNLU/KSZ8051RNLU*. [Online; navštíveno 8.3.2017].
URL http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/KSZ8051MNLU_RNLU.pdf
- [14] Microchip: *ATSAM4E16E*. [Online; navštíveno 5.3.2017].
URL <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATSAM4E16E>
- [15] Mini Circuits: *Power Splitter/Combiner SYPS-3-12-W+*. [Online; navštíveno 16.3.2017].
URL <https://www.minicircuits.com/pdfs/SYPS-3-12W+.pdf>
- [16] Mini Circuits: *Voltage Controlled Oscillator ROS-1090-219+*. [Online; navštíveno 14.3.2017].
URL <https://www.minicircuits.com/pdfs/ROS-1090-219+.pdf>
- [17] Ministerstvo dopravy České republiky: *LETECKÝ PŘEDPIS O CIVILNÍ LETECKÉ TELEKOMUNIKAČNÍ SLUŽBĚ SVAZEK IV - PŘEHLEDOVÝ RADAR A PROTISRÁŽKOVÝ SYSTÉM L 10/IV*. 2003, [Online; navštíveno 19.12.2016].
URL https://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-10/L-10iv/data/print/L10-iv_cely.pdf
- [18] PANG A., Peter MEMBREY: *Beginning FPGA: Programming Metal*. New York: Apress, 2017, ISBN 978-1-4302-6248-0.
- [19] RFMD: *RF3021*. [Online; navštíveno 15.3.2017].
URL <http://www.qorvo.com/products/d/da000416>
- [20] RICHARD CHI-HSI LI: *RF circuit design. 2nd ed.* Hoboken: Wiley, 2012, ISBN 978-1-118-30990-2.
- [21] RICHARDS, M. A., Jim SCHEER, William A. HOLM a William L. MELVIN: *Principles of Modern Radar: Radar Applications*. Raleigh, NC: SciTech Publishing, 2014, ISBN 978-1-89112-154-8.
- [22] Traco Power: *DC/DC Converters TMR 3 Series Application Note*. [Online; navštíveno 19.3.2017].
URL <http://www.tracopower.com/products/tmr3-application.pdf>

Přílohy

Příloha A

Obsah CD

- /Firmware DIAG – firmware pro blok DIAG (Atmel Studio 7)
- /Firmware LD – firmware simulatoru bloku LD (Arduino 1.8.1)
- /Klient – klientka aplikace (Microsoft Visual Studio 2015)
- /Text – zdrojové soubory technické zprávy (L^AT_EX)
- /Zapojení – schéma zapojení a návrh desky ložného spoje (Eagle 6.0)

Příloha B

Seznam požadavků

Tabulka požadavků na modul diagnostiky sekundárního přehledového radaru vypsanych z normy Eurocontrol 3.11 - European Mode S Station Functional Specification [9].

Link	Requirement	State
10.1.1.	The overall objective of the control and monitoring is to ensure that an unattended Mode S ground station shall provide continuous surveillance throughout its required coverage.	E
	The Tenderer shall state in the proposal how the control and monitoring of the following is performed:	E
10.1.1.a	Radar sensor, including antenna, turning gear, RF change-over and azimuth data;	E
10.1.1.b	Interrogator;	E
10.1.1.c	System Management Function (SMF);	E
10.1.1.d	Surveillance Co-ordination Function (SCF);	E
10.1.1.e	Data Link Function (DLF);	E
10.1.1.f	Data transmission facilities (modem, multiplexer and network terminating units);	E
10.1.1.g	Far Field site monitor;	E
10.1.1.h	General site utilities (fire and intruder alarm, air conditioning equipment);	E
10.2.1.	Provision for interfaces to enable local and remote control and monitoring shall be provided using industry standard interface and protocol.	E
10.2.1.	The Tenderer shall provide a detailed description of the interfaces, protocols and message formats used for the above function.	I
10.2.1.	The Tenderer shall indicate whether the following statistical information (on a Scan or timely basis) are provided by the CAM interfaces (locally or remotely):	I
10.2.1.a	Information about the data supplied to the ATCC users:	I
10.2.1.a.i	Number of solo Mode S reports;	I
10.2.1.a.ii	Number of solo SSR reports;	I
10.2.1.a.iii	Number of solo PSR reports;	I
10.2.1.a.iv	Number of combined SSR/PSR reports;	I
10.2.1.a.v	Number of combined Mode S /PSR reports;	I

Link	Requirement	State
10.2.1.a.vi	Number of Splits plots;	I
10.2.1.a.vii	Number of code swaps;	I
10.2.1.a.viii	Number of reports with duplicated Mode S address;	I
10.2.1.a.ix	Number of test transponders;	I
10.2.1.a.x	Number of test targets.	I
10.2.1.b	Information about the data transferred through the SCN:	I
10.2.1.b.i	Number of Track Initiations sent out;	I
10.2.1.b.ii	Number of Track Initiations received;	I
10.2.1.b.iii	Number of Track Data messages sent out;	I
10.2.1.b.iv	Number of Track Data messages received;	I
10.2.1.b.v	Number of Track Data Requests sent out;	I
10.2.1.b.vi	Number of Track Data Requests received;	I
10.2.1.b.vii	Number of Tracks for which SCN Track Support is being given;	I
10.2.1.b.viii	Number of Tracks for which SCN Track Support is being received.	I
10.2.1.c	Information (including the rationale) about the data exchanged with the GDLP;	I
10.2.1.d	CPU loading on the different processing boards;	I
10.2.1.e	(e) measured data rate on each link (surveillance, SCN and DLF).	I
10.2.1.	Control of every facility and function of the system shall be provided via these interfaces.	E
10.2.1.	A disconnection of the CAM link shall not create an interruption to the operational service.	E
10.2.1.	Under CAM link failure full control shall automatically be provided locally, either through the local CAM interface or through another terminal.	E
10.2.1.	When under control of the remote terminal, all local control of the system shall be inhibited except for the request for local control. Transfer to local control is executed only after permission by the remote terminal.	E
10.2.1.	When under local control at the equipment itself all control via the remote terminal shall be inhibited, however monitoring and recording of all functions shall continue.	E
10.2.1.	The Tenderer shall provide details in the proposal of the list of parameters subject to remote control and monitoring in their proposed system.	I
10.2.2.	The CAM interface shall enable the connection or disconnection of the ground station from the Surveillance Co-ordination Network (SCN).	E
10.2.3.	The Contractor shall supply, at a date to be agreed with the Agency, interface control documents defining the interfaces, protocols and message formats used for the CAM function.	E
10.3.1.	Comprehensive on-line and off-line BITE shall be provided in the Mode S system.	E

Link	Requirement	State
10.3.1.	On-line BITE testing is defined as BITE tests performed while the system is in the operating mode or in the standby mode; such tests would normally be conducted with normal operating signals or internally injected stimuli that did not interfere with normal operation. Off line BITE tests are those conducted while the system is in the maintenance mode using internal test checks and routines.	A
10.3.1.	Off line BITE shall be capable of being initiated locally and remotely.	E
10.3.1.	BITE shall be provided for both on-line and off-line testing of the Mode S systems and shall be able to detect any fault affecting the performance of the system.	E
10.3.1.	The BITE coverage rate (part of the system [including all units, boards and components] monitored by BITE) shall be at least 90%.	E
10.3.1.	The BITE fault finding rate shall be at least 95%. That is, at least 95% of all failures shall be detected and isolated by test to within a three LRU group (In most instances a PCB is defined as a single LRU). The BITE fault-finding rate is algebraically equal to the product of the fault detection rate and the fault isolation rate.	E
10.3.1.	It is anticipated that the above requirement be met by on-line BITE.	A
10.3.1.	The Tenderer shall state in the response the on-line and off-line fault finding rate that shall be achieved.	I
10.3.1.	It is expected that achieved performance figures will be higher. The Tenderer shall provide in the proposal details of the performance figures which the equipment shall be able to meet and state under what conditions.	I
10.3.2.	The on-line and off-line testing of the system shall work without the need for any additional external test equipment.	E
10.3.2.	The on-line fault reporting time shall be less than 2 seconds after detecting the fault.	E
10.3.2.	The on-line and off-line BITE shall register the faulty equipment (LRU) and report the information through the CAM interfaces.	E
10.3.2.	The Tenderer shall provide details in the proposal of the BITE facilities available and what on-line tests the system will be able to perform.	I
10.3.3.	On-line testing shall provide radar performance data through the CAM interfaces, in particular performance degradation providing advance warning of a developing fault condition or the need for maintenance.	E
10.3.3.	In the proposal, The Tenderer shall state the performance parameters and describe the method of reporting the performance data both locally and remotely for the Mode S ground station.	E

Link	Requirement	State
4.2.6.2	The programming of this site-dependant parameter shall be possible at the CAM or at the Dedicated Terminal to be delivered.	E
4.2.7.3.4.1	The programming of this site-dependant parameter shall be possible either at the CAM locally or remotely	E
4.6.2.1	The system to be supplied shall be dual channel, complete with changeover capability, controlled both locally and remotely by the CAM.	E
4.6.2.2	For dual channel configurations any fault state shall be reported to CAM.	E
4.6.2.3	Exiting the Maintenance Mode shall be possible by two mutually exclusive modes: 1) remotely via the CAM; or 2) locally by operator command authorised from the front panel.	E
4.6.7.1	The Tenderer shall provide in the proposal the maximum system response time for each of the requirements a) to b) above, where "passing North" is assumed to mean "first North crossing after azimuth data is reported as correct by CAM".	I
4.6.8.1.e	Upon the restoration of any of the inputs listed below, following a failure of that input, and irrespective of the duration of the failure, the ground station shall be fully restored to the operating conditions that applied before the failure occurred, without the need for any manual intervention: e) Station CAM.	E
4.6.12.1	The CAM facility shall be employed to re-configure Agency designated operational parameters at the ground station.	E
4.6.12.1.b	Parameters that may be altered via a connected terminal, such as described in 4.6.5, require protection as follows: b) It shall not be possible to configure to 'remote' mode with temporary changes present, except by special action which shall ensure that the ATCC is advised of this special status via the CAM for as long as the condition exists;	E
4.9.1.1	The equipment shall include a Time Function to provide time to the system (including CAM) for the purpose of synchronisation and time-stamping	E
4.9.4.2.d	The OLM functionality shall: d) Be monitored and controlled by the CAM;	E
6.1.2.1.g	The interrogator shall have the following capabilities: g) Control of all main functions of the interrogator shall be provided locally and remotely via the CAM interface;	E
8.2.3.	When performed manually by operational staff, the connection or disconnection of the station to the SCN shall be possible either locally or through the CAM.	E
8.2.4.	All network and nodal failures shall be reported to the CAM.	E
9.2.2.c	The DLF shall contain the following: The Internal Applications that allow pre-configured GICB extractions and Dataflash contracts. These Internal Applications can be accessed locally-remotely via the CAM or a dedicated terminal;	E

Link	Requirement	State
9.2.3.1	The BDS registers to be extracted, the periodicity of extraction of each BDS and their priority shall be site-dependant parameters programmed either at the CAM or at a dedicated terminal.	E
9.2.3.2	The conditions of the contract (BDS register to be monitored, contract number, event, change or time criteria which will trigger the AICB) shall be sitedependant parameters programmed either at the CAM or at a dedicated terminal.	E
12.1.3.g	The Mode S site monitor shall include the following features: g) BITE status and configuration status shall be reported to CAM;	E
12.1.3.h	The Mode S site monitor shall include the following features: h) Configuration shall be controlled by CAM;	E
12.1.3.	The Tenderer shall include in the proposal details of the Mode S site monitor configuration and how the changeover action is reported to the CAM.	I
13.2.2.5	The link shall be able to provide a communication interface with the SCN and the CAM and optionally a local RDP system.	E
13.2.2.6	Control and Monitoring (CAM) The Cluster Controller shall be provide with local and remote control and monitoring.	E
13.2.2.6	The Tenderer shall provide details of the CAM capabilities provided with the CC.	
13.12.1.1.a	The Tenderer shall indicate whether the following statistical information (on a Scan or timely basis) are provided for display at the CAM terminals (locally or remotely): a) (a) Information about the data supplied to the ATCC users: (i) Number of solo Mode S reports; (ii) Number of solo SSR reports; (iii) Number of solo PSR reports; (iv) Number of combined SSR/PSR reports; (v) Number of combined Mode S /PSR reports; (vi) Number of Splits plots; (vii) Number of code swaps; (viii) Number of plots with duplicated Mode S address; (ix) Number of test transponders; (x) Number of test targets.	I
13.12.1.1.b	The Tenderer shall indicate whether the following statistical information (on a Scan or timely basis) are provided for display at the CAM terminals (locally or remotely): b) Information about the data transferred through the SCN: (i) Number of Track Initiations sent out; (ii) Number of Track Initiations received; (iii) Number of Track Data messages sent out; (iv) Number of Track Data messages received; (v) Number of Track Data Requests sent out; (vi) Number of Track Data Requests received; (vii) Number of Tracks for which SCN Track Support is being given; (viii) Number of Tracks for which SCN Track Support is being received.	I
13.12.1.1.c	The Tenderer shall indicate whether the following statistical information (on a Scan or timely basis) are provided for display at the CAM terminals (locally or remotely): c) Information (including the rationale) about the data exchanged with the GDLP;	I

Link	Requirement	State
13.12.1.1.d	The Tenderer shall indicate whether the following statistical information (on a Scan or timely basis) are provided for display at the CAM terminals (locally or remotely): d) CPU loading on the different processing boards;	I
13.12.1.1.e	The Tenderer shall indicate whether the following statistical information (on a Scan or timely basis) are provided for display at the CAM terminals (locally or remotely): e) measured data rate on each link (surveillance, SCN and DLF).	I
13.12.1.2	The CAM terminals shall enable the connection or disconnection of the ground station from the Surveillance Co-ordination Network (SCN).	E
13.12.1.3	The Tenderer shall provide detailed information about the BITE of the CAM terminal (local or remote).	I
14.2.4.1.e	Maintainability Goals: The Contractor shall meet or improve on the MTTR targets for the following functional areas: e) CAM - 0.5 hrs;	E
14.9.8.	All parameters shall be accessible and/or modified through the CAM interfaces or a dedicated terminal.	E
14.9.8.a	The Contractor shall deliver a special document: a) Listing all the software parameters that could be accessed and/or modified via the CAM or any dedicated terminal;	E
4.6.2.4	The tenderer shall describe how the failures from the different LRUs and/or functions (Surveillance, SCF, DLF) are managed by the BITE and taken into account for switching decision.	I
8.2.4.	The NOGO bit shall be changed by the node's internal test logic 'BITE'. The NOGO bit in Cat 34/050 is automatically set to 0 whenever the system is active and therefore released for operational use.	E
12.1.3.d	The Mode S site monitor shall include the following features: d) Comprehensive BITE facilities to enable fault diagnosis to module level;	E
12.1.3.g	The Mode S site monitor shall include the following features: g) BITE status and configuration status shall be reported to CAM;	E
13.12.1.3	The Tenderer shall provide detailed information about the BITE of the CAM terminal (local or remote).	I

Tabulka B.1: Tabulka požadavků [9]

Legenda stavů (state):

E – Povinný požadavek

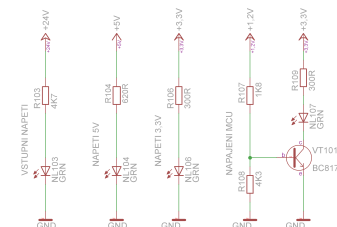
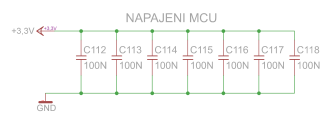
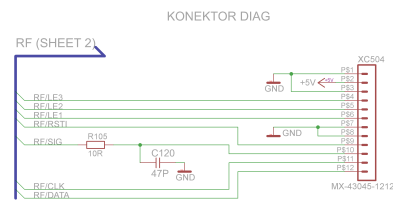
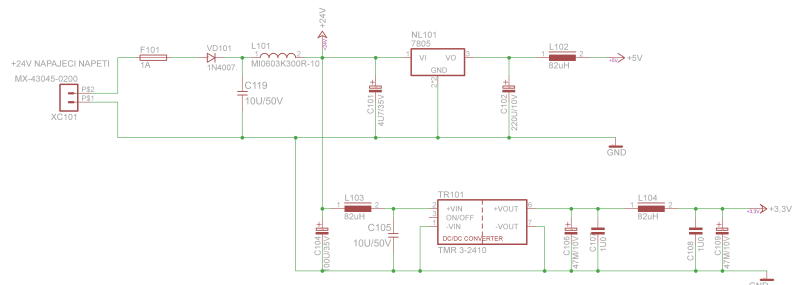
A – Doporučený požadavek

O – Volitelný požadavek

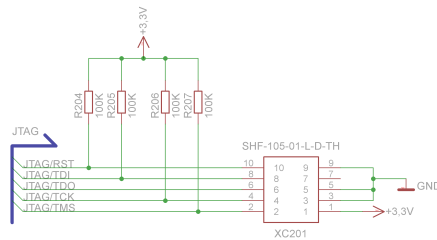
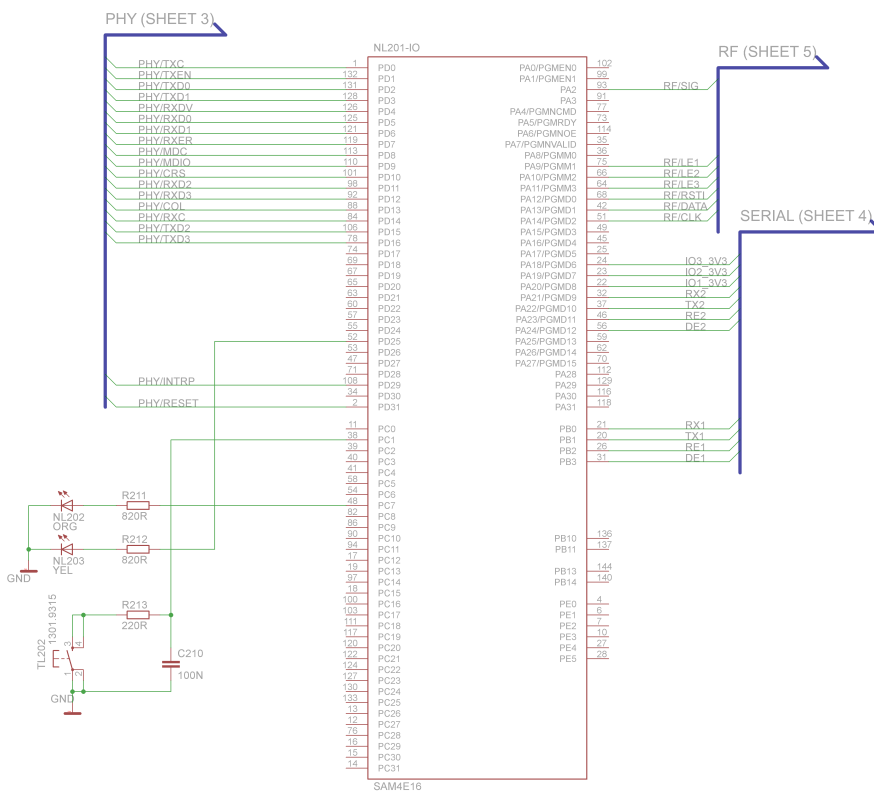
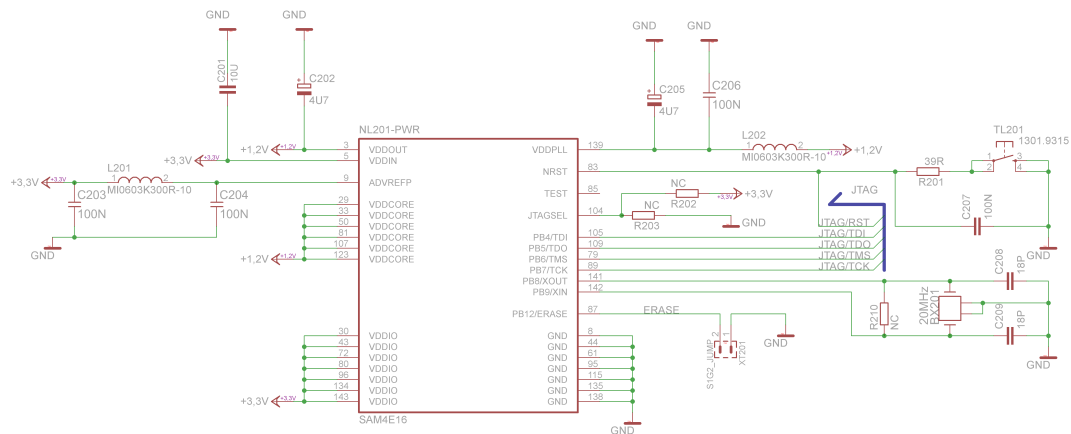
I – Důležitá informace

Příloha C

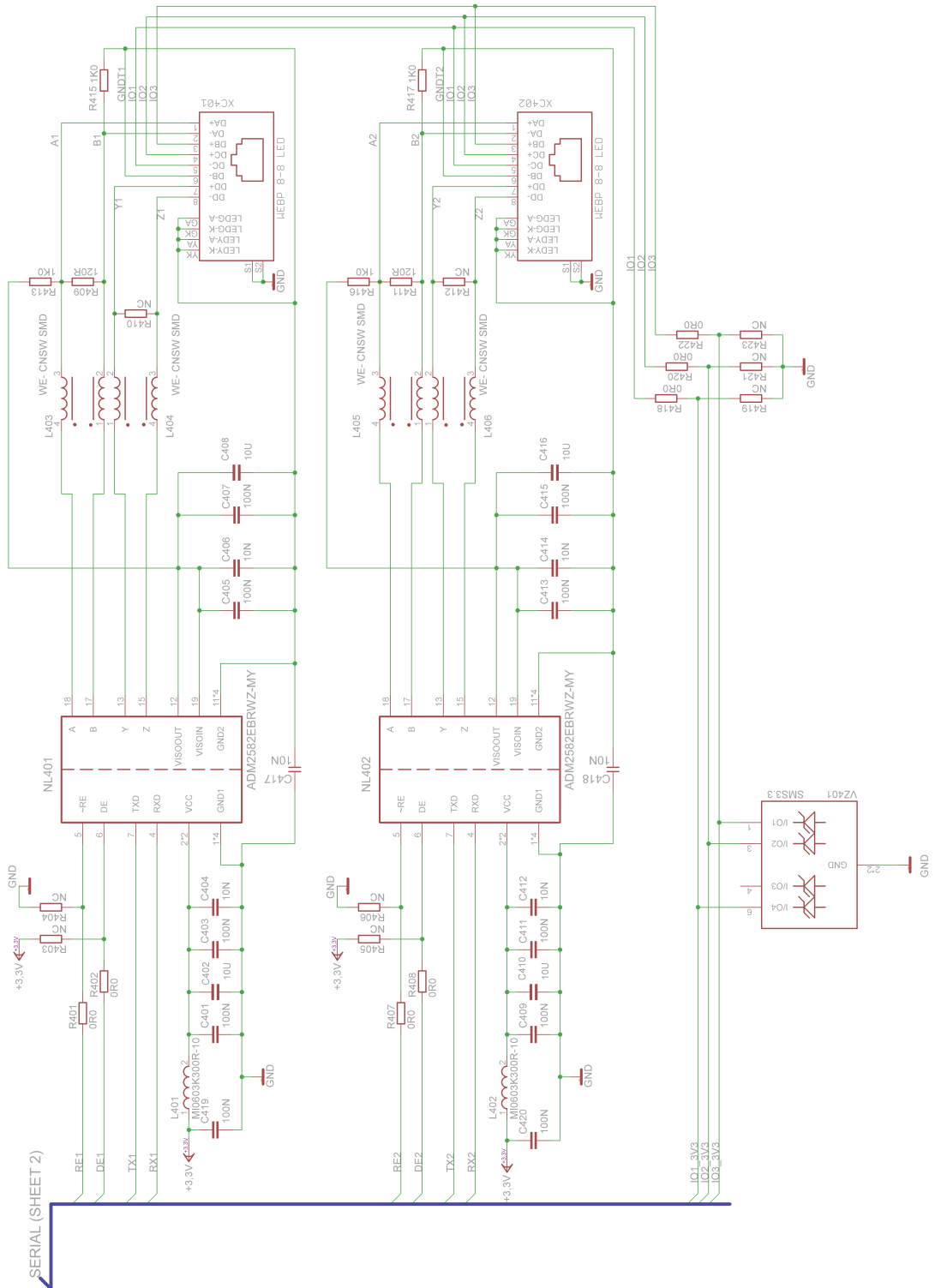
Schéma desky DIAG



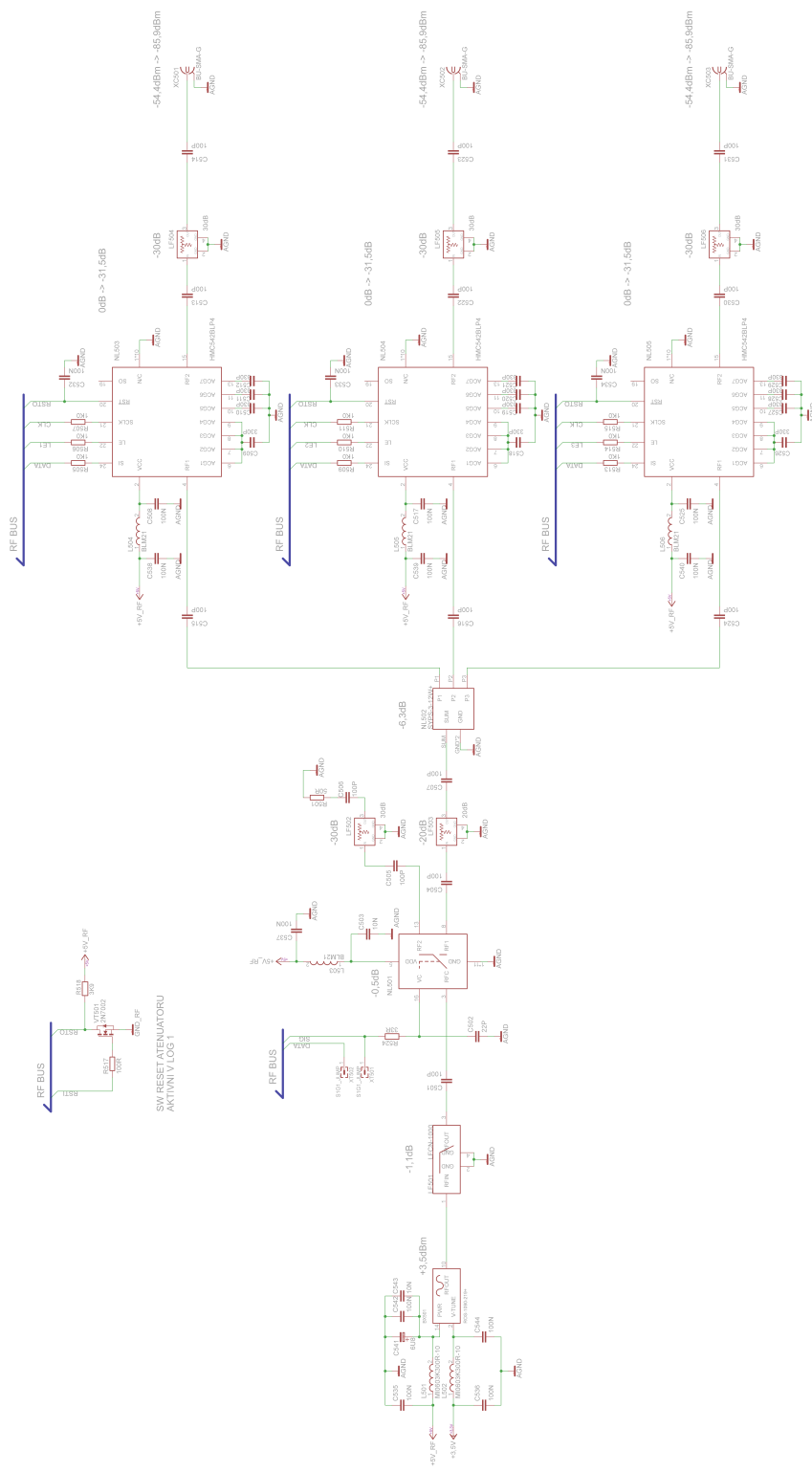
Obrázek C.1: Schéma DIAG – 1. část



Obrázek C.2: Schéma DIAG – 2. část
63



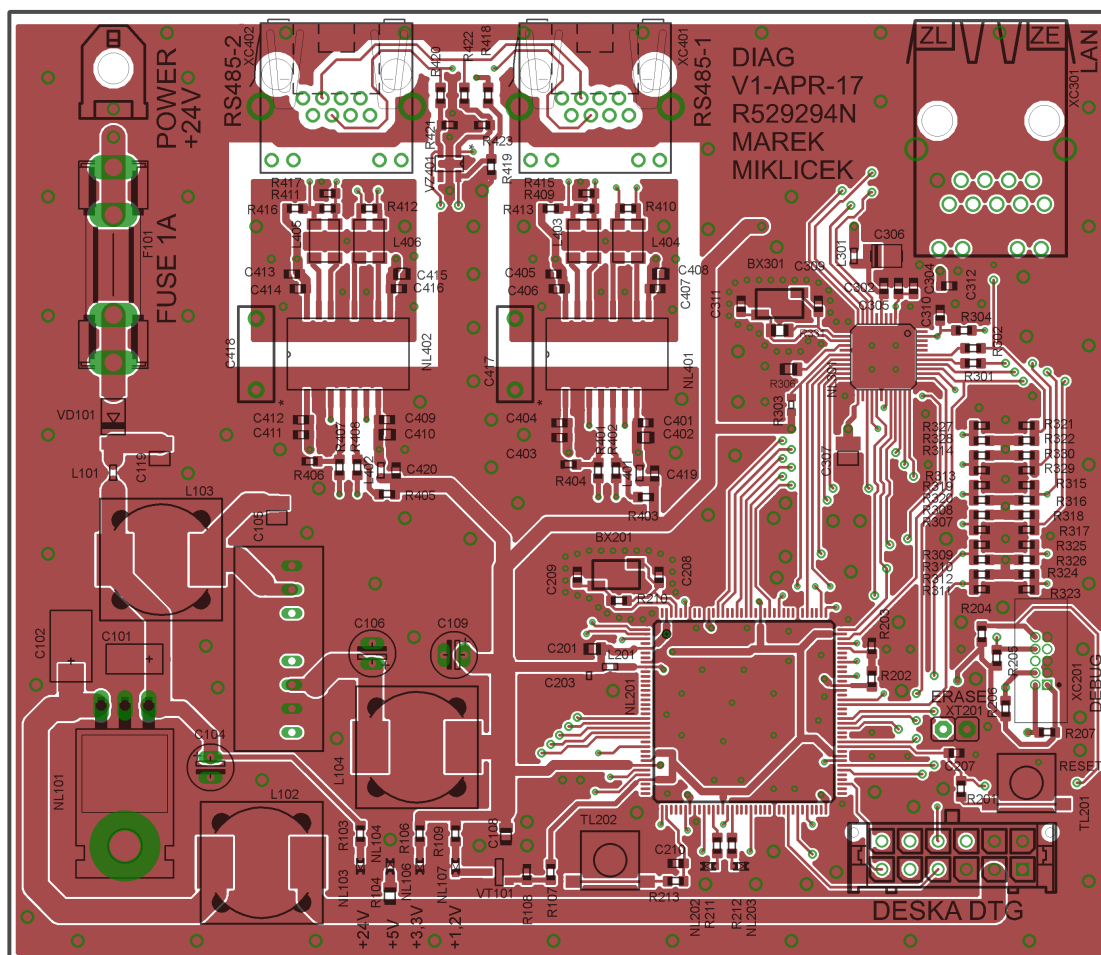
Obrázek C.4: Schéma DIAG – 4. část



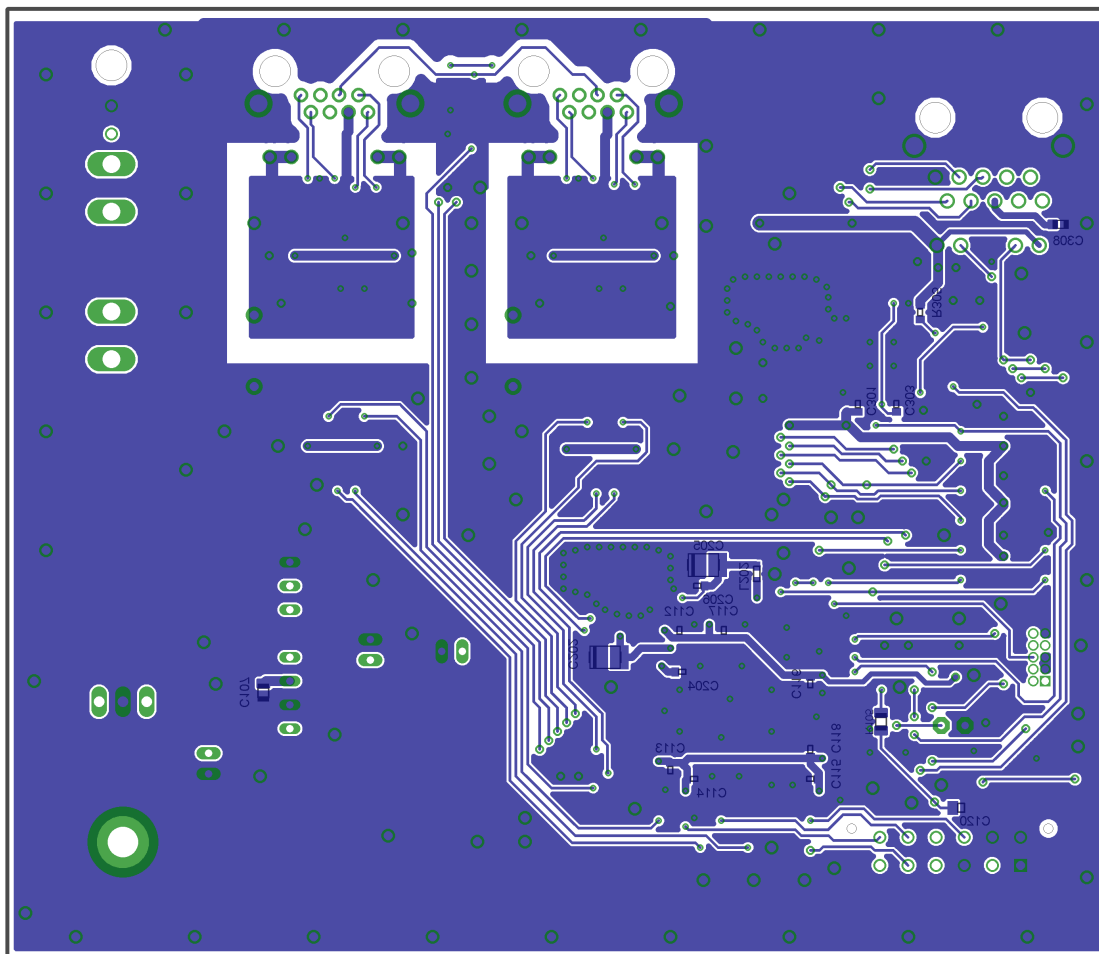
Obrázek D.2: Schéma DTG – 2. část

Příloha E

Deska plošného spoje DIAG



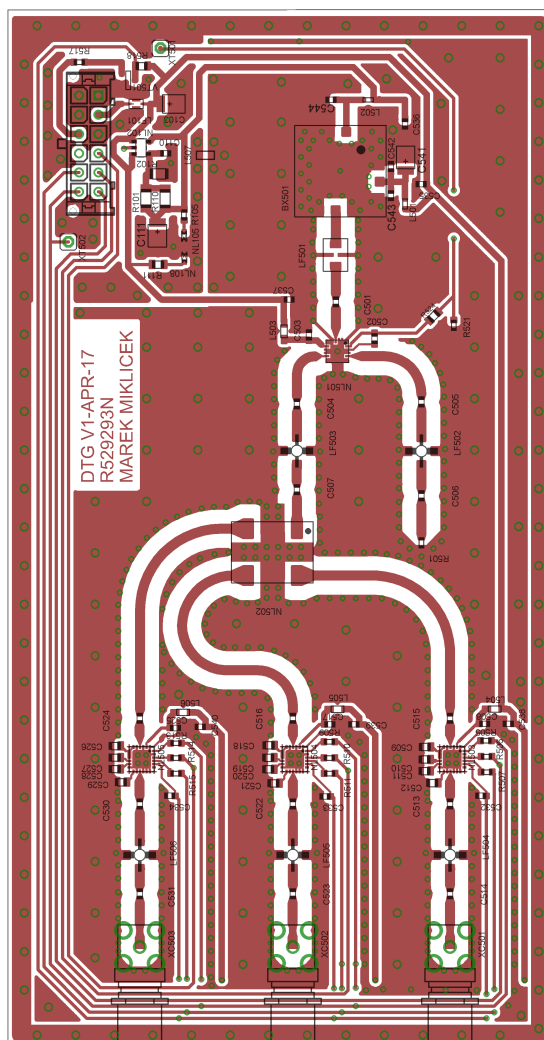
Obrázek E.1: Deska DIAG – horní strana



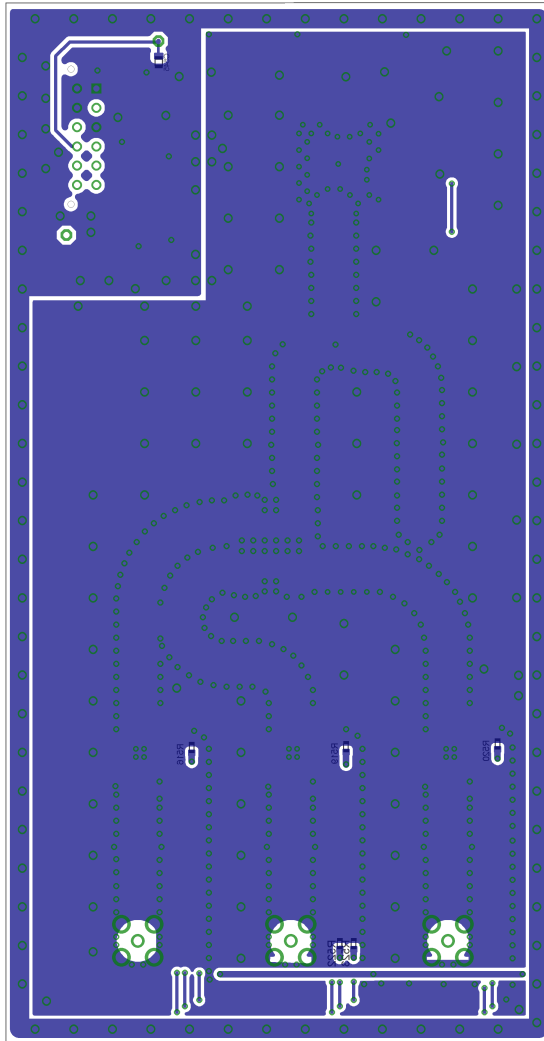
Obrázek E.2: Deska DIAG – spodní strana

Příloha F

Deska plošného spoje DTG



Obrázek F.1: Deska DTG – horní strana



Obrázek F.2: Deska DTG – spodní strana

Příloha G

Seznam součástek - Deska DIAG

Označení	Název	Hodnota	Pouzdro
C208, C209	KONDENZ. KER SMD	18 pF	18P SMD0603
C309, C311	KONDENZ. KER. SMD	22 pF	22P/50V SMD0603
C120	KONDENZ. KER. SMD	47 pF	47P SMD0805
C308, C404, C406, C412, C414	KONDENZ. KER SMD	10 nF	10N SMD0603
C417, C418	KONDENZ. FOLIOVY	10 nF	CF-10N/630V
C112, C113, C114, C115, C116, C117, C118, C203, C204, C206, C207, C210, C301, C302, C303, C304, C310, C312, C401, C403, C405, C407, C409, C411, C413, C415, C419, C420	KONDENZ. KER SMD	100 nF	100N/50V SMD0603
C107, C108	KONDENZ. KER SMD	1 μ F	1U0/16V SMD0805
C305	KONDENZ. KER SMD	2,2 μ F	2U2 SMD0603
C202, C205	KONDENZ. TANT. SMD	4,7 μ F	4U7/6V3 SMD b(3528)
C101	KONDENZ. TANT. SMD	4,7 μ F	4U7/35V SMD c(6032)
C201, C402, C408, C410, C416	KONDENZ. KER SMD	10 μ F	10U SMD0805
C105, C119	KONDENZ. KER SMD	10 μ F	10U SMD1210
C306	KONDENZ. TANT. SMD	22 μ F	22U/16V SMD B(3528)
C307	KONDENZ. KER SMD	22 μ F	22U/25V SMD1210
C106, C109	KONDENZ. ELYT	47 μ F	47U/25V e2,5
C104	KONDENZ. ELYT	100 μ F	E100U/35V

Označení	Název	Hodnota	Pouzdro
C102	KONDENZ.TANT.SMD	220 μ F	220U/10V SMD d(7343)
R401, R402, R407, R408, R418, R420, R422	ODPOR SMD	0 Ω	0R0 SMD0603
R105	10 Ω	10R SMD0805	
R201, R304	ODPOR SMD	39 Ω	39R SMD0603
R301, R302	ODPOR SMD	100 Ω	100R SMD0603
R409, R411	ODPOR SMD	120 Ω	120R SMD0603
R213	ODPOR SMD	220 Ω	220R SMD0603
R106, R109	ODPOR SMD	300 Ω	300R SMD0603
R104	ODPOR SMD	620 Ω	620R SMD0805
R211, R212	ODPOR SMD	820 Ω	820R SMD0603
R303, R307, R309, R313, R315, R317, R323, R327, R413, R415, R416, R417	ODPOR SMD	1 K Ω	1K0 SMD0603
R107	ODPOR SMD	1,8 K Ω	1K8 SMD0805
R108	ODPOR SMD	4,3 K Ω	4K3 SMD0603
R103, R312, R320, R322, R326, R330	ODPOR SMD	4,7 K Ω	4K7 SMD0603
R306	ODPOR SMD	6,49 K Ω	6K49 SMD0805
R204, R205, R206, R207, R305	ODPOR SMD	100 K Ω	100K SMD0603
R120, R503	ODPOR SMD	100 K Ω	100K SMD0805
R331	ODPOR SMD	1 M Ω	1M0 SMD0805
R202, R203, R210, R308, R310, R311, R314, R316, R318, R319, R321, R324, R325, R328, R329, R403, R404, R405, R406, R410, R412, R419, R421, R423	ODPOR SMD		Neosazeno
L403, L404, L405, L406	TLUMIVKA SOUFAZ.	1,3 μ H	1,3UH SMD1812

Označení	Název	Hodnota	Pouzdro
L102, L103, L104	TLUMIVKA SMD	82 μ H	DE1207-82
L101, L201, L202, L301, L401, L402	FERIT. PERLIČKA SMD	MI0603K 300R-10	MI0603K300R-10 SMD0603
TL201, TL202	MIKROSPÍNAČ SMD		1301.9315
F101	VLOŽKA POJIST.	1 A	5*20mm
F101	POUZDRO POJIST.	SHK20L	rm5mm
VD101	USMĚR. DIODA	1N4007	1N4007 SM-1
NL202	LED ORANŽOVÁ	Orange	OSO5060341F SMD0603
NL203	LED ŽLUTÁ	Yellow	OSY5060341F
NL103, NL104, NL106, NL107	LED ZELENÁ	Green	OSG80603C1E
VZ401	DIODOVÉ POLE	SMS3.3	SMS3.3 SOT-23 6L
VT101	TRANZISTOR SMD	BC817	SOT-23
BX201	OSCILÁTOR	20 MHz	20MHZ SMD_5X3
BX301	OSCILÁTOR	25 MHz	25MHZ SMD_5X3
NL401, NL402	INTEG. OBVOD	ADM2582	ADM2582 SOIC-20
NL301	INTEG. OBVOD	KSZ8081	KSZ8081MLXCA LQFP48
NL201	INTEG. OBVOD	SAM4E	ATSAM4E16EA-AU LQFP144
NL101	STABILIZATOR NAPĚTÍ	7805	7805 - TO220
TR101	DC/DC MĚNIČ 3V3	TMR 3-2410	TMR 3-2410
XC301	KONEKTOR ETHER-NET		LMJ20881014140DLET3
XC401, XC402	KONEKTOR ETHER-NET		WEBP 8-8 LED
XC101	DPS KONEKTOR	MX-43045-0200	MX-43045-0200
XC504	DPS KONEKTOR	MX-43045-1212	MX-43045-1212
XC201	DPS KONEKTOR		SHF-105-01-L-D-TH
XT201	HŘEBÍNEK	S1G40	S1G40 - 2X

Příloha H

Seznam součástek - Deska DTG

Označení	Název	Hodnota	Pouzdro
C502	KONDENZ. KER SMD	22 pF	22P SMD0603
C545	KONDENZ. KER SMD	47 pF	47P SMD0805
C501, C504, C505, C506, C507, C513, C514, C515, C516, C522, C523, C524, C530, C531	KONDENZ. KER SMD	100 pF	100P/50V SMD0603
C509, C510, C511, C512, C518, C519, C520, C521, C526, C527, C528, C529	KONDENZ. KER SMD	330 pF	330PF/50V SMD0805
C503, C543	KONDENZ. KER SMD	10 nF	10NF/63V SMD0603
C508, C517, C525, C532, C533, C534, C535, C536, C537, C538, C539, C540, C542, C544	KONDENZ. KER SMD	100 nF	100N/50V SMD0603
C541	KONDENZ. ELYT SMD	6,8 μ F	6U8/10V SMD B(3528)
C103, C111	KONDENZ. ELYT SMD	10 μ F	10UF/6V3 SMD B(3528)
C110	KONDENZ. KER SMD		Neosazeno
R524	ODPOR SMD	33 Ω	50R SMD0805
R501	ODPOR SMD	50 Ω	50R SMD0603
R517	ODPOR SMD	100 Ω	100R SMD0603
R105	ODPOR SMD	300 Ω	300R SMD0603
R111	ODPOR SMD	620 Ω	620R SMD0805

Označení	Název	Hodnota	Pouzdro
R505, R506, R507, R509, R510, R511, R513, R514, R515, R516, R519, R520, R521, R522, R523	ODPOR SMD	1 K Ω	1K0 SMD0603
R518	ODPOR SMD	3,9 K Ω	3K9 SMD0805
R102	ODPOR SMD	27 K Ω 1%	27K1% SMD1206
R101	ODPOR SMD	51 K Ω 1%	51K11% SMD1206
R110	ODPOR SMD	2,7 M Ω 1%	2M71% SMD1206
L507	TLUMIVKA SMD	1 μ H	1UH SMD0603
L501, L502	FERIT. PERLIČKA SMD	MI0603K 300R-10	MI0603K300R-10 SMD0603
L503, L504, L505, L506	FERIT. PERLIČKA SMD	BLM21	BLM21 SMD0805
LF101	FILTR SMD	NFM21	NFM21 SMD0805
LF501	FILTR SMD	LFCN- 1000	LFCN-1000 FV1206
NL105, NL108	LED ZELENÁ SMD	Green	OSG80603C1E
VT501	TRANZISTOR SMD	2N7002	2N7002 SOT-23
LF503	FIXNÍ ATENUÁTOR	20 dB	PAT-20+ AF320
LF502, LF504, LF505, LF506	FIXNÍ ATENUÁTOR	30 dB	PAT-30+ AF320
BX501	OSCILÁTOR	1090MHZ	ROS-1090-219 CK605
NL502	DĚLIČ VÝKONU	SYPS-3- 12W+	SYPS-3-12W+ AH202
NL503, NL504, NL505	INTEG OBVOD	HMC542 BLP4	HMC542BLP4 QFN24
NL501	INTEG. OBVOD	RF3021	RF3021 QFN16
NL102	NASTAV. NAP. REGUL.	SPX3819	SPX3819 SOT23-5
XC501, XC502, XC503	DPS KONEKTOR		BU-SMA-G
XC505	DPS KONEKTOR		MX-43045-1212
XT501, XT502	HŘEBÍNEK		S1G40 – 1X

