



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

AUTOMATIZOVANÝ MĚŘICÍ SYSTÉM

AUTOMATIC MEASUREMENT SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Mičánek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Jakub Mičánek

ID: 164905

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Automatizovaný měřicí systém

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je návrh a realizace dílčí části programového vybavení a konfigurace hradlového pole komplexního automatizovaného měřicího systému pro měření přenosu a dalších parametrů mikrovlnného n-branu. Zadání lze shrnout do následujících bodů:

1. Popište celkovou koncepci měřicího systému a programového vybavení
2. Vytvořte knihovnu pro ovládání použitých měřicích přístrojů z MATLABu.
3. Vytvořte knihovnu pro ovládání řídicího modulu z MATLABu.
4. Vytvořte skript v MATLABu pro provedení měření, vyhodnocení a vizualizaci výsledků.
5. Vytvořte konfiguraci hradlového pole a programové vybavení pro procesor řídicího modulu, který na základě předzpracovaných příkazů zasílaných z ovládací knihovny (MATLABu) nakonfiguruje měřený n-bran, vygeneruje potřebné signály řízení/časování, nastaví vstupní a výstupní matici přepínačů a synchronizuje připojené měřicí přístroje.
6. Funkčnost vytvořených SW modulů vhodným způsobem ověřte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Haasz, V. a kol. Číslíkové měřicí systémy. 2. vyd. Praha: ČVUT, 2000. ISBN: 80-01-02219-6

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 29.5.2017

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Konzultant: Ing. Pavel Šedivý

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení částí druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

Abstrakt

Bakalářská práce popisuje návrh části automatizovaného systému pro měření mikrovlnných parametrů testovaného aktivního víceportového neregiprokého konfigurovatelného bloku. Práce popisuje způsob implementace ovládání vektorového obvodového analyzátoru, ovládání měřeného bloku, přepínací matice a jejich synchronizace. Programové vybavení pro řízení měřicího systému je implementováno v jazyce MATLAB a generování řídicích signálů je implementováno v programovatelném hradlovém poli v jazyce VHDL.

Klíčová slova

Automatizované mikrovlnné měření, VNA, SoC FPGA, MATLAB

Abstract

This bachelor thesis describes design of automated measurement system intended for measurement of microwave parameters of active configurable multiport nonreciprocal device. The thesis describes implementation of vector network analyzer control, device under test control, switch matrix control and synchronization of individual activities. Control software is implemented in MATLAB and generation of control signals is implemented in VHDL.

Keywords

Automated microwave measurement, VNA, SoC FPGA, MATLAB

Bibliografická citace:

MIČÁNEK, J. *Automatizovaný měřicí systém*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 40s. Vedoucí bakalářské práce byl doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma automatizovaný měřicí systém jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **29. května 2017**

.....
podpis autora

Poděkování (nepovinné)

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **29. května 2017**

.....
podpis autora

Obsah

1 Úvod.....	9
2 Popis měření.....	10
2.1 S-parametry	10
2.2 Měření s-parametrů	11
2.3 Vektorový obvodový analyzátor	12
2.4 Měřené parametry DUT	14
3 Koncept měřicího stanoviště.....	15
3.1 DUT	15
3.2 VNA a přepínací matice.....	15
3.3 Řídicí modul pro DUT	16
3.4 PC a řídicí knihovny	16
3.5 Struktura a vazby měřicího systému	17
4 Knihovna pro ZVL-13.....	19
4.1 Ovládání ZVL-13	19
4.2 Knihovna pro ovládání ZVL-13.....	22
4.3 Zkušební měření VNA	24
5 Knihovna pro ovládání modulu a DUT.....	29
5.1 Ovládání řídicího modulu	29
5.2 Ovládání přepínačů a synchronizační signály.....	32
6 Ověření funkce měřicího systému.....	36
7 Závěr	37
8 Literatura	39

Seznam obrázků

obr 2.1 Model dvojbranu [2]	10
obr 2.2 Význam S-parametrů [4]	12
obr 2.3 Jedna z možných realizací VNA [2]	13
obr 3.1 Charakter DUT	15
obr 3.2 Schéma systému.....	18
obr 4.1 Příklad stromu SCPI kategorií [3]	20
obr 4.2 Vnitřní hierarchie ZVL-13 VNA	22
obr 4.3 Hierarchie NVA objektu	23
obr 4.4 Fotografie sestavy měření	26
obr 4.5 Naměřené hodnoty parametru S_{12}	27
obr 4.6 Naměřené hodnoty parametru S_{21}	27
obr 5.1 Zjednodušený diagram zpracování zprávy	31
obr 5.2 Smithův diagram koeficientů odrazu v závislosti na frekvenci.....	33
obr 5.3 Přepínací matice.....	34
obr 5.4 Přepínací matice – detail otevřeného konce	35

1 Úvod

Cílem této práce je popsat koncept, realizaci a výsledky použití automatizovaného mikrovlnného měřicího systému. Obsahem práce je návrh klíčových částí systému a realizace programového vybavení včetně konfigurace komponent hradlového pole. Práce využívá subsystemy poskytnuté autorem měřeného zařízení (DUT), které nejsou jejím předmětem a jsou popsány pouze vazby na ně.

Měřicí systém bude využíván pro charakterizaci DUT během dokončování vývoje a následně při sériové výrobě ke kontrole jeho parametrů a kalibraci (určení korekčních konstant pro kompenzaci výrobních nepřesností). Cílem měřicího systému je charakterizace reálného konfigurovatelného nerekiprokého pulzního nestacionárního aktivního mikrovlnného mnohaporťového DUT. Mezi klíčové měřené parametry patří s -parametry (pro různá provozní nastavení), přeslechy mezi kanály a nelineární parametry (kompresní charakteristika výstupního zesilovače). Všechny uvedené parametry jsou vyhodnocovány na základě měření přenosů prováděných s různými parametry budícího signálu a nastavení DUT.

Druhá kapitola obsahuje popis měřených veličin a přístrojového vybavení vhodného k jejich měření. Třetí kapitola obsahuje popis jednotlivých částí měřicího systému a upřesňuje požadavky na části realizované v rámci této práce. Jsou zde také popsány vazby mezi vznikajícími a existujícími systémy. Čtvrtá kapitola je věnována popisu tvorby knihovny ovládající přístrojové vybavení a její praktické ověření. V kapitole páté je popsán průběh návrhu a implementace knihovny zajišťující komunikaci mezi počítačem a DUT. Je zde také popsán vývoj konfigurace hradlového pole potřebné pro synchronizaci měření. Šestá kapitola shrnuje a ověřuje funkčnost celého měřicího systému.

2 Popis měření

Protože tato práce spojuje mnoho různorodých oborů elektroniky využívajících metody měření a způsob popisu parametrů ne zcela obvyklé a všeobecně známé, obsahuje tato kapitola krátký úvod do problematiky a terminologie.

2.1 S-parametry

Obecně platí, že v případě, kdy je vlnová délka kteréhokoliv rozměru obvodu podobná vlnové délce procházející vlny, nelze využít klasickou teorii popisu obvodů pomocí soustředěných parametrů.[1] Je to dáno tím, že změny elektrické délky a místa měření (referenční roviny) výrazně změní parametry a charakter obvodů.

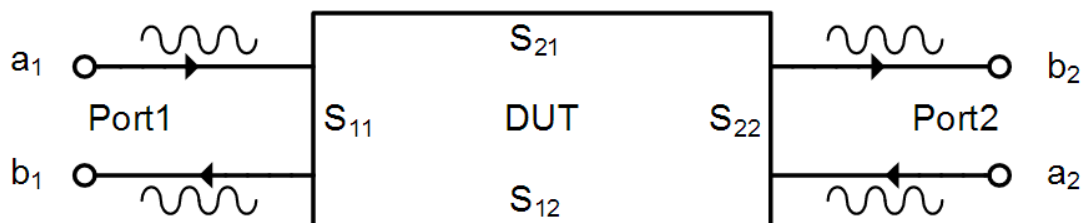
V takovém případě je tedy potřeba přistupovat k obvodu jako by měl charakter obvodu s rozprostřenými parametry s určitou charakteristickou impedancí. Rozdíl charakteristické impedancí určuje, jak se bude chovat procházející napěťový signál. Výkon tohoto signálu (či jeho část) se může na rozhraní odrazit či projít.

Pro charakterizaci vícebranu je možné na nízkých frekvencích použít parametry jako z , y , nebo h . Na vysokých frekvencích je však problematické měření těchto parametrů, protože využívají zkratů a otevřených konců pro zakončení měřených obvodů.

Pro dvojbran na obr 2.1 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, kde signály a_i a b_i značí dopadající a odražené normalizované napěťové vlny, získáme rovnice (1) a (2). [1]

$$b_1 = a_1 \cdot s_{11} + a_2 \cdot s_{12} \quad (1)$$

$$b_2 = a_1 \cdot s_{21} + a_2 \cdot s_{22} \quad (2)$$



obr 2.1 Model dvojbranu [2]

2.2 Měření s-parametrů

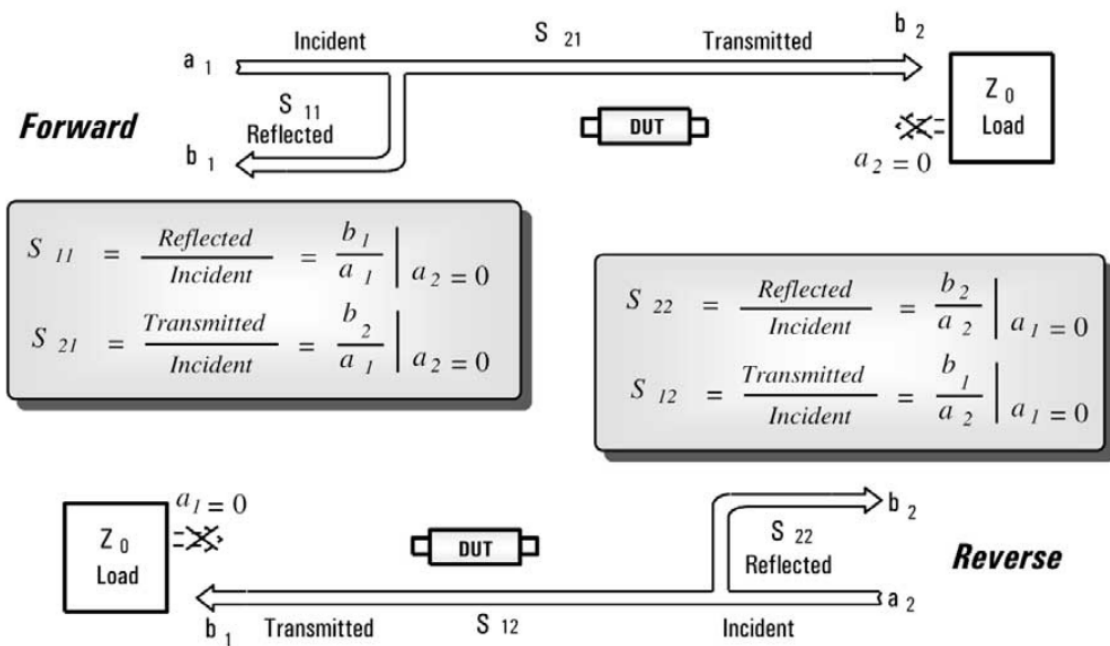
Pro měření s-parametrů je potřeba, aby měřený dvojbran byl zakončen přizpůsobenou zátěží (nominální impedancí Z_0) na všech portech, jak je tomu na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..** Výstupní port je zakončen přizpůsobenou hodnotou impedance, aby nedocházelo k nechtěným odrazům. Poměr fázorů prošlé a odražené vlny vůči vlně vyslané pak určuje jednotlivé komplexní rozptylové parametry popisující chování měřeného zařízení v závislosti na frekvenci generátoru.

Nejprve se vyšle signál a_1 , jehož odražená část je vyjádřena jako b_1 , a část signálu která prošla na výstupní port je vyjádřena jako b_2 . Stejný proces provedeme i opačným směrem.

Získané koeficienty přenosů pak můžeme vyjádřit formou maticového zápisu (3).

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Jednotlivé přenosy této matice jsou odlišeny pomocí indexu obsahujícího postupně vstupní a výstupní port. Počet prvků matice přenosů bude odpovídat druhé mocnině celkového počtu portů. Hodnoty s-parametrů na diagonále vzniklé matice se nazývají odrazové koeficienty, zatímco hodnoty mimo diagonálu se nazývají přenosové koeficienty a popisují přenos mezi dvěma neidentickými porty.



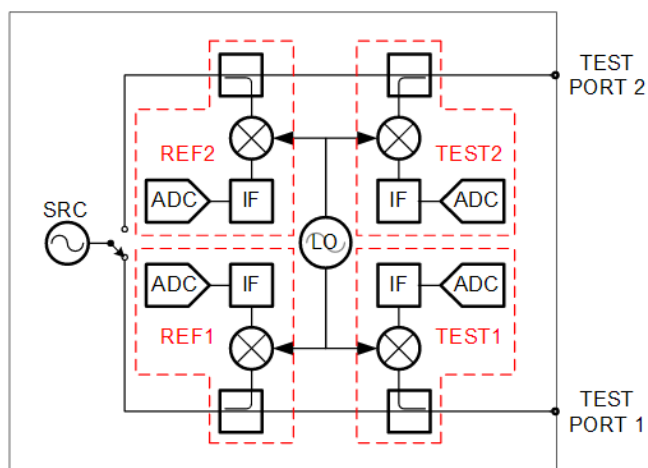
obr 2.2 Význam S-parametrů [4]

2.3 Vektorový obvodový analyzátor

K měření komplexních s-parametrů se v dnešní době nejčastěji využívá vektorových obvodových analyzátorů (VNA). V případech, kdy nebylo vyžadováno měření komplexních hodnot s-parametrů, se používaly skalární obvodové analyzátoři (SNA). [1]

2.3.1 Princip funkce VNA

Vektorové obvodové analyzátoři se rozlišují například: frekvenčním a výkonovým rozsahem zdroje, počtem a vlastnostmi portů, cílovou skupinou DUT (aktivní, pasivní, pulzní atd.), či množstvím doplňkových funkcí (korekční metody, automatizace měření, zobrazení). Funkční schéma typického obousměrného VNA je na obr 2.3. Obsahuje přepínatelný generátor *RF* signálů *SRC*. Zbytek obvodu sestává ze čtyř přijímačů vyslaných a příchozích vln. V těchto přijímačích probíhá konverze z vysoké frekvence (*RF*) na mezifrekvenci (*IF*) pomocí lokálního oscilátoru (*LO*). Získaný *IF* signál je následně filtrován a převeden *ADC* převodníkem. Tato možnost je jednou z více realizací popsaných v [5] a [4].



obr 2.3 Jedna z možných realizací VNA [2]

Další charakteristiky měřitelné pomocí VNA mohou být například šumové číslo, kompresní zisk, izolace či intermodulace, ale konkrétní možnosti jsou závislé na charakteru DUT a typu přístroje.

2.3.2 Kalibrace VNA

Důležitou schopností VNA je provedení kalibrace, která umožní eliminaci většiny lineárních systematických chyb měření (chyby typu B) [6]. Tyto chyby jsou určeny měřením na známých standardech jejichž hodnoty se blíží ideálním. Mezi tyto standardy patří například: zkrat (short), otevřený konec (open) či přímé propojení (through). Odlišnosti kalibračního standardu od ideální charakteristiky jsou popsány na příložených datových médiích. Kalibrační metody se liší použitým chybovým modelem a standardy potřebnými k jejich provedení. Po provedení kalibrace se referenční rovina měření (místo vůči kterému jsou vztaženy měřené hodnoty s-parametrů) bude nacházet v rovině konektorů.

Chyby typu A (náhodné chyby) jsou částečně konstrukčně minimalizovány, avšak je potřeba s nimi stále počítat (teplotní posuv, šum)[6]. Vliv šumu lze částečně omezit průměrováním.

2.4 Měřené parametry DUT

Kromě přímých přenosů mezi porty DUT je potřeba provést měření dalších parametrů. Mezi tyto parametry patří přeslechy mezi kanály a zjištění kompresního bodu DUT.

2.4.1 Přeslechy mezi kanály

Měření přeslechů mezi kanály je prováděno měřením přenosu signálu vystupujícího z portu, který je oddělen od vstupního portu (přímý přenos mezi fyzicky oddělenými kanály). Přímá vazba portů je zakončena absorbujícím zakončením a výstup je měřen na portu bez přímé vazby na vstupní port. Jde o měření přenosu signálu přecházejícího mezi jednotlivými obvody zařízení.

2.4.2 Komprese na vysílání

Jelikož na výstupu DUT mohou být velké výstupní výkony a lze očekávat nelineární charakter reálných zesilovacích prvků, začne od jisté hodnoty vstupního výkonu docházet ke kompresi.

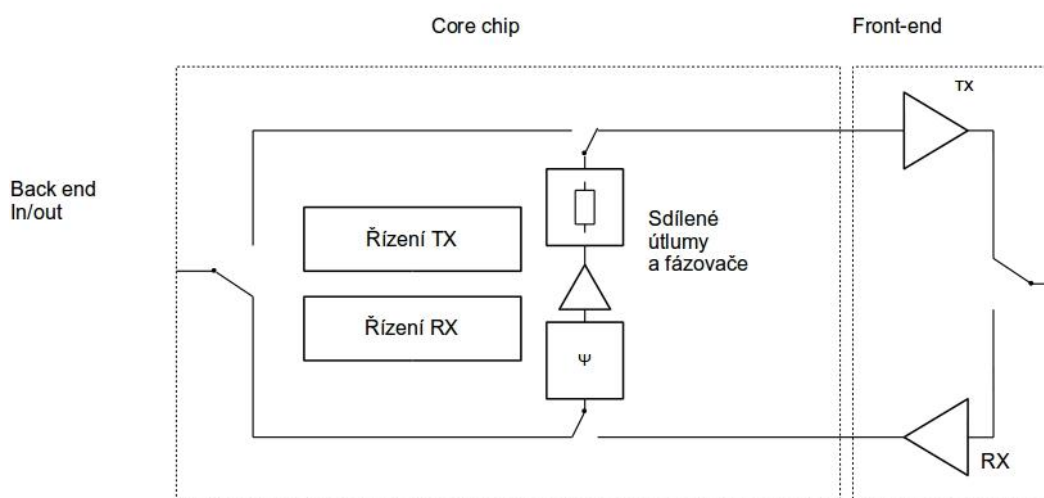
Možnost nastavení výkonu zdroje signálu VNA umožňuje měření kompresní charakteristiky, která charakterizuje pokles zisku s rostoucím vstupním výkonem. Bod x dB komprese s -parametru vznikne v místě, kde výkon výstupního signálu klesl o x dB oproti výkonu vstupního signálu. Pro každý bod kompresní charakteristiky je nutná kalibrace VNA.

3 Koncept měřicího stanoviště

V rámci následující kapitoly je popsán koncept celého měřicího systému. Je zde proveden popis charakteru DUT, měřicí aparatury, řídicí desky pro DUT a řídicího stanoviště (PC). V rámci jednotlivých částí systému jsou také popsány vazby na již existující subsystémy a jejich začlenění.

3.1 DUT

Měření budou prováděna na DUT (obr 3.1) se dvěma sadami portů na předním panelu (front end) a zadním panelu (back end). Na předním panelu se nachází 16 portů vstup/výstup (I/O) a na zadním panelu dva porty (jeden I/O a druhý pouze O). V DUT dochází k přepínání cest a změnám parametrů procházejícího signálu (útlumy, zisky, fázové posuvy). Změny režimu DUT jsou prováděny zprávami přicházejícími z řídicího modulu (viz. 3.3) po sériové lince (SPI).



obr 3.1 Charakter DUT

3.2 VNA a přepínací matice

Všechna požadovaná měření popsaná v kapitole 2.4 je možné provést pomocí VNA. Pro tato měření je dostupný přístroj ZVL-13 od firmy Rohde & Schwarz (R&S). V rámci měřicího stanoviště je, vzhledem k velkému počtu cest a referenčních rovin, účelné automatizovat měření. Pro automatizaci tohoto měření a kalibrací je potřeba

možnost vzdáleného programového nastavování VNA, které je prováděno z prostředí MATLAB (viz 3.4).

Jelikož přístroj ZVL-13 disponuje pouze dvěma porty, je využita přepínací matice umožňující měřit všechny kombinace portů DUT. Tato přepínací matice je realizovaná kaskádou několika vysokofrekvenčních přepínačů. Ovládání této přepínací matice je realizováno řídicím modulem.

3.3 Řídicí modul pro DUT

Pro synchronizaci měřicí aparatury je využita vývojová deska DE0-Nano-SoC od firmy TerasIC. Tato vývojová deska obsahuje programovatelné logické pole (FPGA) s integrovaným procesorem ARM – SoC (System on chip). Díky tomuto spojení je možné na jediné vývojové desce realizovat algoritmické operace a zároveň zajistit vysokou přesnost časování [7]

Jedním z hlavních úkolů řídicího modulu je zprostředkování komunikace řídicího PC a DUT. Modul zapouzdřuje SPI komunikaci s DUT pomocí existujícího programového vybavení, které není předmětem této práce. Tento program komunikuje s PC pomocí textově orientovaných zpráv (telnet). Vyhodnocuje zprávy a na jejich základě provádí různá nastavení či vyčítání parametrů DUT. Součástí měřicího systému je synchronizace měřicích přístrojů a spínání vysílání DUT. Maximální doba vysílání se pohybuje v časovém rámci několika mikrosekund a pro relevanci výsledků je potřeba zajistit precizní synchronizaci činnosti DUT s měřicími přístroji, tak aby bylo měření provedeno ve chvíli, kdy DUT vysílá. Tato synchronizace není nutná pro měření DUT v módu příjmu.

V rámci řídicího modulu, je má práce soustředěna na návrh konfigurace FPGA, které bude generovat spínací signály pro měřicí přístroj (VNA), generovat řídicí impulzní signály pro DUT a nastavovat přepínací matici.

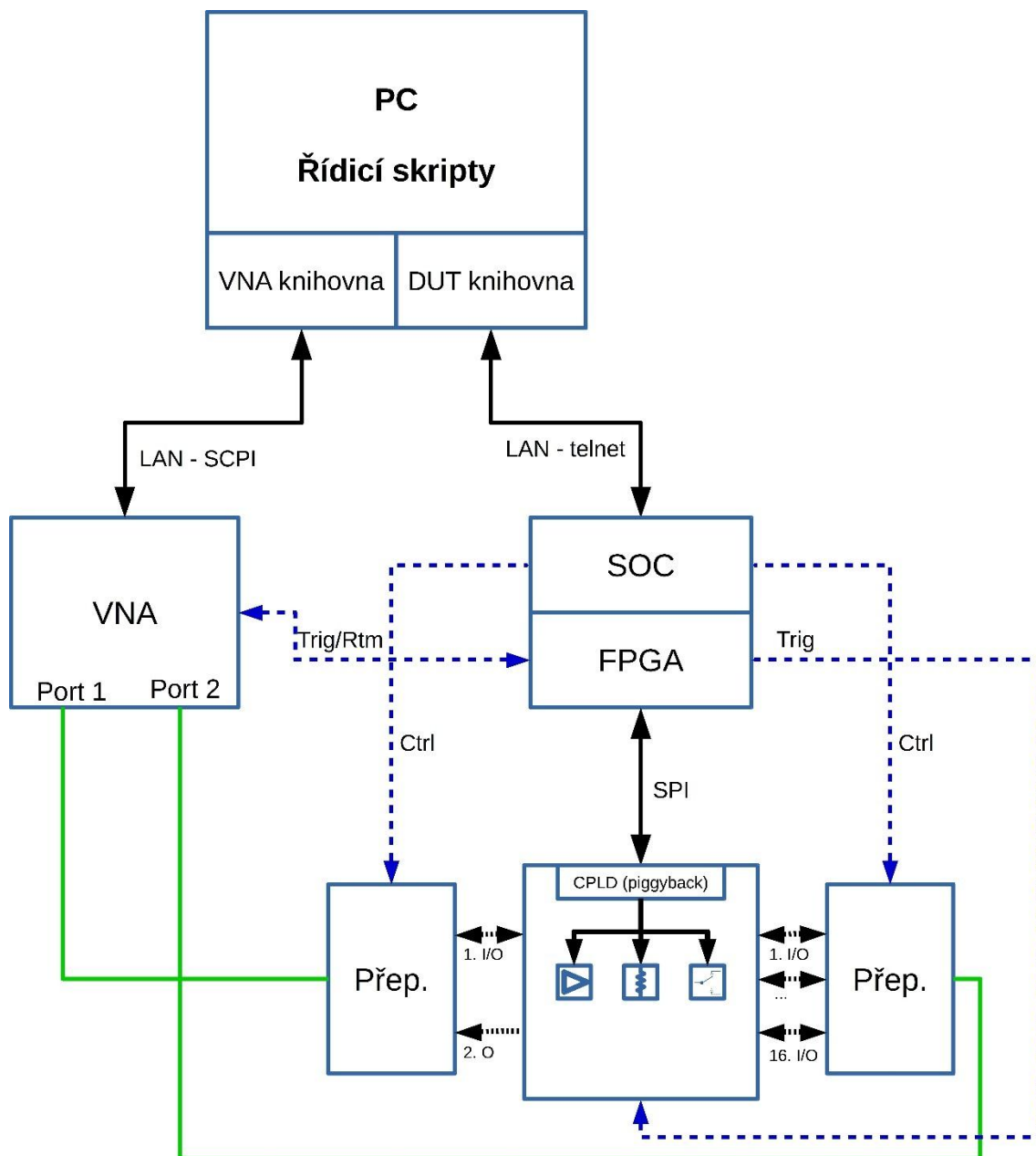
3.4 PC a řídicí knihovny

Samotné automatizované měření zajišťují knihovny programu MATLAB. Při návrhu těchto knihoven bylo zvoleno přímé ovládání přístrojů prostřednictvím protokolu TCP/IP.

Cílem první knihovny je zajištění komunikace a zapouzdření příkazů SCPI potřebných k ovládní VNA. Druhá knihovna pak realizuje tvorbu, zpracování a uložení příkazových zpráv pro řídicí modul. Obě knihovny obsahují testovací ověřující funkčnost skriptů. Autorem kódu je autor bakalářské práce.

3.5 Struktura a vazby měřicího systému

Struktura a vazby měřicího systému jsou znázorněny na obr 3.2. Ovládní automatizovaného měření je prováděno z PC, které komunikuje s měřicím přístrojem (VNA) a řídicím modulem (SoC) pomocí knihoven MATLAB přes ethernetové rozhraní. Porty VNA jsou zapojeny na porty přepínacích matic. Řídicí modul se dělí na dvě části. Operační systém tohoto modulu zajišťuje komunikaci s PC, předávání dat do registrů FPGA a ovládní přepínací matice. Část řídicí desky obsahující FPGA realizuje tvorbu a příjem synchronizačních signálů. Navíc nastavuje a vyčítá registry DUT pomocí sériové komunikační linky (SPI).



obr 3.2 Schéma systému

4 Knihovna pro ZVL-13

Pro měřicí stanoviště byl vybrán vektorový obvodový analyzátor ZVL-13 od firmy R&S. Pro návrh knihovny realizující ovládání tohoto přístroje je potřeba nejdříve přiblížit strukturu tohoto přístroje a analyzovat možnosti jeho ovládání přes LAN z prostředí MATLAB.

4.1 Ovládání ZVL-13

Pro realizaci ovládací knihovny ZVL-13 je potřeba analyzovat způsob, jakým může být tento přístroj ovládán a možnosti prostředí MATLAB dostupné pro realizaci tohoto ovládání.

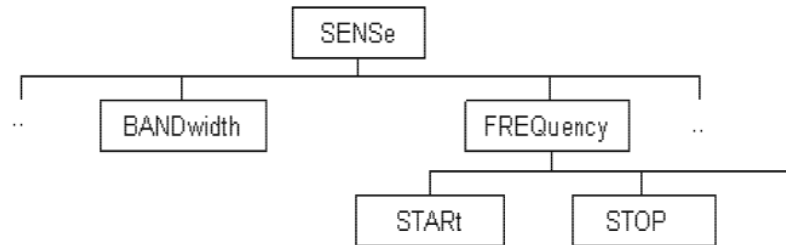
4.1.1 ZVL komunikace

Přístroj ZVL-13 je ovládán příkazy definovanými standardem SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments)[3]. Pro doručení těchto příkazů cílovému přístroji může být využita celá řada rozhraní a protokolů. Pro ovládací knihovnu vyvíjenou v rámci této práce se předpokládá komunikační rozhraní typu ethernet a příkazy odesílané z prostředí MATLAB. V dalším budou tedy uvažovány pouze možnosti toho rozhraní a vývojového prostředí.

4.1.1.1 SCPI

Pro nastavování měřicích přístrojů byl konsorciem výrobců vytvořen standard SCPI [8]. Tento standard definuje soubor textově orientovaných příkazů, které zajišťují kompatibilitu přístrojů různých výrobců. Část sady příkazů je dána funkcemi specifického typu přístroje a je tedy kompatibilní jen s přístrojem, který má identickou funkci (vertikální kompatibilita), zatímco další část funkcí je sdílena napříč více přístroji (horizontální kompatibilita). Příkazy jsou členěny do hierarchie dané možnostmi přístroje. Příklad tohoto členění lze vidět na obr 4.1. Skupina příkazů SENSE obsahuje všechny podskupiny příkazů asociované s nastavením měření. Tato hlavní skupina je dále členěna na nižší skupiny, které jsou adresovány dvojtečkou (SENSE:FREQUENCY:STOP). Příkazy jsou děleny na nastavovací a dotazovací. Dotazovací příkazy se liší od nastavovacích pouhým přidáním otazníku na konec příkazu. Příkazy mají seznam očekávaných parametrů a dají se řetězit. Kompletní popis

syntaxe tohoto standardu lze nalézt v [8]. Seznam skupin příkazů implementovaných v přístroji ZVL-13 s jejich detailním popisem lze najít v [3]. Příkazy pro specifické zařízení jsou obsaženy v řadičích dodávaných výrobcem a jsou určeny pro specifická vývojová prostředí (LabVIEW) nebo programovací jazyky (C, MVB, MATLAB).



obr 4.1 Příklad stromu SCPI kategorií [3]

4.1.1.2 VISA

Aby bylo možné poslat SCPI příkaz z ovládacího PC do přístroje, je potřeba využít komunikační rozhraní. V průběhu let se vyskytla celá řada komunikačních rozhraní, každé se svojí specifickou komunikační knihovnou. Aby se zjednodušila přenosnost programů mezi různými rozhraními, byl vytvořen IVI standard (interchangeable virtual instruments). V rámci toho standardu vznikla knihovna VISA (virtual instrument software architecture) [9], jejíž funkčnost je z velké části nezávislá na typu použitého rozhraní.

VISA knihovna je využita pro tvorbu řadičů, které se vytváří pro specifické přístroje a umožňují jejich maximální využití (kontrola chyb, synchronní operace) nezávislé na použitém rozhraní. Tyto řadiče zaobalují SCPI příkazy do funkčních volání, které vyčítají z a zapisují do cílového přístroje.[10]

4.1.2 Ovládání přístrojů z prostředí MATLAB

Firma Mathworks nabízí pro MATLAB Instrument Control Toolbox (ICT) implementující komunikaci prostřednictvím řadiče (VXI plug&play) nebo přímého textového SCPI [10] s využitím protokolů knihovny VISA. Toolbox ICT navíc zajišťuje i TCP/IP komunikaci. Tento toolbox není u budoucího uživatele k dispozici. Vzhledem k jednoduchosti přímého ovládání pomocí SCPI by byl pro řešený měřicí systém přínos ICT omezený.

Jednou možností, jak se vyhnout použití ICT, je přímý přístup ke knihovněm řadiče. To je možné využitím funkce MATLAB prostředí, `calllib`, a je popsáno v [10]. Tato možnost ale předpokládá využití Windows OS. Jelikož cílová platforma je Linux, není možné tento přístup využít.

Jedinou možností pak zůstává tvorba vlastní knihovny zaobalující SCPI příkazy pro ZVL-13. Pro komunikaci TCP/IP jsou možné dva alternativní přístupy, použití systémového příkazu `netcat`, nebo toolboxu PNET, volně dostupného v rámci FileExchange programu MathWorks [11].

4.1.3 Hierarchie nastavení

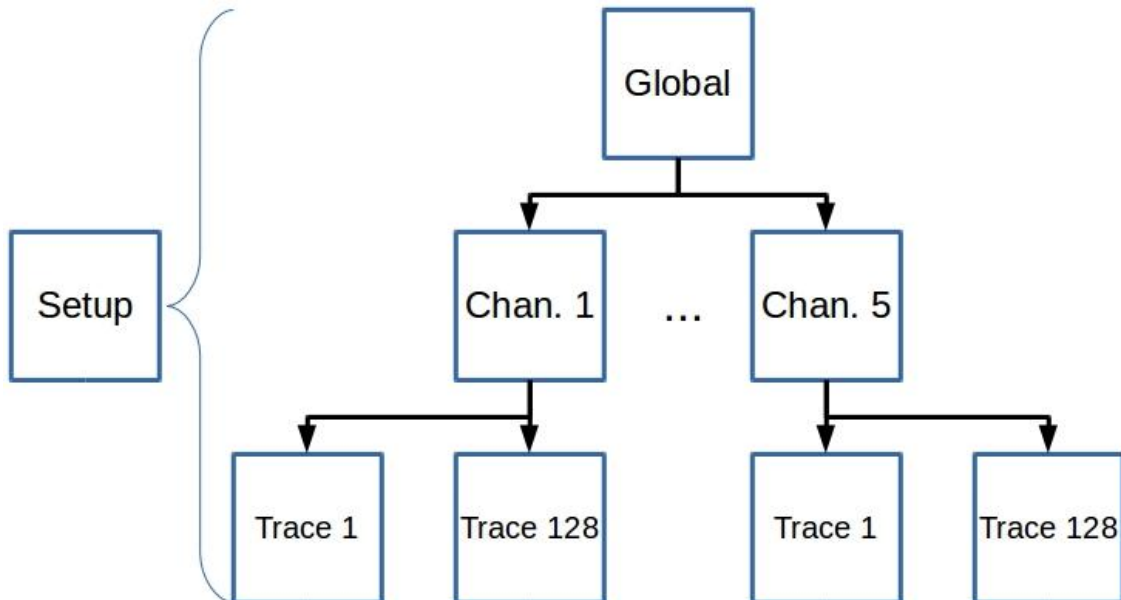
Dokumentace přístroje ZVL-13 [3] udává, že nastavení měření probíhá ve třech úrovních, které lze ilustrovat na obr. 4.2. První úroveň jsou obecná nastavení (setup) přístroje a týkají se hlavně výchozích stavů po restartu přístroje.

Druhou úrovní jsou jednotlivé kanály (channel). Kanály obsahují všechna nastavení spojená s hardwarovou stránkou měření – určují jakým způsobem budou získávána data. Sem patří například nastavení frekvenčního rozsahu měření, provedení a aplikace kalibrací, či spouštění měření. Pojem aktivní kanál značí kanál, jehož stopa (trace) je aktivní. Takový kanál může být v přímém ovládní pouze jeden. Tento koncept neplatí při vzdáleném ovládní, kde každý kanál má svou aktivní stopu. Ve vzdáleném ovládní je navíc možné vytvořit samotný kanál bez jakékoliv stopy.

Třetí úrovní je stopa, která slouží k uložení naměřených dat. Každá stopa je přiřazena určitému kanálu a všechna nastavení kanálu jsou aplikována i na stopu. Stopy umožňují provádět různé matematické operace na získaných datech. V přímém ovládní je vždy pouze jedna aktivní stopa, což znamená, že změny prováděné v nastavení stop jsou aplikovány pouze na tuto aktivní stopu. Ve vzdáleném ovládní má každý kanál svou aktivní stopu. Aktivní stopa se v tomto módu dá vybrat příkazem a při adresaci kanálu jsou žádané operace prováděny na ní.

Kanály, stopy a diagramy (grafické prvky VNA) jsou uloženy do nastavovacích souborů (s příponou `.nwa`), které se dají ukládat a načítat dle potřeby, a umožňují tak rychlou rekonfiguraci měření. V jedné chvíli může mít přístroj načteno více nastavovacích souborů a může mezi nimi rychle přepínat. V případě lokálních měření každé nastavení obsahuje diagramy naměřených dat (konfigurace jejich zobrazení).

Diagramy mají různé typy zobrazení (Smithův, kartézský, či polární diagram). Do těchto oken mohou být přidány stopy z libovolného kanálu. Diagramy jsou potřeba jen v případě, že chceme v průběhu měření vizualizovat výsledky na obrazovce VNA.



obr 4.2 Vnitřní hierarchie ZVL-13 VNA

Když se přístroj přepne do módu vzdáleného ovládání, dojde k přepnutí obrazovky do indikace režimu vzdáleného ovládání. Tuto indikaci je možné lokálně vypnout a pozorovat průběh měření (za předpokladu že při vzdáleném ovládání přidáváme měřené stop do diagramů.), případně přejít do režimu ručního ovládání.

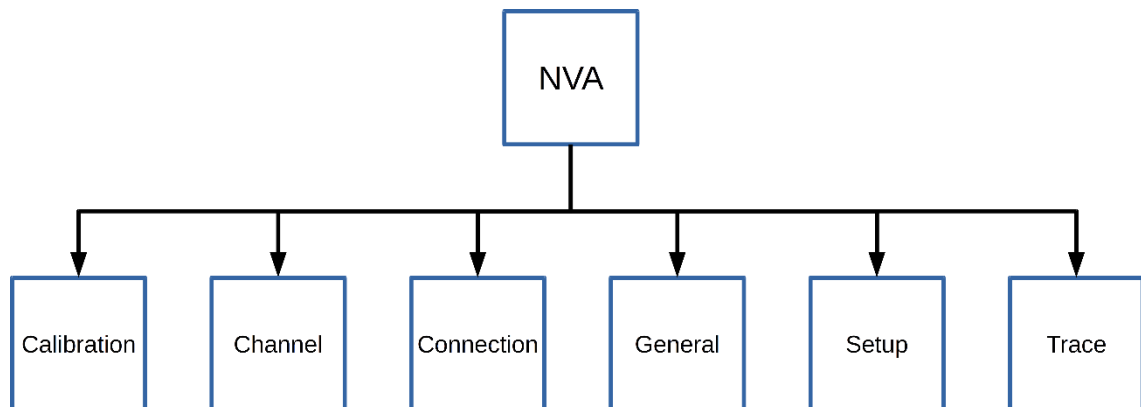
Signál připraven k měření (ready to measure) je u ZVL-13 jediný způsob, jak signalizovat připravenost k měření pomocí logické signálu. K vyslání signálu dojde při přepnutí přístroje z průběžného měření na spouštěné měření [3].

4.2 Knihovna pro ovládání ZVL-13

Při návrhu knihovny byl brán ohled na hierarchii přístroje tak, jak je popsána v kapitole 4.1.3. Navíc byla přidána sada funkcí využívajících knihovny PNET k zajištění odesílání a příjmu TCP komunikace. Cílem této knihovny není replikace všech možných příkazů vzdáleného ovládání. Realizuje pouze funkce potřebné pro daná měření. V budoucnosti je možné knihovnu dále rozšiřovat.

4.2.1 Popis objektu NVA

V této podkapitole je obsažen popis jednotlivých objektů z obr 4.3. Pro knihovnu bylo využito objektových programovacích přístupů dostupných v prostředí MATLAB. Toto řešení umožňuje udržování dat (informace o připojení, získaná data) i funkcí v rámci jediného, hierarchicky členěného objektu. Jména tříd začínají pojmem NVA, což je synonymum pro VNA.



obr 4.3 Hierarchie NVA objektu

Každý objekt obsahuje metody a proměnné specifické pro oblast, která je určena jejich názvem (např.: objekt kalibrace obsahuje všechny implementované způsoby nastavení, provedení a vyčtení kalibračních hodnot).

Třída NVA

Třída sdružuje a vytváří instance ostatních tříd. Na rozdíl od ostatních tříd je implementována jako ukazatel, což umožňuje jednodušší práci s tímto objektem (není potřeba vždy vracet změněný objekt do původního). Dále otvírá připojení k přístroji a může identifikovat, případně restartovat přístroj.

Třída Připojení (Connection)

Tato třída implementuje funkce toolboxu PNET. Pro komunikaci jsou určeny dvě funkce, rozlišující mezi typem příkazu. Pokud se jedná o nastavovací příkaz, zajistí funkce jeho odeslání a vyčtení chybového registru přístroje. Pokud jde o dotaz, zajistí funkce odeslání příkazu, vyčtení přijaté zprávy a vyčtení chybového registru přístroje. Také obsahuje podpůrné funkce umožňující obnovení spojení a nastavení maximální doby čekání na odezvu. Tento objekt je využíván ostatními objekty ke komunikaci s přístrojem.

Třída Kalibrace (Calibration)

Tato třída obsahuje všechny možnosti provádění kalibrací. Jde hlavně o výběr typu kalibrace, spuštění kalibrace, aktivaci kalibrace a vyčítání kalibračních hodnot.

Třída Kanál (Channel)

Tato třída obsahuje data a metody spojené s nastavením hardwaru VNA. Jde o nejobsáhlejší třídu, která obsahuje tři podskupiny funkcí. První skupinou jsou funkce zajišťující tvorbu, mazání, výpis a výběr aktivního kanálu. Druhou skupinou jsou funkce nastavující parametry měření (sweep). Může se zde nastavit typ, počet či zdroj spouštění měření. Také je možné nastavit celkový počet měřených bodů. Poslední, třetí skupina umožňuje nastavení frekvenčního rozsahu generátoru.

Třída Nastavení (Setup)

V této třídě jsou obsaženy funkce spojené s ukládáním, načítáním a operacemi nad aktivními nastavovacími soubory.

Třída Stopy (Trace)

V této třídě se nacházejí funkce umožňující přidávání, mazání, vyčítání dat či vybírání aktivní stopy.

Třída Obecných nastavení (General)

Primárním účelem této třídy je spouštění měření a měnění způsobu měření. Je zde možné určit, zda se měření provádí kontinuálně, nebo diskrétně a pro které kanály.

4.3 Zkušební měření VNA

Pro navrženou knihovnu byl vytvořen postup ověření její funkčnosti popsany v následujících podkapitolách.

4.3.1 Cíl měření

Pro ověření funkčnosti knihovny bylo vybráno měření přenosu mikrovlnného děliče 1 na 2. Cílem bylo získání amplitudy přenosů S_{12} a S_{21} . Za tímto účelem bylo potřeba nejdříve provést kalibraci typu normalizace přenosu v obou směrech (Two Port Normalization in both directions) na frekvenčním rozsahu 9 GHz až 9,1 GHz. K provedení této kalibrace byl potřeba pouze jeden kalibrační standard typu přímé propojení. Pro první měření děliče byla kalibrace vypnuta a pro druhé již byla zapnuta. Očekávaným výsledkem měření jsou hodnoty blízko -3 dB (odpovídá polovině

vstupního výkonu) a další zmenšení hodnoty je důsledkem vložných ztrát. Protože je měřený obvod reciproký, musí být přenos stejný v obou směrech. Nezapojený port děliče je zakončen přizpůsobenou zátěží.

4.3.2 Postup měření

Měření bylo realizované skriptem `test_ovladani_ZVL.m` a realizoval následující postup.

Kontrola připojení přístroje

Vytvoření kanálu a nastavení parametrů

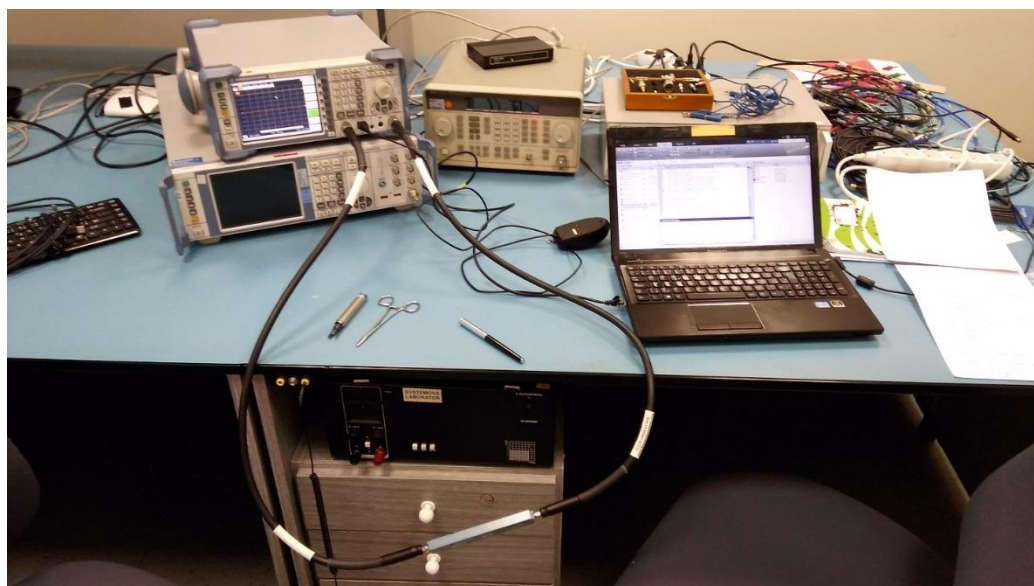
- Nastavení Single Sweep
- Vytvořit nový měřicí kanál
- Frekvenční rozsah 9-9,1GHz
- Počet frekvenčních bodů: 101
- Výkon zdroje defaultní (-10 dBm/0,1 mW)
- Vytvořit trace pro S_{12} a S_{21}
- Připojení kalibračního standartu
- Provedení kalibrace
- Vybrat metodu kalibrace FRTR
- Spustit kalibraci
- Získat korekční vektor
- Provedení měření
- Připojit dělič
- Vypnout korekce
- Spustit jedno měření
- Vyčíst nekompensovaná data pro S_{12} a S_{21}
- Zapnout korekce
- Spustit měření
- Vyčíst kompenzovaná data pro S_{12} a S_{21}

4.3.3 Použité přístroje a podmínky

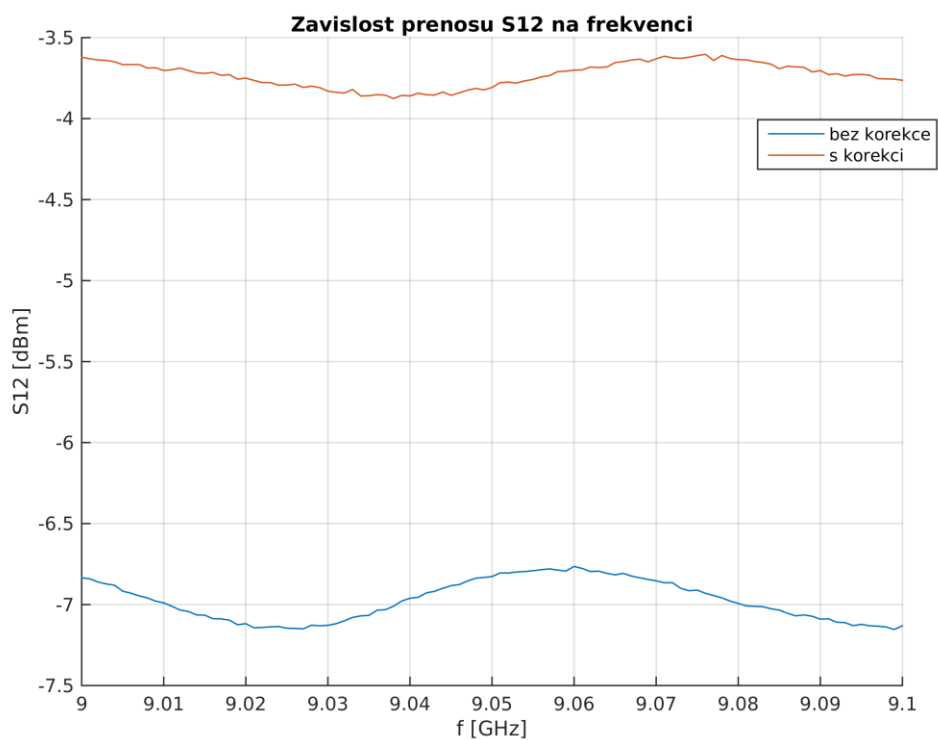
Čas měření: 28.4.2017 15:20

Teplota: 21.2 °C

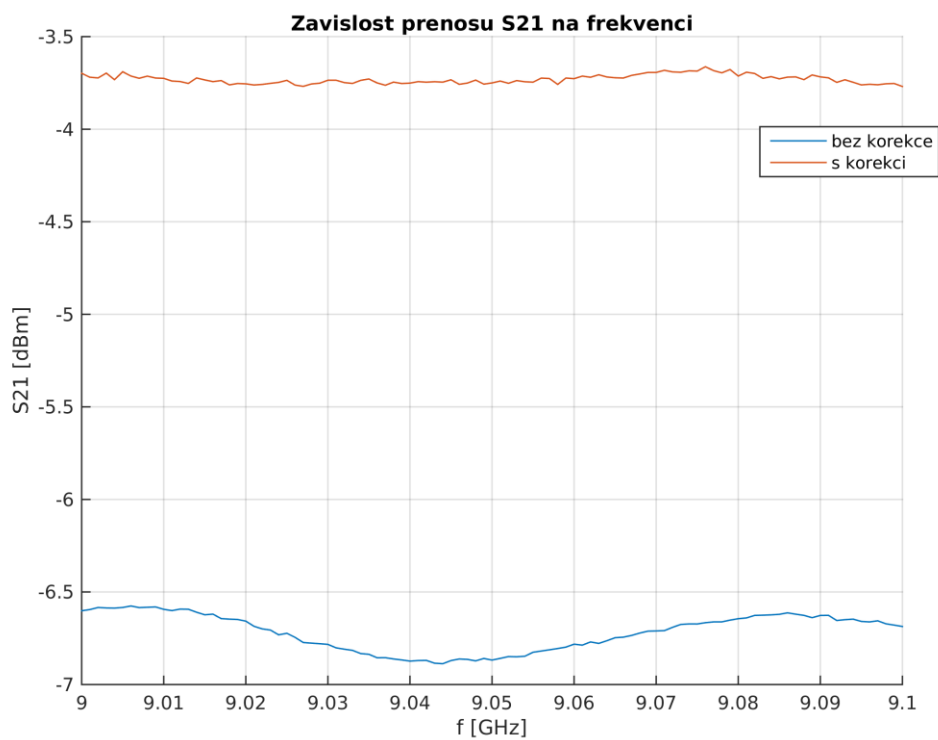
Přístroj	S.Č.
Dvoucestný mikrovlnný dělič Narda 4426-2, 50Ω	05053
VNA ZVL-13	100842
Kalibrační standard 50Ω THROUGH male	-



obr 4.4 Fotografie sestavy měření



obr 4.5 Naměřené hodnoty parametru S_{12}



obr 4.6 Naměřené hodnoty parametru S_{21}

4.3.4 Dílčí závěr

Na základě měření byla provedena optimalizace implementace knihovny. Ve výchozí implementaci byla pro vyčítání dat použita funkce, která blokovala běh celého skriptu po definovanou dobu čekání na odpověď přístroje a vyčetla přijatá data až po jejím uplynutí. Toto čekání bylo eliminováno použitím funkce, která umožňuje vyčítání z vyrovnávací paměti ve chvíli, kdy je dostupný jeden celý řádek (funkce `pnnet` s argumentem `readline`).

Získaná data vynesena v grafech obr 4.5 a obr 4.6 odpovídají předpokladům (výsledkům ručně provedených měření). Zvlnění přenosu je způsobeno nepřizpůsobením měřeného děliče.

5 Knihovna pro ovládání modulu a DUT

Příkazy pro DUT vydané z prostředí MATLAB jsou zpracovány programovým vybavením implementovaným na řídicí desce v části SoC (ARM s Ångström distribucí Linuxu). Zmíněné programové vybavení bylo poskytnuto a bylo v rámci práce pouze využito.

5.1 Ovládání řídicího modulu

Příkazy jsou zasílány pomocí protokolu telnet. Zprávy přijaté programovým vybavením na řídicí desce jsou vyhodnoceny, a dojde k odeslání řídicí zprávy do DUT. Příjem zprávy je potvrzován. Řídicí modul také může inicializovat komunikaci s PC sám, například z důvodu výskytu chyby.

Jelikož nastavování DUT je zapouzdřeno funkcemi existujícího programového vybavení řídicí desky, je potřeba řešit pouze vytvoření, odeslání, příjem a zpracování zpráv přenášených přes telnet protokol. Pro tento účel byla vytvořena sada funkcí schopných zpracovat nebo vytvořit libovolnou zprávu. Druh zprávy, počet a typ parametrů se liší dle nastavovaného parametru DUT. Obecný tvar příchozí a odchozí zprávy předpokládaný existujícím programovým vybavením řídicí desky je naznačen dále.

Formát příkazu

```
``!drmtrm x x arg1 {val1 val2} &``
```

Formát žádané odpovědi

```
``#drmtrm x x arg1 {val1 val2} &``
```

Formát asynchronní stavové zprávy

```
``*drmtrm x x arg1 {val1 val2} &``
```

5.1.1 Telnet komunikace

Při vývoji nástrojů komunikace mezi prostředím MATLAB a řídicím modulem nebylo již možné využít část komunikační knihovny PNET zajišťující příjem zpráv. Příchozí komunikace obsahuje na rozdíl od komunikace s měřicím přístrojem asynchronní zprávy. Z tohoto důvodu byl vytvořen lokální server ukládající příchozí zprávy do logu a jejich vyhodnocení probíhá z tohoto logu.

Lokální server využívá systémových funkcí operačního systému Linux, konkrétně funkce `netcat`. Tato funkce je schopna nejen odesílání zpráv, ale také je schopna fungovat jako dlouhodobě naslouchající server (tato možnost nemusí být pro některé verze dostupná). Přijaté zprávy jsou přeměrovány do logovacího souboru.

Logovací skript

Tento skript `start_listen.sh` obstarává spuštění naslouchajícího serveru na telnetovém portu. Jeho volání z prostředí MATLAB je prováděno za pomoci funkce `system`, která umožňuje volání systémových funkcí. Při volání očekává tento skript název souboru, do kterého budou ukládány záznamy komunikace. Prvním krokem po zavolání skriptu z programu MATLAB je kontrola existence již naslouchajícího serveru a jeho případné ukončení. V dalším kroku kontroluje logovací soubor a pokud nedojde k chybě začne kontinuálně monitorovat příchozí zprávy.

Pro vyčítání z logovacího souboru je vytvořena speciální funkce `searchLog.m`, která prohledává soubor na základě časové značky. Pro příkaz očekávající odpověď je tedy soubor prohledáván od doby, kdy došlo k odeslání.

5.1.2 Funkce tvorby a zpracování zpráv v MATLAB

Přijatou zprávu je potřeba zpracovat a uložit do lehce modifikovatelné struktury, která navíc umožní převod dat zpět do tvaru zprávy. Za tímto účelem byly vyvinuty následující skripty.

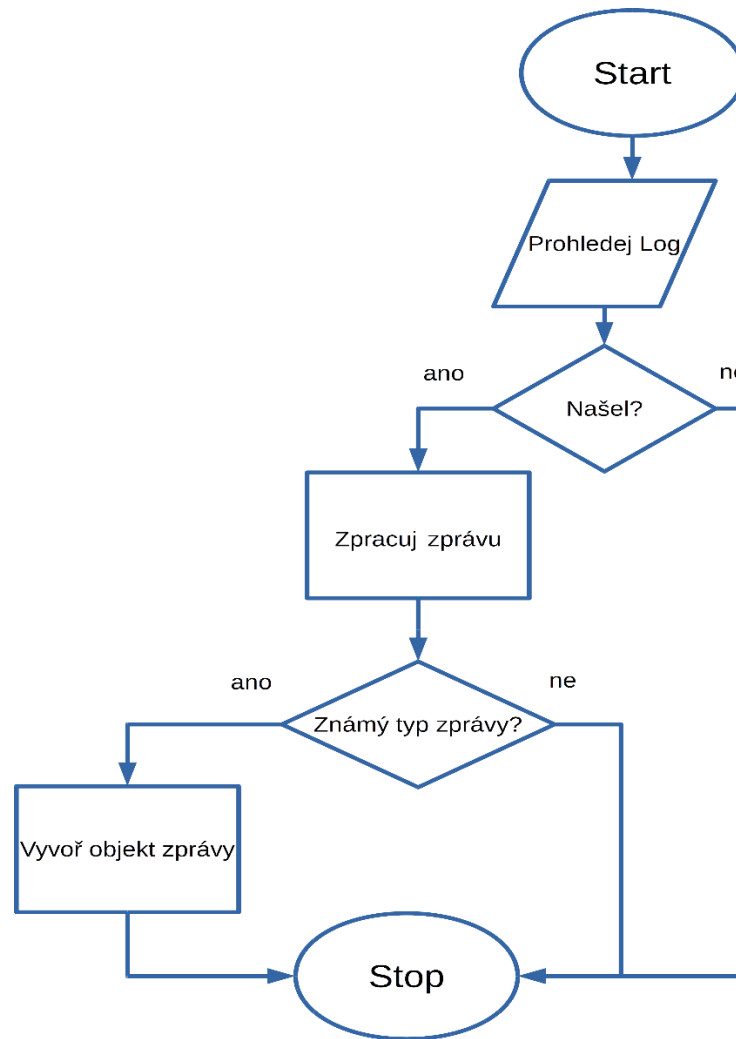
Skript pro zpracování zpráv

Pro zpracování přijaté zprávy byl vytvořen skript `msgParser.m`. Tento skript očekává argument ve formě přijaté zprávy, kterou následně převede do obecné struktury. Tento převod probíhá pomocí regulárních výrazů vyhledávajících specifické symboly přítomné ve všech typech zpráv. Tato struktura se pak dále zpracovává pomocí konstruktorů tříd specifických pro typ zprávy.

Třídy pro jednotlivé typy zpráv

Každý typ zprávy má svoji třídu, jejíž konstruktor buď inicializuje prázdný objekt, nebo zpracovává strukturu vytvořenou skriptem pro zpracování zpráv (`msgParser.m`). Třída je schopna na základě vstupních či uložených dat generovat potřebnou zprávu ve tvaru posloupnosti charakterů. Příkladem třídy je například

FE_CC.m, která obsahuje nastavení frontendu. Některé parametry zpráv přicházející hexadecimálním formátu bylo potřeba přetvořit na bitovou reprezentaci těchto čísel. Pro tento účel byly vytvořeny funkce hex2log.m a log2hex.m jejichž funkcí je provést konverzi z hexadecimálního tvaru na logický vektor reprezentující hodnotu čísla v binárním tvaru.



obr 5.1 Zjednodušený diagram zpracování zprávy

5.1.3 Test funkcí pro ovládání přípravku

Pro ověření funkčnosti této knihovny byl navrhnout testovací skript test_parseru_DUT.m. Jeho cílem je spustit server, vyslat testovací zprávu, zprávu najít v logu, zpracovat ji a vytvořit objekt odpovídající třídy.

5.2 Ovládání přepínačů a synchronizační signály

Dalším krokem návrhu je softwarové vybavení potřebné k ovládání přepínačů přepínací matice a generování synchronizačních signálů měření (spínací signál VNA a řídicí impuls DUT). Tyto signály jsou generovány v FPGA části řídicího modulu. Pro řídicí impuls je potřeba zajistit nastavitelnost periody i délky pulzu. Minimální délka pulzu se pohybuje kolem hodnoty 10 ns.

Všechny signály používané k synchronizaci měření jsou vyvedeny na GPIO piny vývojové desky napojené na FPGA. Vývoj konfigurace FPGA probíhal v programu Quartus Prime 16.1 v souboru `meas_control.vhd`. Vstupními informacemi pro vyvinutou komponentu jsou hodnoty uložené v registru, jehož vyčítání probíhá pomocí dodané komponenty dekodéru. Vyvinutá komponenta průběžně zpracovává tyto registrové hodnoty a realizuje potřebné operace. Vyvinutá komponenta byla integrována do celkového designu FPGA, přeložena a ověřena osciloskopem.

Ovládání spínačů a spouštění měření VNA

Ovládání spínačů je realizováno přímou vazbou bitů uložených v 32 bitovém registru na výstupní GPIO pin. Spouštění měření je prováděno podobným způsobem. Signál přístroje VNA, který by měl být přítomen na jeho AUX portu ve chvíli, kdy je přepnut do módu jednorázového měření, nebyl detekován. Z tohoto důvodu jej nelze použít pro synchronizaci, a spouštění měření bude muset probíhat na povel ovládacího skriptu (na úrovni FPGA chybí informace o stavu VNA).

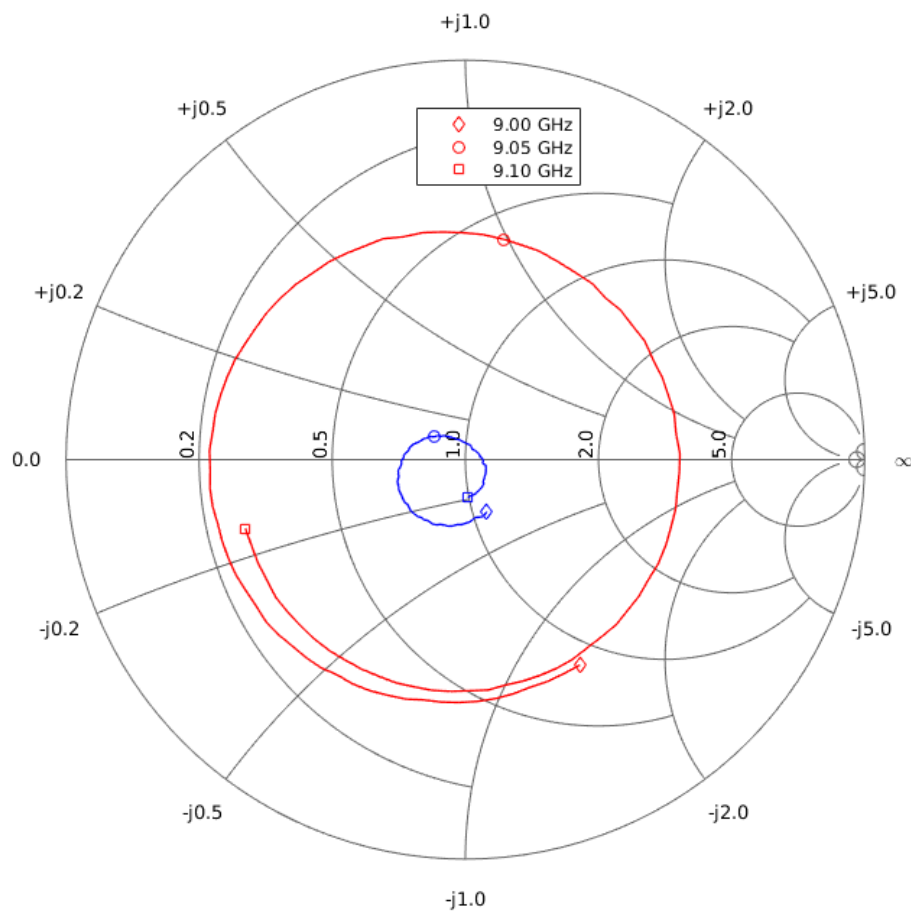
Generování řídicího impulsu

Řídicí impuls pro DUT je generován na základě dvou hodnot uložených v 32 bitových registrech, které vyjadřují délku pulzu a jeho periodu. Požadovanou minimální délku pulzu 10 ns nelze pomocí základních 50 MHz hodin zajistit. Pro získání vyšší frekvence (100 MHz) byl využit jeden z pěti dostupných PLL (phase locked loop) obvodů. V procesu, který monitoruje nově vzniklé rychlejší hodiny, je využito jediného čítače pro realizaci pulzů. Hodnota čítače je nulována ve chvíli, kdy je některá z hodnot registru změněna, nebo pokud čítač dosáhne hodnoty délky periody, jinak se jeho hodnota inkrementuje dál. Pulz je generován v rozmezí od nuly do hodnoty zapsané v registru.

Ověření těchto funkcí bylo provedeno pomocí osciloskopu a simulace. Výsledek simulace generování pulzu pomocí nástroje Signal Tap lze nalézt na příloženém CD ve složce VHDL (snímek okna a textový soubor obsahující data).

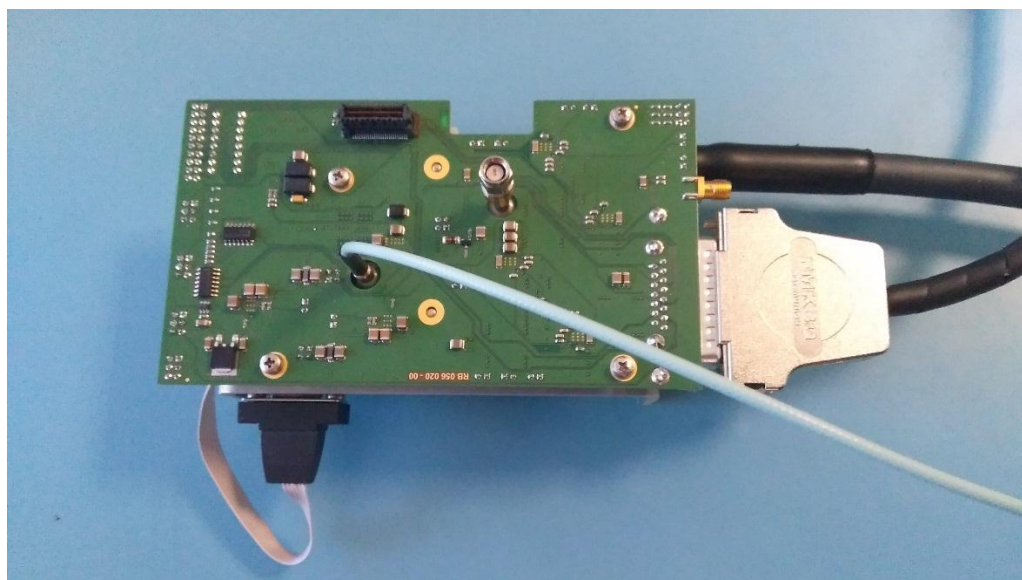
5.2.1 Ověření ovládání přepínače

Ověření ovládání přepínače bylo provedeno na části backendové přepínací matice s jedním přepínačem 1 na 2. Na společný port přepínače byl zapojen port VNA, na jedné z cest přepínače byl připojen kabel na druhý výstup VNA (Thru), a druhá z cest zůstala nezapojená (konektor SMA-M, nedokonalý otevřený konec). Tuto konfiguraci lze vidět na obr 5.3 a její detail na obr 5.4. Měření VNA bylo spouštěno s časovým odstupem jedné vteřiny po přepnutí přepínače. Byly změřeny všechny čtyři přenosové parametry. Koeficienty odrazu byly vyneseny do Smithova diagramu na obr 5.2.

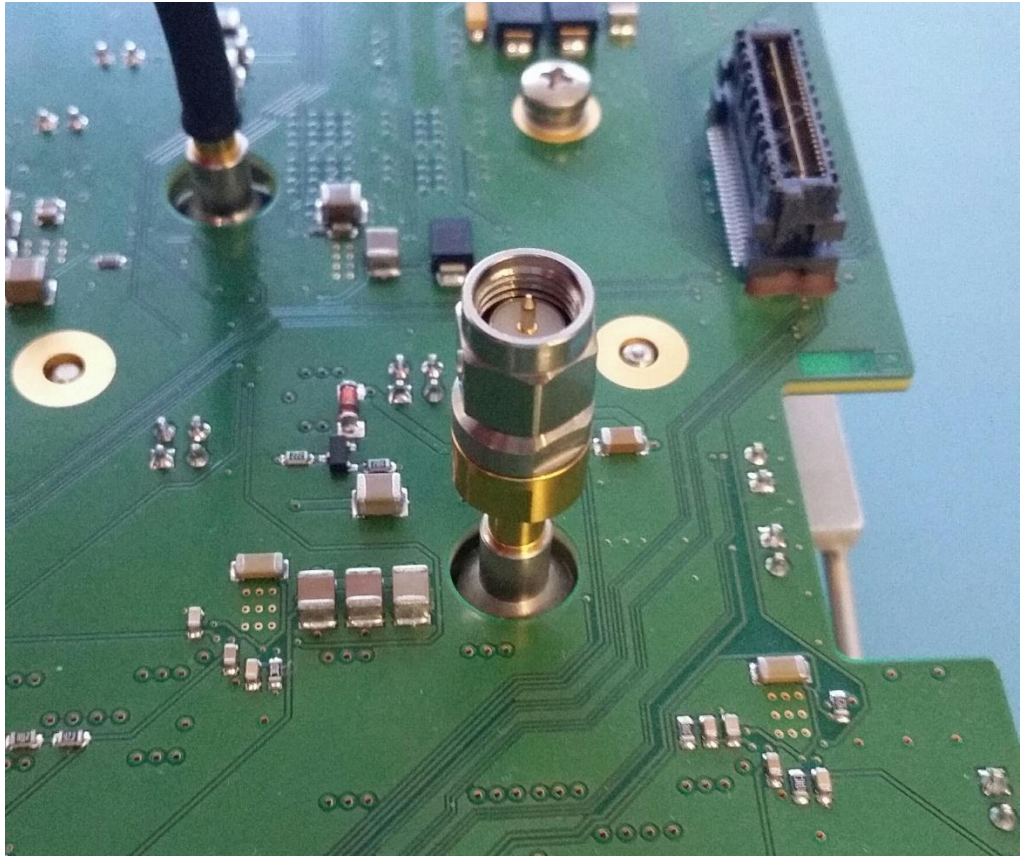


obr 5.2 Smithův diagram koeficientů odrazu v závislosti na frekvenci

. Hodnoty vynesené v grafu červeně odpovídají chování nezapojené cesty. Hodnoty vynesené barvou modrou odpovídají chování propojené cesty. Na vynesných charakteristikách se nevyskytuje vliv přechodového děje spínače, proto se dá měření označit za úspěšné. Naměřená data a skripty pro měření a vyhodnocení lze nalézt na příloženém CD ve složce Knihovna VNA.



obr 5.3 Přepínací matice



obr 5.4 Přepínací matice – detail otevřeného konce

6 Ověření funkce měřicího systému

Funkce realizovaného měřicího systému byla ověřena pouze po jednotlivých částech (ovládání VNA, funkce přepínačů ...), tak jak bylo popsáno v přechozích oddílech. Ověření funkce celého měřicího systému měřením DUT nebylo možné, protože funkční DUT nebylo v době dokončování bakalářské práce k dispozici.

V prototypu měřeného bloku (DUT) došlo k závadě banky vstupně výstupních pinů hradlového pole FPGA použitých pro ovládání obvodu řízení fáze a útlumu (vývoj DUT není předmětem práce, autor práce nebyl se nepodílel na poškozením hradlového pole). Oprava poškozeného obvodu realizovaná výměnou hradlového pole v pouzdře BGA nebyla při odevzdání práce dokončena.

Před odesláním DUT na výměnu hradlového pole byla ověřena funkčnost ovládání DUT algoritmy řídicího počítače kontrolou stavových veličin v hradlovém poli DUT. Funkce ovládání mikrovlnných přepínačů byla ověřena na jednom (jediném dostupném) přepínači 1 na 2. Dodání ostatních potřebných přepínačů je o několik týdnů opožděno.

Generování synchronizačních signálů bylo ověřeno simulací v návrhovém systému FPGA a následně osciloskopem.

Provedený rozsah testů ověřuje funkčnost jednotlivých částí realizovaného měřicího systému i systému jako celku (ověření vazeb mezi jednotlivými částmi) . Po dodání chybějících přepínačů a opravě prototypu DUT není důvod předpokládat vážné potíže bránící využití měřicího systému.

7 Závěr

Cílem této bakalářské práce byl návrh a realizace částí automatizovaného měřicího systému určeného k měření mikrovlnného n-branu.

Koncept měřicího systému byl popsán v rámci kapitoly 3. V této kapitole byl čtenář seznámen s jednotlivými prvky systému a byl objasněn rozsah práce i dostupné přístrojové a programové vybavení. Prvky měřicího systému a jejich vzájemné vazby jsou názorně popsány na obr 3.2.

Jediným měřicím přístrojem využitým v měřicím systému byl vektorový obvody analyzátor ovládaný z prostředí MATLAB. Tvorba knihovny určené pro ovládání tohoto přístroje byla náplní kapitoly 4. Po vyloučení možnosti využití knihovny VISA a zjištění, že neexistují alternativy umožňující ovládání přístroje ZVL-13 v daném prostředí, bylo přistoupeno k tvorbě vlastní knihovny funkcí. Tato knihovna byla modelována dle hierarchie funkcí přístroje a implementována objektově. Knihovna obsahuje funkce nezbytné pro provedení potřebných měření. Její funkčnost byla ověřena měřením přenosů mikrovlnného děliče v rámci kapitoly 4.3.

Tvorba knihovny pro ovládání řídicího modulu byla popsána v kapitole 5.1 a zajišťuje tvorbu, zpracování a ukládání sady příkazů jimiž je modul ovládán. Pro zpracování zpráv byl vytvořen univerzální parsovací skript. Výstup z tohoto skriptu je dále zpracován ve specializovaných třídách, které umožňují snadnou manipulaci se získanými daty. Pro zachycení příchozích zpráv byla vytvořena spustitelná shellová dávka zapisující příchozí zprávy do souboru záznamů. Pro prohledávání souboru byl vytvořen skript vyhledávající odpovědi dle časové značky. Funkce této knihovny byla úspěšně ověřena pomocí testovacího skriptu.

Z důvodů nefunkčnosti DUT a absence větší části prepínací matice v době tvorby práce nebylo možné vytvořit skript realizující automatizované měření. Detailní popis problémů je proveden v kapitole 6. Nejedná se však o zásadní problém, protože skripty vytvořené pro ověření funkčnosti jednotlivých modulů implementují většinu požadované funkcionality (provedení měření a vizualizaci výsledků).

Pro hradlové pole byla vytvořena komponenta v jazyce VHDL. Tato komponenta realizuje generování spínacího signálu pro přístroj VNA a řídicí impulzy pro DUT.

Tvorba této komponenty byla předmětem kapitoly 5.2. Původní koncept ovládání přepínačů pomocí programového vybavení procesoru byl opuštěn pro jednoduchost implementace tohoto ovládání v FPGA.

8 Literatura

- [1] HOFFMANN, Karel, Přemysl HUDEC, ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE a ELEKTROTECHNICKÁ FAKULTA. *Vysokofrekvenční a mikrovlnná měření*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 978-80-01-03442-2.
- [2] NATIONAL INSTRUMENTS. *Introduction to Network Analyzer Measurements* [online]. Texas: National Instruments, 2016 [vid. 2016-11-19]. Dostupné z: http://download.ni.com/evaluation/rf/Introduction_to_Network_Analyzer_Measurements.pdf
- [3] ROHDE & SCHWARZ GMBH & CO. KG. *R&S ZVL Operating Manual* [online]. B.m.: Rohde & Schwarz. 2015 [vid. 2017-03-23]. Dostupné z: https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuels/gb_1/z/zvl_1/ZVL_Operating_en_09.pdf
- [4] AGILENT TECHNOLOGIES, INC. Agilent Network analyzer basics. In: [online]. USA. 2004 [vid. 2017-01-19]. Dostupné z: <http://anlage.umd.edu/Microwave%20Measurements%20for%20Personal%20Web%20Site/Agilent%20NWA%20Basics%205965-7917E.pdf>
- [5] ANRITSU. *The Essentials of Vector Network Analysis*. 1. Texas: Anritsu, 2009.
- [6] HIEBEL, Michael. *Fundamentals of vector network analysis*. 7. ed. München: Rohde & Schwarz, 2016. ISBN 978-3-939837-06-0.
- [7] TERIC. *DE0-Nano-SoC User Manual* [online]. B.m.: TerasIC. leden 2015 [vid. 2017-04-10]. Dostupné z: http://www.terasic.com.tw/attachment/archive/941/DE0-Nano-SoC_User_manual.pdf
- [8] SCPI CONSORTIUM. *SCPI-99* [online]. 1999 [vid. 2017-03-16]. Dostupné z: <http://www.ivifoundation.org/docs/scpi-99.pdf>
- [9] IVI FOUNDATION. *The VISA Library Specification* [online]. [vid. 2017-05-16]. Dostupné z: http://www.ivifoundation.org/docs/vpp43_2016-02-26.pdf
- [10] ROHDE & SCHWARZ GMBH & CO. KG. *How to Use Rohde & Schwarz Instruments in MATLAB®* [online]. [vid. 2017-03-05]. Dostupné z: https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma171/1MA171_10e_Instruments_in_MATLAB.pdf
- [11] PETER, Rydesäter. *TCP/UDP/IP Toolbox 2.0.6 - File Exchange - MATLAB Central* [online]. [vid. 2017-02-05]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/345-tcp-udp-ip-toolbox-2-0-6>

Seznam příloh

CD/DVD

1. Knihovna NVA
2. Knihovna ovladani DUT
3. VHDL
4. Bakalářská práce