

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra mikroelektroniky

Reflektometr v časové oblasti

Bc. Petr Polášek

Vedoucí: Ing. Viktor Adler, Ph.D.

Obor: Elektronika a komunikace

Studijní program: Elektronika

Listopad 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Polášek** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **435028**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Studijní obor: **Elektronika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Reflektometr v časové oblasti

Název diplomové práce anglicky:

Time-Domain Reflectometer

Pokyny pro vypracování:

Prostudujte problematiku časové reflektometrie a navrhnete schéma zapojení a zkonstruuje samostatně fungující měřicí zařízení pracující na principu časové reflektometrie (TDR, Time-Domain Reflectometry) a využijte techniku vzorkování v ekvivalentním čase. Jako budící signál měřeného obvodu použijte obdélníkový signál, u něhož se snažte dosáhnout co nejkratší náběžné hrany. Implementujte zpracování změřených vzorků tak, aby se dala určit poloha a typ diskontinuity na měřeném vedení. Dále implementujte kalibrační metodu využívající předem známé vlastnosti vhodných mechanických kalibrů.

Konzultant: prof. Ing. Karel Hoffmann, CSc.

Seznam doporučené literatury:

Ndagijimana Fabien, Signal Integrity: From High-Speed to Radiofrequency Applications, J.Wiley & Sons, New York, 2014
Cataldo Andrea, De Benedetto Egidio, Cannazza Giuseppe, Broadband Reflectometry for Enhanced Diagnostics and Monitoring Applications, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011
Fabien Ndagijimana, Signal Integrity: From High-speed to Radiofrequency Applications, J. Wiley&Sons, New York, 2014

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Viktor Adler, Ph.D., katedra elektromagnetického pole FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **04.10.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**

Ing. Viktor Adler, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji svým rodičům i celé rodině, že mi byli oporou po celou dobu mého studia.

Děkuji Ing. Viktoru Adlerovi, PhD. a prof. Ing. Karlu Hoffmannovi, CSc. za umožnění přístupu k mikrovlnné měřicí technice a možnost konzultování detailů této práce.

Děkuji Ing. Viktoru Adlerovi za významnou pomoc při analýze vysokofrekvenčních parametrů substrátu použitého pro plošný spoj reflektometru.

Děkuji také studentskému klubu Silicon Hill a projektu „MacGyver - Bastlíři SH“ za umožnění přístupu k měřicímu vybavení.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem č. 1/2009 o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze, 9. listopadu 2019

.....
Bc. Petr Polášek

Abstrakt

Tato práce se zabývá konstrukcí reflektometru v časové doméně, výsledkem je funkční zařízení s ovládacím softwarem. Cílem bylo vyvinout zařízení pro měření odrazů na vedení schopné detekce závad na vedení s přesností detekce polohy závady v řádu jednotek centimetrů. Důraz byl kladen na co nejmenší cenu výsledného zařízení a zároveň co nejjednodušší konstrukci, ovšem se snahou, aby tato kritéria neomezovala použitelnost či funkčnost zařízení.

Výsledné zařízení dokáže měřit ve frekvenčním rozsahu do řádu jednotek GHz, vzorkovací krok měření je 20 ps, ekvivalentní vzorkovací kmitočet je tedy 50 GSa.s^{-1} . Tento vzorkovací krok teoreticky umožňuje rozlišovací schopnost polohy závady na vedení 0,3 cm ve vakuu, v reálném prostředí může být i lepší. Samostatně dokáže zařízení detekovat jednoduché závady, jejich typ a polohu. V součinnosti s počítačem je možné provést i kalibraci pomocí kalibrační sady pro korekci nedokonalostí zařízení.

V práci je popsána vytvořená konstrukce reflektometru a princip jeho funkce. Jednotlivé funkční bloky jsou podrobně popsány, vysvětlen je i postup optimalizace těchto bloků k dosažení co nejlepších parametrů zapojení. Vysvětleny jsou i metody detekce závad na vedení, kalibrace zařízení a autokalibrace.

Práce se zabývá i případnými možnostmi, jak by bylo možné rozšířit schopnosti tohoto zařízení o funkci transmisometru, která by umožnila používat toto zařízení jako vektorový analyzátor v časové oblasti.

Klíčová slova: reflektometrie, reflektometr, TDR

Vedoucí: Ing. Viktor Adler, Ph.D.

Abstract

This work deals with construction of reflectometer in time domain, which is implemented as functional device along with control software. The goal was to develop a device capable of measuring reflections on transmission lines caused by faults with spatial resolution on the order of units of centimetres. The emphasis was to develop a cheap and simple device while trying not to limit the functionality or capability of the device.

The resulting device is able to measure up to units of GHz, sampling step is 20 ps, resulting in equivalent sampling rate of 50 GSa.s^{-1} . This sampling step theoretically allows spatial resolution of 0.3 cm in vacuum, possibly even less in real environment. The device can detect simple faults on its own, along with their type and position. When used with computer, it is possible to perform calibration using calibration set.

The work contains explanation of the construction and its principles. Each functional block is described in detail as well as the optimisations which were used to obtain the best possible parameters of the construction. Also explained are methods of detection of faults on the transmission line, calibration and autocalibration of the device.

This work also deals with eventual possibilities of extending the capabilities of the device by implementing a function of transmissometer, which could allow to use the device as a vector network analyzer in time domain.

Keywords: reflectometer, reflectometry, TDR

Title translation: Time-Domain Reflectometer

Obsah

1 Zadání a vlastní cíle návrhu	1	5.3 Složené závady	9
1.1 Zadání	1	5.4 Výpočet impedančního profilu ...	9
1.2 Vlastní cíle návrhu	1	6 Změřené parametry	11
2 Princip měření	3	6.1 Budicí pulz	11
2.1 Základní princip měření	3	6.1.1 Průběh budicího pulzu	11
2.2 Měření v ekvivalentním čase	3	6.1.2 Spektrum budicího pulzu ...	11
2.3 Interpretace měřených výsledků .	3	6.2 Parametry fázového závěsu	11
3 Princip zapojení	5	6.2.1 Jitter fázového závěsu v celočíselném režimu	11
3.1 Základní princip funkce zapojení .	5	6.2.2 Jitter fázového závěsu v racionálním režimu	11
3.2 Blokové zapojení	5	6.2.3 Drift fázového závěsu	11
3.3 Generování potřebných hodinových signálů	5	7 Uživatelské rozhraní a popis ovládání	13
3.4 Tvorba budicího pulzu	5	7.1 Chování zařízení v autonomním režimu	14
3.5 Přizpůsobovací obvody a testovací port	5	7.1.1 Autokalibrace	14
3.6 Vzorkovací obvody	5	7.1.2 Kalibrace pomocí kalibračních standardů	14
3.7 Oddělovací zesilovač	5	7.1.3 Měření	14
3.8 Sekundární vzorkování	5	7.1.4 Vyhodnocení změřených dat .	14
3.9 Digitalizace měřeného průběhu ..	5	7.2 Chování zařízení v režimu s připojeným počítačem	14
4 Kalibrace	7	7.2.1 Autokalibrace	14
4.1 Chybový model	7	7.2.2 Kalibrace pomocí kalibračních standardů	14
4.2 Chyby pramenící z nepřesnosti frekvence fázového závěsu	7	7.2.3 Měření	14
4.3 Měření parametrů chybového modelu	7	7.2.4 Vyhodnocení změřených dat .	14
4.4 Kompenzace chyb	7	8 Závěr	15
4.5 Omezení plynoucí z omezené šířky pásmo zapojení	7	A Literatura	17
5 Detekce závad	9		
5.1 Princip hledání závad	9		
5.2 Základní typy závad	9		

Obrázky



Kapitola 1

Zadání a vlastní cíle návrhu

1.1 Zadání

Zadání této práce je vytvořit samostatně funkční reflektometr v časové oblasti na principu vzorkování v ekvivalentním čase. Budicí signál by měl být obdélníkového tvaru s co nejkratší náběžnou (či sestupnou) hranou. Zařízení by mělo být schopné samostatné funkce a mělo by být schopné určit polohu a typ základních typů diskontinuit na vedení. Mělo by být též možné provést kalibraci zařízení pomocí mechanických kalibrů.

1.2 Vlastní cíle návrhu

Mimo již zmíněných cílů, které vycházejí ze zadání práce, vznikly další cíle, jejichž dosažení není zadáním nijak vyžadováno, ale které si autor stanovil jako svoje vlastní cíle, kterých by chtěl v rámci této práce dosáhnout. Jejich hlavním společným faktorem je požadavek na minimalismus celé konstrukce, jak z pohledu složitosti zapojení, tak i jeho velikosti a konečně také ceny. Zařízení by mělo být opakovatelně výrobitelné, poud možno i v amatérských podmínkách. Podmínkou pro dodržení těchto cílů je však to, aby jejich splnění nedegradovalo kvalitu výsledného zařízení na mez použitelnosti.

- **Jednoduchost zapojení.** Konstrukce by měla být co nejjednodušší a obsahovat co nejméně komponent, aby měla co nejméně stupňů volnosti a bylo ji možné optimalizovat již ve fázi návrhu pomocí simulací a výpočtů. Tím se zmenšuje počet nezbytných cyklů návrhu, výroby a měření, které je nezbytné projít, aby zařízení splňovalo očekávané vlastnosti.
- **Použití pouze běžně dostupných a nahraditelných komponent.** Konstrukce by neměla obsahovat žádné komponenty, které jsou nenahraditelné. Jejich nedostupnost na trhu by pak znamenala, že zařízení již není možné vyrobit. V horším případě by se celá architektura zapojení

musela přepracovat. Použité komponenty by navíc měly být pokud možno běžně dostupné - konstrukce by se měla pokud možno vyhnout například zákaznickým obvodům nebo na míru vyrobeným polovodičovým součástkám.

- **Použití pouze běžných konstrukčních metod.** Konstrukce by se měla vyhnout výrobním postupům, které se používají pouze u specializovaných zařízení a které není možné snadno replikovat. Tím jsou myšleny například polovodičové prvky pájené přímo substrátem na plošný spoj a následně strojově bondované.
- **Použití pouze technologií nevyžadujících speciální provozní podmínky.** Zařízení by mělo být pokud možno minimálně závislé na podmínkách okolního prostředí. Neměly by být použity například technologie vyžadující kryogenické chlazení, udržování konstantní teploty, speciální atmosféry nebo dokonalé stínění před světlem.
- **Žádné manuálně nastavované prvky při výrobě.** Konstrukce by neměla obsahovat žádné nastavitelné prvky, které by se musely po vyrobení prvotně nastavit. Všechny takové prvky by měly být řízené elektronicky a nastavované v rámci autokalibrace zařízení.
- **Jednoduchost ovládání.** Zařízení by mělo uživatele celým procesem autokalibrace a měření co nejjednodušeji provést. Zařízení by mělo samo nalézt možné závady na vedení a oznámit jejich typ a polohu.
- **Komunikace s počítačem.** Zařízení by mělo být schopné komunikovat s počítačem přes rozhraní USB a umožnit uložení změřených dat, rozšířené ovládání a případně složitější metody kalibrace.

Kapitola 2

Princip měření

2.1 Základní princip měření

Reflektometrie v časové oblasti (dále již jen reflektometrie) v kontextu této práce znamená měření vlastností jednobranu, které probíhá na základě měření odezvy měřeného systému na budicí signál, přičemž toto měření probíhá v časové oblasti. Pro měření je možné použít jako budicí signál libovolný kauzální signál, typicky se však využívají pouze průběhy podobné pravoúhlému průběhu nebo jednotkovému v případě širokopásmových reflektometrů. Vzhledem k tomu, že není možné je fyzicky realizovat, protože by vyžadovaly nekonečnou šířku pásma generátoru pulzů, používají se podobné signály, například chybová funkce [Tek85] nebo Gaussův pulz [GLR07]. V případě úzkopásmových reflektometrů se používá například sinusový průběh modulovaný Gaussovým pulzem [MP74]. Pro diagnostiku vedení, která jsou v době měření používána pro komunikaci, se používá například pseudonáhodný průběh.

Za předpokladu lineárního invariantního systému a kauzálního budicího signálu je možné závislost odezvy měřeného systému na budicím signálu zapsat následujícím způsobem, kde $x(t)$ je budicí signál, $y(t)$ je změřená odezva systému na daný budicí signál a $h(t)$ je impulzní odezva:

$$y(t) = x(t) * h(t). \quad (2.1)$$

Pomocí kalibračních metod je možné data získaná jako odezvu na tento budicí signál transformovat do podoby, která je vhodnější pro další zpracování. Plného odstranění vlivu průběhu budicího signálu na odezvě je vhodné měřenou odezvu transformovat do podoby impulzní nebo skokové odezvy.

2.2 Měření v ekvivalentním čase

2.3 Interpretace měřených výsledků



Kapitola 3

Princip zapojení

- 3.1 Základní princip funkce zapojení
- 3.2 Blokové zapojení
- 3.3 Generování potřebných hodinových signálů
- 3.4 Tvorba budicího pulzu
- 3.5 Přizpůsobovací obvody a testovací port
- 3.6 Vzorkovací obvody
- 3.7 Oddělovací zesilovač
- 3.8 Sekundární vzorkování
- 3.9 Digitalizace měřeného průběhu



Kapitola 4

Kalibrace



4.1 Chybový model



4.2 Chyby pramenící z nepřesnosti frekvence fázového závěsu



4.3 Měření parametrů chybového modelu



4.4 Kompenzace chyb







4.5 Omezení plynoucí z omezené šířky pásma zapojení



Kapitola 5

Detekce závad

-  5.1 Princip hledání závad
-  5.2 Základní typy závad
-  5.3 Složené závady
-  5.4 Výpočet impedančního profilu

Kapitola 6

Změřené parametry

6.1 Budicí pulz

6.1.1 Průběh budicího pulzu

6.1.2 Spektrum budicího pulzu

6.2 Parametry fázového závěsu

6.2.1 Jitter fázového závěsu v celočíselném režimu

Histogram jitteru

Frekvenční spektrum jitteru

Chování jitteru při průměrování

6.2.2 Jitter fázového závěsu v racionálním režimu

Histogram jitteru

Frekvenční spektrum jitteru

Chování jitteru při průměrování

6.2.3 Drift fázového závěsu



Kapitola 7

Uživatelské rozhraní a popis ovládání

■ 7.1 Chování zařízení v autonomním režimu

■ 7.1.1 Autokalibrace

■ Kalibrace polohy budicího pulzu

■ Kalibrace polohy měřicí roviny

■ Kalibrace vzorkovacího kmitočtu

■ 7.1.2 Kalibrace pomocí kalibračních standardů

■ 7.1.3 Měření

■ 7.1.4 Vyhodnocení změřených dat

■ 7.2 Chování zařízení v režimu s připojeným počítačem

■ 7.2.1 Autokalibrace

■ 7.2.2 Kalibrace pomocí kalibračních standardů

■ 7.2.3 Měření

■ 7.2.4 Vyhodnocení změřených dat



Kapitola 8

Závěr



Příloha A

Literatura

- [GLR07] Mohammad Ghavami, Michael Lachlan, and Kohno Ryuji, *Ultra Wideband Signals and Systems in Communications Engineering*, 2nd ed., John Wiley and sons, 2007 (English).
- [MP74] N. A. M. Mackay and S. R. Penstone, *A High-Sensitivity Narrow-Band Time-Domain Reflectometer*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement **23** (1974), no. 2, 155–158.
- [Tek85] Tektronix, Inc., Beaverton, Oregon, *S-4 Sampling Head Instruction Manual*, 3 1985.