

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 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. 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. 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

<b>1 Zadání a vlastní cíle návrhu</b>	<b>1</b>	5.3 Složené závady .....	9
1.1 Zadání .....	1	5.4 Výpočet impedančního profilu ...	9
1.2 Vlastní cíle návrhu .....	1	<b>6 Změřené parametry</b>	<b>11</b>
<b>2 Princip měření</b>	<b>3</b>	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
<b>3 Princip zapojení</b>	<b>5</b>	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	<b>7 Uživatelské rozhraní a popis ovládání</b>	<b>13</b>
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
<b>4 Kalibrace</b>	<b>7</b>	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	<b>8 Závěr</b>	<b>15</b>
4.5 Omezení plynoucí z omezené šířky pásma zapojení .....	7		
<b>5 Detekce závad</b>	<b>9</b>		
5.1 Princip hledání závad .....	9		
5.2 Základní typy závad .....	9		

## Obrázky







# Kapitola 1

## Zadání a vlastní cíle návrhu



### 1.1 Zadání



### 1.2 Vlastní cíle návrhu





## Kapitola 2

### Princip měření



#### 2.1 Základní princip měření



#### 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