

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice PhD Thesis, sv. 430*

*ISSN 1213-4198*

*thesis* IS

*Ing. Petr Drexler*

**Metody měření  
ultrakrátkých neperiodických  
elektromagnetických impulsů**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky

**Ing. Petr Drexler**

**METODY MĚŘENÍ ULTRAKRÁTKÝCH  
NEPERIODICKÝCH ELEKTROMAGNETICKÝCH  
IMPULSŮ**

**METHODS FOR MEASUREMENT OF ULTRA-SHORT  
SINGLE-SHOT ELECTROMAGNETIC IMPULSES**

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Teoretická elektrotechnika  
Školitel: doc. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.  
Oponenti: prof. Ing. Zdeněk Smékal, CSc.  
Ing. Bohumil Král, CSc.  
Datum obhajoby: 20. 11. 2007

## **Klíčová slova**

Elektromagnetický impuls, impulsní výkonový generátor, impulsní mikrovlnný generátor, magneto-optický jev, elektro-optický jev, kalorimetrický senzor, optovláknový senzor.

## **Keywords**

Electromagnetic pulse, pulsed power generator, pulse microwave generator, magneto-optic effect, electro-optic effect, calorimetric sensor, fiber-optic sensor.

Práce je k dispozici na Vědeckém oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně, Údolní 53, Brno, 602 000.

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>CÍLE DISERTACE</b> .....	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>METODY MĚŘENÍ IMPULSNÍCH VELIČIN</b> .....	<b>6</b>
3.1	PŘÍMÉ METODY MĚŘENÍ DĚJŮ V IMPULSNÍCH GENERÁTORECH ....	7
3.1.1	<i>Vysokonapěťový dělič</i> .....	7
3.1.2	<i>Využití elektro-optických jevů</i> .....	7
3.1.3	<i>Proudový bočník</i> .....	8
3.1.4	<i>Indukční senzory magnetického pole</i> .....	8
3.1.5	<i>Magneto-optické senzory</i> .....	8
3.2	NEPŘÍMÉ METODY MĚŘENÍ DĚJŮ V IMPULSNÍCH GENERÁTORECH	11
3.2.1	<i>Měření okamžitého výkonu impulsu</i> .....	11
3.2.2	<i>Měření energie impulsu</i> .....	12
<b>4</b>	<b>NÁVRH A REALIZACE SENZORŮ</b> .....	<b>12</b>
4.1	EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ MAGNETO-OPTICKÉHO SENZORU ....	12
4.2	NÁVRH MAGNETO-OPTICKÉHO VLÁKNOVÉHO SENZORU.....	14
4.2.1	<i>Teoretická analýza OKR uspořádání</i> .....	15
4.2.2	<i>Návrh optovláknového senzoru</i> .....	16
4.3	REALIZACE KOMBINOVANÉHO KALORIMETRICKÉHO SENZORU ..	18
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>21</b>
	<b>LITERATURA</b> .....	<b>22</b>
	<b>ŽIVOTOPIS</b> .....	<b>25</b>
	<b>ABSTRACT</b> .....	<b>26</b>



# 1 ÚVOD

Téma disertační práce vzniklo na základě potřeby měření impulsních elektromagnetických polí velkého výkonu. Tato pole jsou generována výkonnými mikrovlnnými zdroji, které jsou schopny dodávat špičkový výkon v řádu stovek megawattů až jednotek GW. Problematika výkonných impulsních elektromagnetických zdrojů je v současnosti aktuální. Zabývá se principy generace vysoce výkonných impulsních polí, návrhem zdrojů a generátorů impulsů a vhodnými měřicími metodami. Využití impulsních zdrojů má v současnosti velký význam např. při obraně a ochraně citlivých objektů před narušením. Aktuálnost této problematiky se v poslední době stává stále důležitější s rostoucím počtem teroristických útoků a pokusů o narušení civilních, obchodních a průmyslových elektronických systémů, počítačových sítí, národních bezpečnostních center nebo elektráren.

Vžitým termínem pro vysoce výkonné elektromagnetické impulsy s krátkou dobou trvání je zkratka EMP (Electromagnetic Impulse). EMP je charakteristický destruktivními účinky na polovodičové přechody v elektronických součástkách. Vzhledem k poměrně širokému spektrálnímu rozsahu EMP zasahujícímu až do oblasti jednotek GHz dochází k průniku impulsu do nedostatečně stíněných systémů. EMP je obvykle vyzářen impulsním mikrovlnným generátorem, který vyžaduje dodání velkého množství energie v krátkém čase. Pro jeho napájení jsou vhodné impulsní výkonové generátory (PVG). Jedním z nejpropracovanějších způsobů generace je metoda využívající efektu zesilování proudu v parametrickém induktoru [1]. Během krátkého časového okamžiku dochází ke kompresi hustoty magnetického indukčního toku za pomoci kinetické energie uvolněné při detonaci výbušniny. Délka trvání průběhu zesíleného špičkového proudu se pohybuje v intervalu jednotek až desítek  $\mu\text{s}$ . Generovaný výkon může dosáhnout hodnot řádově stovek MW. Špičkové speciální impulsní generátory dosahují výkonu až 290 TW [3]. Vývojovým týmem PROTOTYPA a.s. a vývojovým týmem Vojenského technického ústavu pozemního vojska ve Vyškově (VTUPV Vyškov) byl řešen projekt Ministerstva průmyslu a obchodu „Mikrovlnné generátory elektromagnetického impulsu“.

Metody měření elektromagnetických impulsů velkého výkonu nejsou dosud dobře prostudovány a rozvinuty. V publikované literatuře lze nalézt jen málo prací vztahujících se k metodám měření specifických vlastností a parametrů elektromagnetického impulsu. Publikované metody jsou ve většině případů založeny na měření elektrické složky impulsu [4] v oblasti se známým rozložením elektromagnetického pole [5], [6]. Publikovány byly i metody měření magnetické složky impulsu [7]. Publikované práce ale neřeší možnosti aplikace při měření na reálných PVG a nezohledňují požadavky odolnosti proti rušení při přenosu změřených údajů.

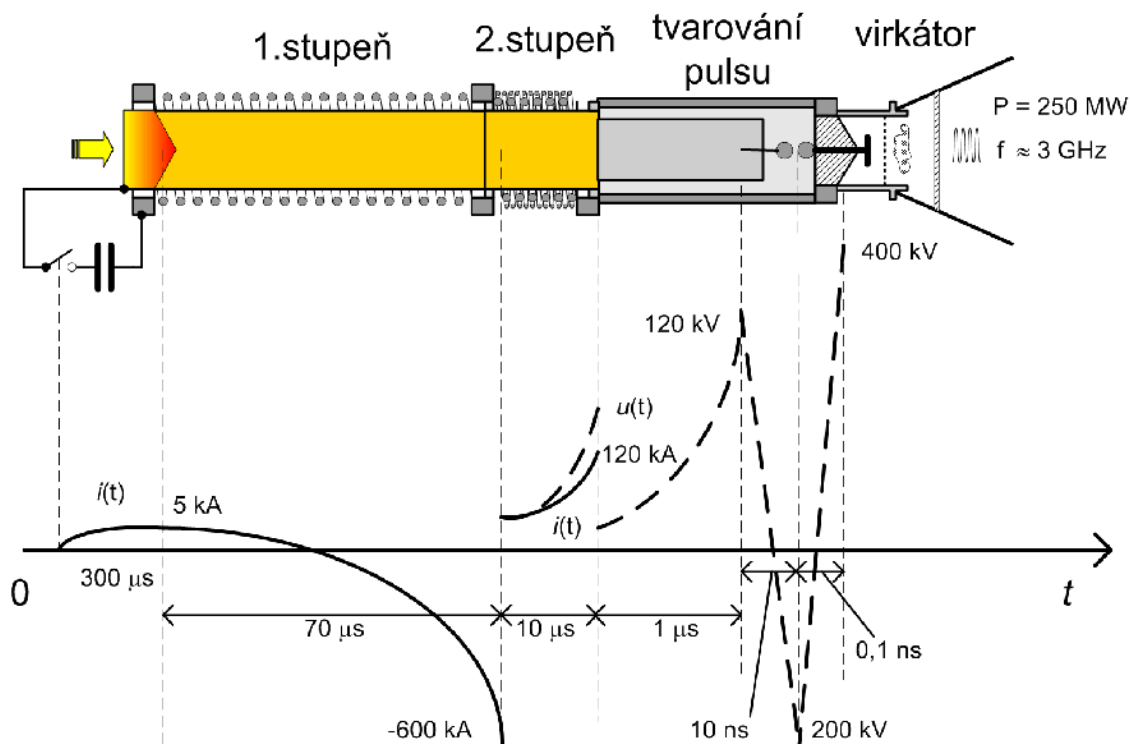
## 2 CÍLE DISERTACE

Disertační práce se zabývá návrhem, analýzou a ověřením metod vhodných pro měření jednorázových výkonných impulsních elektromagnetických polí. Součástí práce je diskuse jejich možností, vlastností a finanční náročnosti. Poznatky získané při zpracování disertační práce nejsou zaměřeny pouze na oblast použití výkonových impulsních generátorů. Práce ukazuje obecné možnosti měření neopakovaných impulsních dějů v elektromagnetické oblasti. Ty stojí stranou zájmu vedle metod zabývajících se měřením statických a časově proměnných periodických polí. Jejich využití je možné v oblasti elektromagnetické kompatibility, materiálové diagnostiky nebo fyzikálního výzkumu. Cíle disertace lze formulovat v následujících bodech

- Na základě rozboru známých měřicích metod elektromagnetického pole a metodiky měření jednorázových dějů provést návrh nové metody měření jednorázového elektromagnetického impulsu vysokého výkonu.
- Navrhnout možnosti přenosu změřených údajů do bezpečné vzdálenosti. Provést rozbor jejich citlivost vůči rušení, které vzniká při funkci generátoru.
- Vybrané měřicí metody experimentálně realizovat v laboratoři a ověřit jejich funkci a parametry. Na základě získaných poznatků a výsledků navrhnout jejich úpravu pro použití při reálném měření na impulsním generátoru.
- Vzhledem k jednorázovému charakteru měření v reálných podmínkách diskutovat také finanční aspekty navržených senzorů, které jsou po splnění své funkce obvykle zničeny.

## 3 METODY MĚŘENÍ IMPULSNÍCH VELIČIN

Při výběru vhodných metod pro měření impulsního proudu a napětí, špičkového výkonu a energie elektromagnetického impulsu je nutno vyjít z očekávaných hodnot měřených veličin a charakteru jejich časových průběhů. Stávající měřicí metody poskytují informaci o velikosti impulsního proudu a napětí dodávaného PVG. Z těchto hodnot lze určit výkon dodávaný do mikrovlnného zdroje a odhadnout energii a špičkový výkon elektromagnetického impulsu. Na obr. 3.1 je znázorněna sestava mikrovlnného impulsního generátoru. Jsou uvedeny i orientační časové relace dějů v jednotlivých stupních generátoru a hodnoty napětí, proudu a výkonu.



obr. 3.1 Sestava impulsního mikrovlnného generátoru.

### 3.1 PŘÍMÉ METODY MĚŘENÍ DĚJŮ V IMPULSNÍCH GENERÁTORECH

Z hodnot uvedených na obr. 3.1 je zřejmé, že použití klasických metod pro měření proudu (metoda proudového bočníku) je velmi problematické. Jako řešení se jeví měření indukovaného magnetického pole a určení proudu výpočtem, jak bylo uvedeno výše. Měření impulsního napětí je realizovatelné pomocí speciálních vysokonapěťových děličů. Diskutována je i možnost využití elektro-optických jevů.

#### 3.1.1 Vysokonapěťový dělič

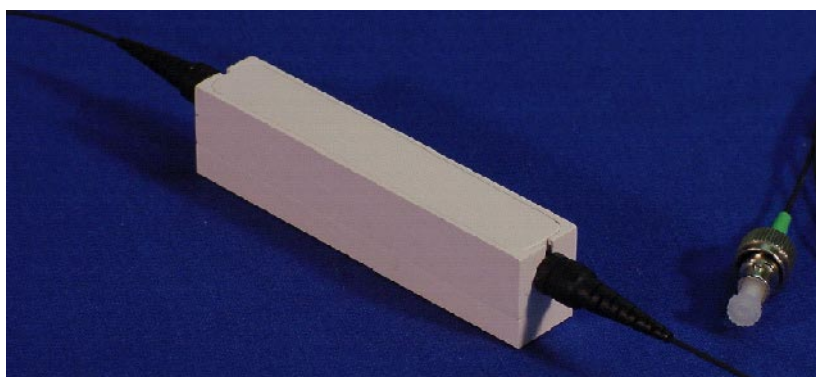
V publikované práci [9] je popsána konstrukce vysokonapěťového bezindukčního děliče pro měření impulsních napětí. Vzhledem k časovým charakteristikám průběhu napětí (obr. 3.1) bylo nutno navrhnout dělič s minimální indukčností, aby nedocházelo ke zkreslování změřených údajů. Dělič byl zkonstruován na základě modifikace sériového vysokonapěťového izolátoru. Využitím kapalinového rezistoru a symetricky uspořádané soustavy snímacích rezistorů bylo dosaženo velice nízké hodnoty indukčnosti děliče.

#### 3.1.2 Využití elektro-optických jevů

V souvislosti s požadavkem na navázání senzoru na optovláknovou přenosovou trasu se nabízí využití elektro-optických jevů jako fyzikálního principu měřicí metody [11]. Informace o měřené veličině (elektrickém poli) je modulována na



nosný optický signál. Ten může být dále bez vlivu rušení a zkreslení přenášen na místo zpracování. Při aplikaci elektro-optických modulátorů lze provádět měření elektrické složky pole do oblasti jednotek GHz [15]. Sriram [17] realizoval senzory na interferometrickém principu, neobsahující kovové části. Jejich vliv na rozložení měřeného pole je tak potlačen. Intenzita měřeného elektrického pole leží v rozsahu  $E \in \langle 1; 5000 \rangle$  V/m. Šířka pásma senzoru je  $f \in \langle 1; 2 \cdot 10^9 \rangle$  Hz. Senzor je navázán na optovláknovou přenosovou trasu, viz. obr. 3.2.



obr. 3.2 Elektro-optický senzor elektrického pole SRICO, Inc.

### 3.1.3 Proudový bočník

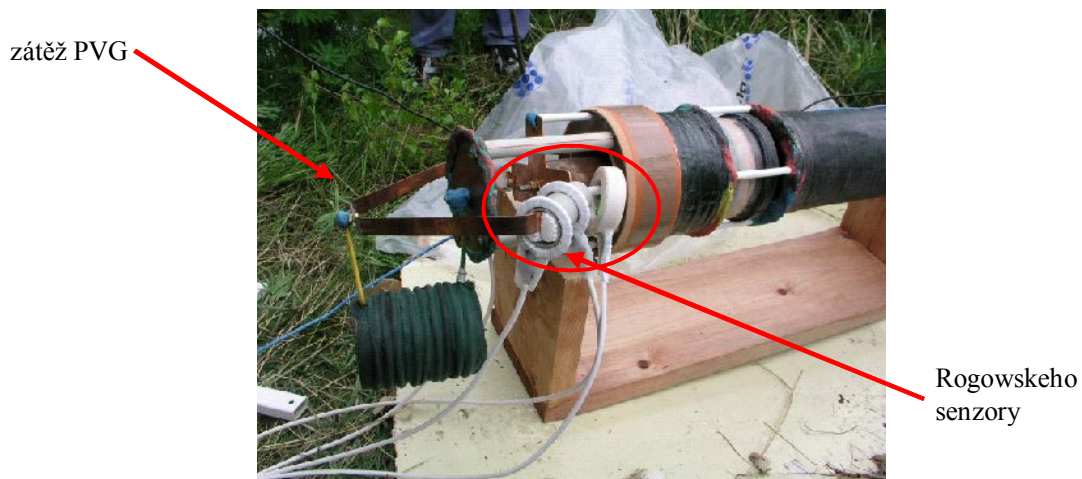
Pro měření velkých proudů je často užíváno proudového bočníku [21]. Jeho výhodou je relativně nízká cenová náročnost a jednoduchý vztah mezi úbytkem napětí a měřeným proudem. Nevýhodou je potřeba velmi nízké hodnoty odporu bočníku pro velké proudy. Při měření časově proměnných proudů musí bočník vykazovat nízkou vlastní indukčnost, aby nedocházelo ke zkreslení tvaru a velikosti hodnoty měřeného průběhu. Vzhledem k proudovým hodnotám uvažovaným podle obr. 3.1 a jejich časovým charakteristikám je použití bočníku velmi problematické.

### 3.1.4 Indukční senzory magnetického pole

Jiným přístupem k problematice měření proudů o vysokých úrovních je využití indukovaného magnetického pole. Ze změřeného průběhu velikosti magnetického pole je proud následně odvozen výpočtem. Z hlediska úrovní veličin měřeného magnetického pole a jejich předpokládaným časovým průběhům jsou nejvhodnější senzory typu indukčního a magneto-optického. Pro indukční senzory elektrického proudu jsou s výhodou používány Rogowskeho senzory (cívky), viz. obr. 3.3. Za jejich pomoci lze měřit proudy s vysokými hodnotami s kmitočtovým rozsahem desítek MHz [24].

### 3.1.5 Magneto-optické senzory

Nové možnosti v problematice měření elektrických proudů a magnetických polí přinesl rozvoj senzorů využívajících magneto-optických jevů. Magneto-optické jevy

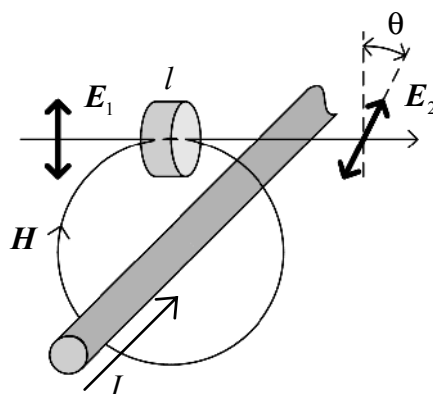


obr. 3.3 Rogowskeho senzory umístěné na zátěži PVG.

spočívají v ovlivňování vlastností šíření světla v látkách a při odrazu na jejich rozhraní za současného působení magnetického pole [25]. Nejvýznamnějším pro konstrukci magneto-optických senzorů je Faradayův jev popsany vztahem

$$\theta = \mu V H l, \quad (3.1)$$

kde  $\mu$  je magnetická permeabilita materiálu senzoru,  $\theta$  je úhel stočení roviny polarizace měřicího optického svazku,  $V$  je tzv. Verdetova konstanta, která charakterizuje magneto-optické vlastnosti prostředí (rotátoru) a  $l$  je interakční délka svazku v optickém prostředí, viz. obr. 3.4. Vyhodnocení optického signálu je prováděno za pomoci polarimetrické metody [14].

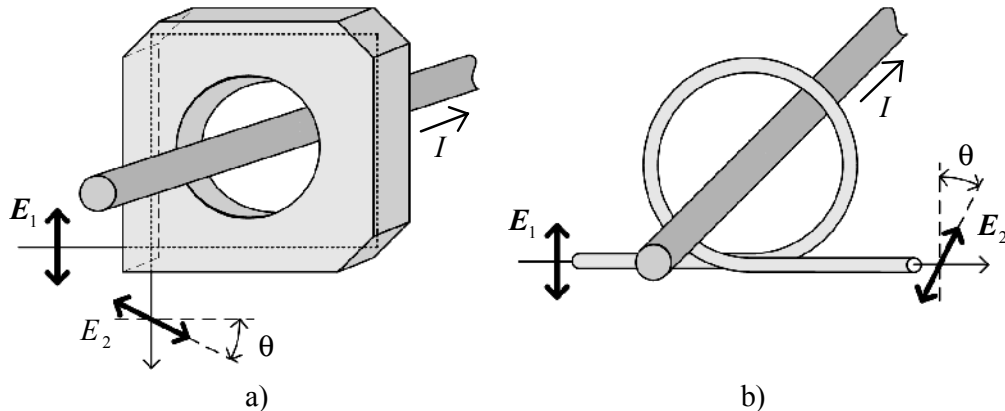


obr. 3.4 Faradayův magneto-optický jev.

Uspořádání magneto-optických senzorů podle obr. 3.5 vychází z Ampérova zákona celkového proudu. Vztah pro velikost stočení roviny polarizace světelné vlny v rotátoru je

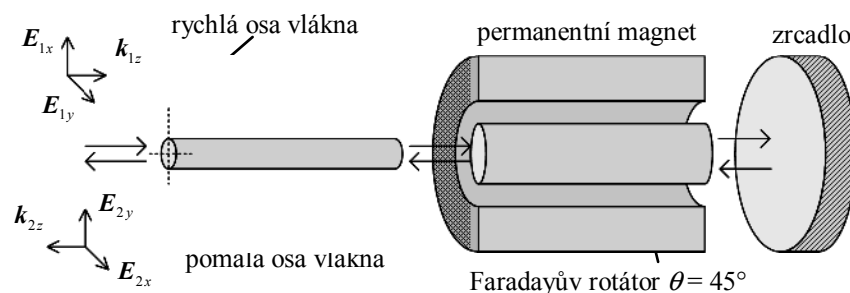
$$\theta(t) = \mu V \oint_l \mathbf{B}(t) \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 V N i(t), \quad (3.2)$$

kde  $N$  je počet závitů vlákna v případě optovláknového provedení senzoru.



obr. 3.5 Uspořádání integrálních proudových magneto-optických senzorů s použitím speciálního optického elementu a) a s použitím optického vlákna b).

Pro potlačení parazitního lineárního dvojlomu je možné konstruovat senzory se zpětným šířením optického signálu. Tento přístup využívá skutečnosti, že Faradayův jev je nerekipročního charakteru, zatímco lineární dvojlom je charakteru recipročního. Perspektivním způsobem je využití ortokonjugačního retroreflektoru (OKR), označovaného také jako Faradayovo zrcadlo. Ortokonjugační retroreflektor je odrazný optický komponent sestávající ze zrcadla a Faradayova rotátoru s úhlem stočení roviny polarizace  $\theta = 45^\circ$ . Schéma OKR je na obr. 3.6. Po průchodu světelné vlny OKR dojde k záměně ortogonálních složek vlny  $E_x$  a  $E_y$ . Při zpětném průchodu dvojlomným prostředím je lineární dvojlom kompenzován.



obr. 3.6 Schéma ortokonjugačního retroreflektoru.

## 3.2 NEPŘÍMÉ METODY MĚŘENÍ DĚJŮ V IMPULSNÍCH GENERÁTORECH

Nepřímými metodami měření uvažujeme v prezentované problematice ty, které nepodávají přímé informace o hodnotách a průbězích proudů a napětí v mikrovlnném impulsním generátoru. Jelikož hlavní funkcí mikrovlnného impulsního generátoru jako celku je generace velmi krátkého elektromagnetického impulsu o maximálním výkonu, je užitečné zajímat se o parametry generovaného impulsu. Nejsou tak měřeny přímo charakteristiky procesů uvnitř generátoru, ale jejich vnější projevy, které v konečném důsledku svědčí o optimálnosti jeho funkce.

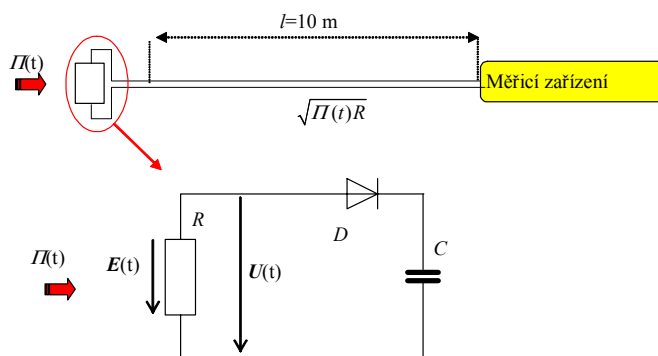
V současně dostupné literatuře nebylo nalezeno publikované řešení zmíněné problematiky. Výjimkou jsou publikace, které se zabývají stanovením parametrů složek impulsu v rezonančních dutinách se známým rozložením elektromagnetického pole [5], [6]. Ty jsou ovšem pro řešenou situaci nevhodné. Na základě požadavků identifikace a kvantifikace generovaných impulsů byly navrženy metody, jejichž vhodnou aplikací lze stanovit okamžitý výkon impulsu a jeho energii.

### 3.2.1 Měření okamžitého výkonu impulsu

Okamžitý výkon elektromagnetického impulsu je charakterizován velikostí Poyntingova vektoru  $\Pi(t)$ . Vzhledem k těsné souvislosti složek elektrického a magnetického pole je možné výkon interpretovat pouze na základě popisu elektrické složky pole.

$$\Pi(t) = |\mathbf{E}(t) \times \mathbf{H}(t)| = \frac{1}{c\mu_0} E^2(t). \quad (3.3)$$

Hlavní frekvenční složky impulsu byly očekávány v kmitočtovém rozsahu jednotek GHz. Neznalost přesného spektrálního složení impulsu vylučuje možnost přímého měření časového průběhu elektrické složky  $E(t)$ . Byla proto navržena měřicí metoda založená na obálkové detekci. Schematicky je metoda zobrazena na obr. 3.7.



obr. 3.7 Principiální uspořádání metody měření okamžitého výkonu.

Elektromagnetická vlna dopadající na definovaný, frekvenčně nezávislý odpor  $R$  vyvolá rozdíl napětí  $U(t)$  na terminálech odporu [46]. Napětí na odporu je přímo úměrné odmocnině výkonu dopadající elektromagnetické vlny

$$U(t) = \sqrt{P(t)R}. \quad (3.4)$$

Napětí na odporu  $R$  je snímáno detektorem s mikrovlnnou diodou  $D$  a kapacitou  $C$ . Lze tak získat časový průběh okamžité hodnoty výkonu představovaný detekovanou modulační obálkou impulsu. Pro zachování korektních podmínek měřicí metody je nutno zajistit frekvenční nezávislost odporu  $R$  a definovat způsob vazby složky elektrického pole na terminály odporu.

### 3.2.2 Měření energie impulsu

Druhou nepřímou měřicí metodou je zjištění energie elektromagnetického impulsu. Tato metoda je založena na měření tepelných účinků při absorpci vlny. Kalibrací metody na konkrétní realizaci je zjištěna konstanta senzoru. Na základě znalosti konstanty je pak možné vyhodnocovat velikost energie reálného generovaného impulsu. Metoda měření energie impulsu je založena na vyhodnocení tepelných účinků elektromagnetické vlny absorbované ve speciální vrstvě [47].

## 4 NÁVRH A REALIZACE SENZORŮ

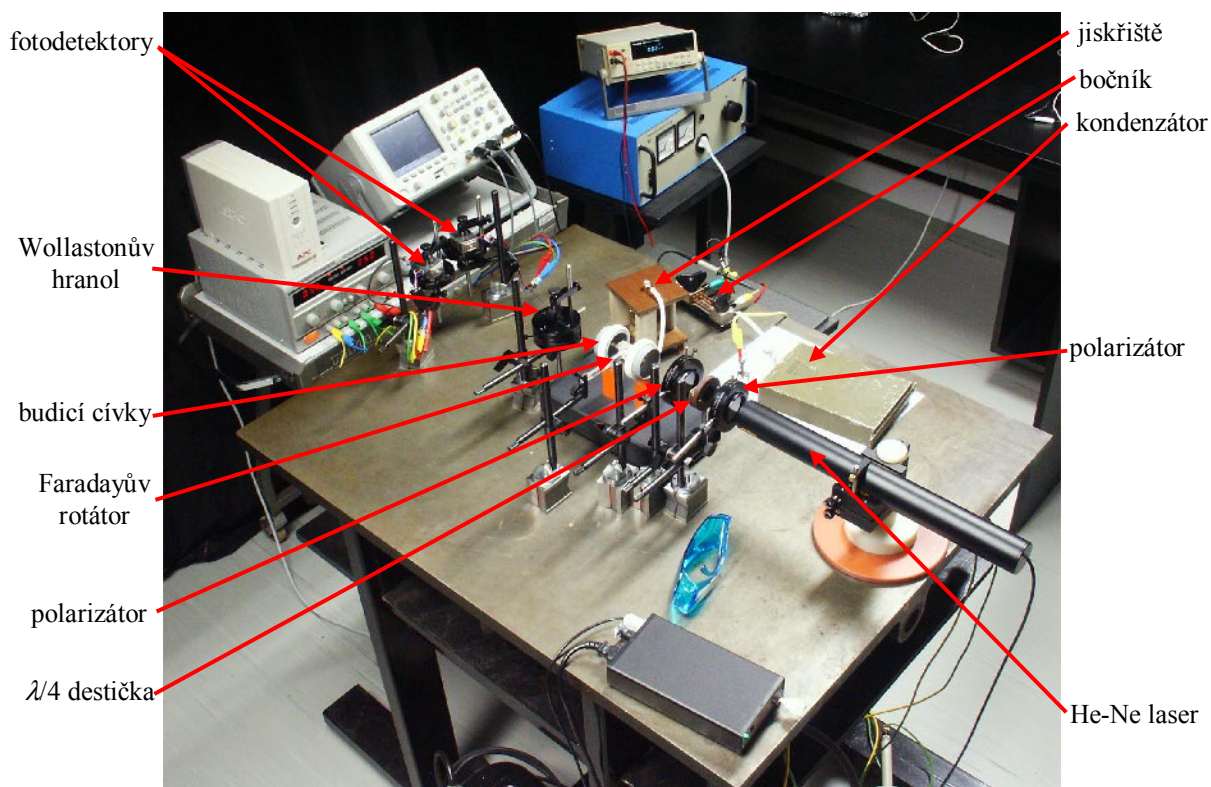
V problematice metrologie veličin v PVG je v současnosti uspokojivě vyřešeno měření impulsního napětí. Použito může být realizovaných vysokonapěťových děličů [9], které jsou spolehlivé a vyhovující pro jednorázové použití. Pro měření impulsního proudu nejsou v současnosti používané proudové bočníky [48] výhodné a je žádoucí navrhnout senzor pracující na magneto-optickém principu. Pro měření parametrů virkátorem generovaného impulsu je navrženo využití popsanych měřicích metod energie a okamžitého výkonu impulsu.

### 4.1 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ MAGNETO-OPTICKÉHO SENZORU

V laboratoři bylo experimentálně ověřeno použití magneto-optického senzoru pro měření impulsního proudu, obr. 4.1. Jako zdroj magnetického pole byla použita soustava dvou souosých cívek. Budicí cívky byly zapojeny do jednoduchého obvodu spolu s vysokonapěťovým kondenzátorem. Jako spínacího prvku, bylo použito jednoduchého jiskřiště jako levné alternativy k polovodičovým spínačům.

Jako zdroj měřicího svazku slouží He-Ne laser pracující na vlnové délce  $\lambda = 632,8$  nm s vyzařovaným výkonem  $P_O = 5$  mW. Laserový svazek prochází Faradayovým rotátorem. Rotátor je vyrobený z paramagnetického skla FR-5 (Hoya Optics). Rotátor má tvar válečku o délce  $l = 60$  mm. Verdetova konstanta materiálu je  $V_{FR-5} = 80,67$  rad·T<sup>-1</sup>·m<sup>-1</sup>.

Velikost impulsního proudu byla určena velikostí průrazného napětí jiskřiště. Na obr. 4.2 jsou zobrazeny příklady průběhů sejmutých osciloskopem. Na prvním a druhém kanále jsou zaznamenány napěťové průběhy kvadrurních signálů fotodetektorů. Na třetím kanále je zachycen průběh napětí na snímacím rezistoru představující průběh proudu obvodem. Dále je zobrazen průběh, který vznikl odečtením obou napětí z fotodetektorů.

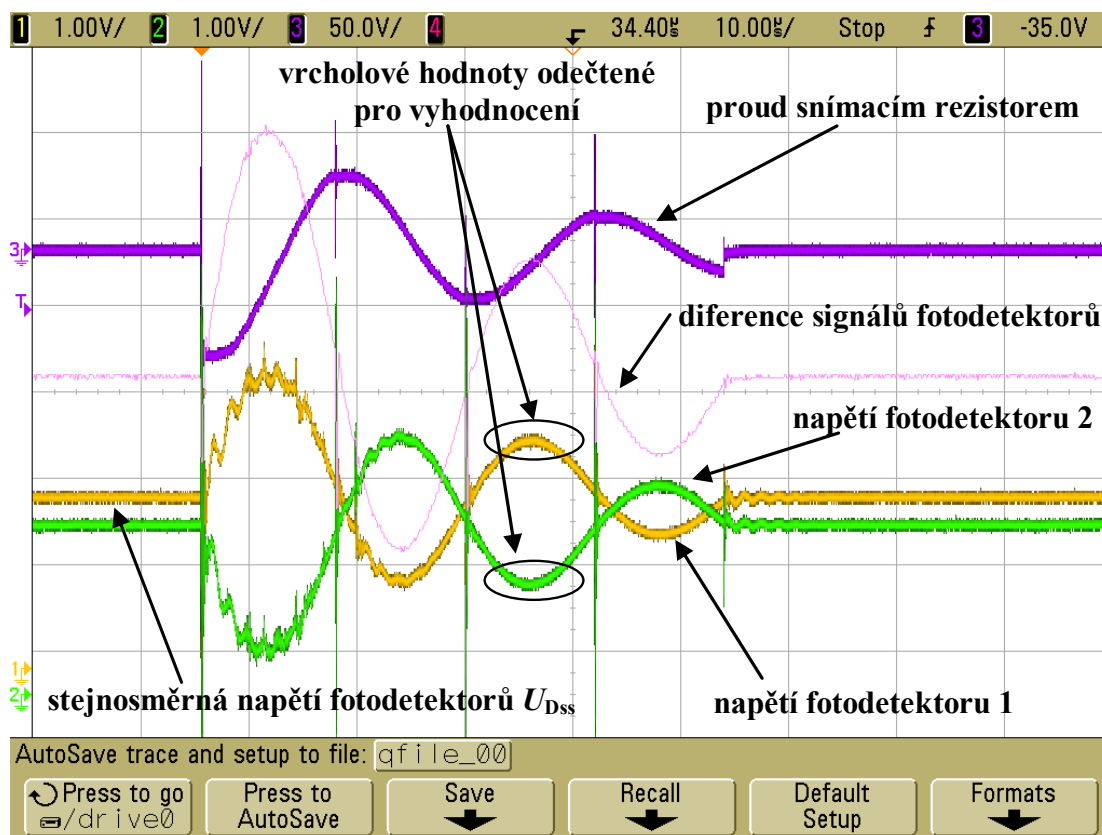


obr. 4.1 Experimentální pracoviště pro měření proudových impulsů s využitím magneto-optického jevu.

Při výboji v jiskřišti dochází k vyzařování silného rušení, které zkresluje měřené signály. Je to patrné především v prvních půlvlnách signálů z fotodetektorů, které jsou značně zvlněné vyššími harmonickými. Patrná je také superpozice silných napěťových špiček způsobených sekundárními výboji v jiskřišti. Při sejmutí průběhů byla použita matematická funkce rozdílu kanálů. Ta byla aplikována na první a druhý kanál (signály z fotodetektorů). Je patrné, že došlo k velmi dobrému potlačení superponovaného rušení (obr. 4.2).

Metoda duální kvadrurní elipsometrie se ukázala jako velmi vhodná pro vyhodnocení polarimetrického měření magneto-optického jevu. Při experimentu byla prokázána její schopnost potlačovat souhlasně indukované rušení a schopnost potlačení vlivu kolísání optického výkonu měřicího svazku a kolísání útlumů v optické trase, způsobených např. vibracemi, přítomnými při měření. Při její aplikaci je ovšem nutné předejít stavu, kdy dochází ke stáčení roviny polarizace

měřicího svazku o více než  $45^\circ$ . Přenosová funkce analyzátorů přitom dosahuje svých extrémů a dále se projevuje její periodicitata.



obr. 4.2 Průběhy zaznamenané osciloskopem při výboji

## 4.2 NÁVRH MAGNETO-OPTICKÉHO VLÁKNOVÉHO SENZORU

Experimentální realizace magneto-optické metody měření elektrického proudu umožňuje provést závěry pro praktický návrh senzoru. Byly ověřeny vhodné vlastnosti duální kvadrurní elipsometrické metody. Její využití se jeví jako nutné pro měření v prostředí se silným rušením. Ověřena byla metodika výpočtu proudu ze změřených údajů. Pro výpočet je nutné znát magneto-optické vlastnosti rotátoru (Verdetova konstanta), geometrické uspořádání soustavy zdroj magnetického pole – senzor a rozložení magnetického pole v oblasti senzoru. Potřeba znalosti uvedených parametrů měřicí úlohy je nevýhodná. Z tohoto důvodu je návrh senzoru založen na integrálním uspořádání s využitím optického vlákna jako rotátoru. Použití jednovidových optických vláken vyžaduje metodu kompenzace parazitních lineárních dvojlomů. Z diskuze možností kompenzace byla jako nejvhodnější vybrána metoda OKR.

## 4.2.1 Teoretická analýza OKR uspořádání

Pro teoretické ověření snímací a kompenzační funkce senzoru byla provedena analýza s využitím Jonesova počtu. Při řešení můžeme analyzovat separátně případy, kdy ve vlákně působí vždy buď jen lineární dvojlom, nebo jen kruhový dvojlom. Výsledný polarizační stav je pak určen superpozicí těchto stavů.

Pokud uvažujeme přítomnost pouze lineárního dvojlomu  $\delta$ , kruhový dvojlom  $\phi = 0$ , je pro výstupní Jonesův vektor odvozen vztah

$$\begin{aligned} \mathbf{J}'_4 &= \mathbf{T}'_{OV} \cdot \mathbf{T}_{OKR} \cdot \mathbf{T}'_{OV} \cdot \mathbf{J}_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2} + j \sin \frac{\delta}{2} & 0 \\ 0 & \cos \frac{\delta}{2} - j \sin \frac{\delta}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2} + j \sin \frac{\delta}{2} & 0 \\ 0 & \cos \frac{\delta}{2} - j \sin \frac{\delta}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos^2 \frac{\delta}{2} + \sin^2 \frac{\delta}{2} \\ -\left( \cos^2 \frac{\delta}{2} + \sin^2 \frac{\delta}{2} \right) \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Z výsledného tvaru vektoru (4.1) je patrné, že na vstupu senzoru bude opět vlna lineárně polarizovaná. Rovina její polarizace je stočena o úhel  $\theta = 90^\circ$  (vliv OKR). Přítomný nežádoucí lineární dvojlom  $\delta$  byl potlačen.

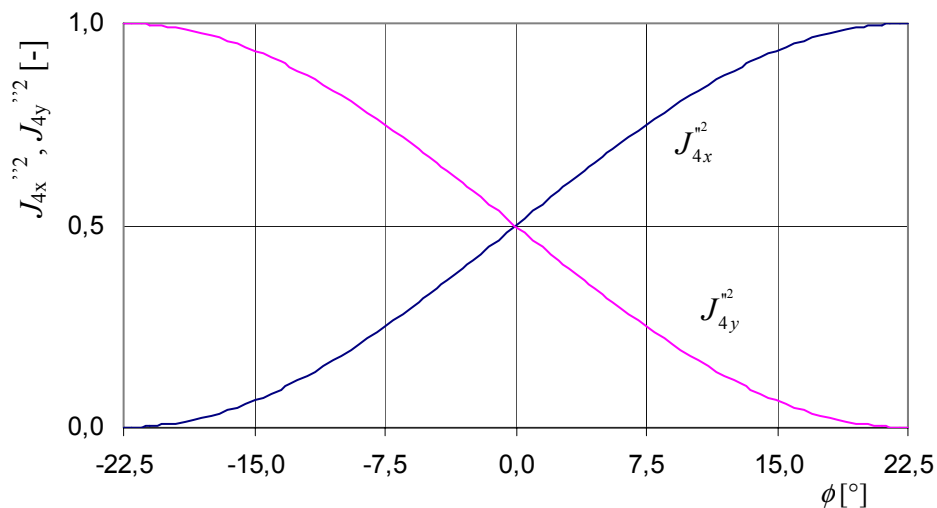
Pro druhý případ uvažujeme přítomnost pouze kruhového dvojlomu indukovaného magnetickým polem měřeného proudu. Lineární dvojlom  $\delta = 0$ . Vlna na výstupu senzoru bude popsána vektorem

$$\begin{aligned} \mathbf{J}''_4 &= \mathbf{T}''_{OV} \cdot \mathbf{T}_{OKR} \cdot \mathbf{T}''_{OV} \cdot \mathbf{J}_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos^2 \phi - \sin^2 \phi + \sin 2\phi \\ -(\cos^2 \phi - \sin^2 \phi - \sin 2\phi) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Ve výrazu (4.2) je člen  $\sin 2\phi$ , který reprezentuje indukovaný kruhový dvojlom. Světelná vlna prochází vláknovým rotátorem v přímém a zpětném směru. Díky reciprocitě nabude vlna dvojnásobného úhlu stočení roviny polarizace.

Pokud pro vyhodnocení použijeme duální elipsometrickou metodu budou obě složky vektoru  $\mathbf{J}_4$  detekovány kanály s ortogonálními analyzátory (představujícími polarizační dělič svazku). Složky Jonesova vektoru jsou normovanými elektrickými intenzitami. Optický výkon signálu a stejně tak i napětí na výstupu fotodetektorů je úměrné druhé mocnině elektrických intenzit detekovaných světelných vln. Závislost pro normované velikosti signálů je znázorněna na obr. 4.3. Je zřejmé, že pro malé úhly stočení roviny  $\phi$  je opět možné považovat části charakteristik za lineární.





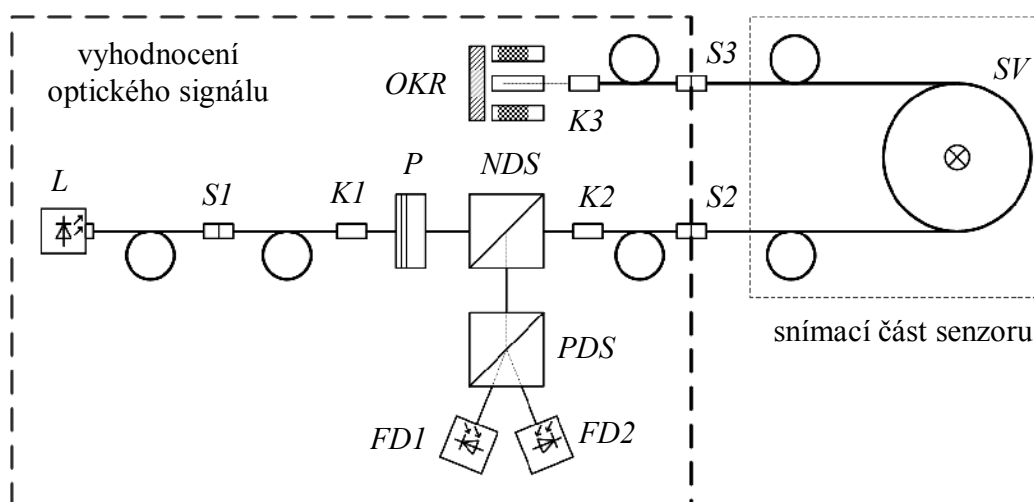
obr. 4.3 Závislost velikosti normovaného výstupního signálu ortogonální kanálů senzoru na velikost úhlu stočení roviny polarizace  $\phi$ .

#### 4.2.2 Návrh optovláknového senzoru

Pro návrh senzoru je vhodné použít takových optických komponentů, které zajistí jeho maximální kompaktnost a snadnou realizovatelnost. Z hlediska praktické realizovatelnosti a kompaktnosti se jeví nejvýhodnější maximální využití dostupných optovláknových komponentů. Byla zvolena vlnová délka  $\lambda = 633 \text{ nm}$ . Pro snímací část senzoru je použitelné jednovidové vlákno se standardními parametry. Součástí snímací části senzoru je OKR, který kompenzuje nežádoucí dvojlomné vlastnosti vlákna.

Na obr. 4.4 je schéma navrženého optovláknového senzoru. Zdrojem nosného optického signálu je pigtailovaná laserová dioda  $L$ . Pomocí optovláknové konektorové spojky  $S1$  je spojena s úsekem vlákna s integrovaným kolimátorem  $K1$ . Výstupní kolimovaný svazek z jednovidového vlákna je elipticky polarizovaný, prochází polarizátorem  $P$ . Po průchodu nepolarizujícím děličem svazku  $NDS$  je pomocí kolimátoru  $K2$  opět navázán do vlákna a pomocí konektorové spojky  $S2$  je vyveden z části zpracování optického signálu senzoru. Pomocí spojky  $S2$  je připojena část snímací, která obsahuje úsek snímacího vlákna  $SV$ . Vzdálený konec snímacího vlákna je pomocí konektorové spojky  $S3$  zaveden zpět do části zpracování optického signálu. Kolimátor  $K3$  usměrňuje svazek do ortokonjugačního retro reflektoru  $OKR$ . Zpětně odražený svazek je pomocí  $K3$  opět navázán do snímací části senzoru a šíří se zpět vláknem  $SV$ . Po zpětném průchodu dopadá kolimovaný svazek na nepolarizující dělič svazku  $NDS$ . Odražená část svazku je vedena do polarizujícího dělice svazku  $PDS$ . Polarizačně ortogonální signály na výstupu  $PDS$  jsou zavedeny do fotodetektorů  $FD1$  a  $FD2$ . Pro použití v senzoru jsou zvoleny standardní jednovidové optovláknové konektory typu FC. Disponují nízkým vložným útlumem, časovou stabilitou parametrů a lze je snadno laboratorně konektorovat na vlákno.

Snímací část senzoru sestává z definovaného počtu úseku jednovídného vlákna. Počet závitů vlákna snímací části je zvolen s ohledem na očekávanou velikost proudu. Maximální velikost měřeného proudu je omezena hodnotou stočení roviny polarizace svazku  $\theta_{\max} = 45^\circ$ . Nad tuto hodnotu se projevuje periodicitu výstupní polarimetrické funkce. Uvažujeme-li krajní případ použití pouze jednoho závitů vlákna a velikost Verdetovy konstanty materiálu vlákna  $V = 3,67 \text{ rad} \cdot \text{T}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  [52] můžeme odvodit teoretickou maximální velikost měřeného proudu



obr. 4.4 Schéma navrženého optovláknového senzoru.

$$I_{\max} = \frac{\theta_{\max}}{\mu_0 V N} = \frac{\pi}{4 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 3,67 \cdot 1} = 170 \text{ kA} . \quad (4.3)$$

Pro jeden závit vlákna o poloměru  $D = 5 \text{ cm}$  lze stanovit horní mezní kmitočet

$$f_h = \frac{0,44c}{2\pi R n N} = \frac{0,44 \cdot 3 \cdot 10^8}{2\pi \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 1,5 \cdot 1} = 280 \text{ MHz} . \quad (4.4)$$

Hodnota vysoce převyšuje potřebu šířky pásma měření na zdrojové části impulsního mikrovlnného generátoru (obr. 3.1). Stávajícími měřicími metodami byly zjištěny časové průběhy impulsního proudu PVG v čase  $t \in \langle 0; 70 \mu\text{s} \rangle$ . Z nich je zřejmé, že časové průběhy veličin v generátoru jsou charakteristické přechodovými ději s dobou trvání větší než  $t = 0,1 \mu\text{s}$ . Odpovídající potřebný horní mezní kmitočet senzoru pak musí dosahovat hodnoty

$$f_h = \frac{0,35}{0,1 \cdot 10^{-6}} = 3,5 \text{ MHz} , \quad (4.5)$$

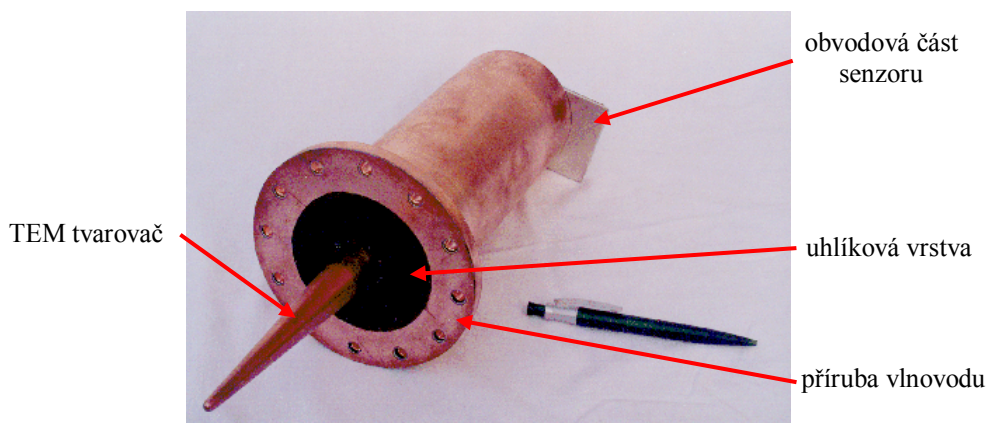
podstatně méně než je šířka pásma senzoru. Komplikovanější je situace při použití optovláknového senzoru při měření impulsního proudu, kterým je napájen mikrovlnný zdroj. Při optimální funkci tvarovacího obvodu může náběžná hrana

napětového impulsu po výboji na koncovém jiskřišti dosáhnout doby trvání  $t = 0,1$  ns. Tomu odpovídá potřebný horní mezní kmitočet senzoru  $f_h = 3,5$  GHz. Integrální senzor je pro uvedené časové relace nepoužitelný a řešením je použití klasického Faradayova rotátoru. Problematické je i řešení fotodetektorů, které musí disponovat velkou šířkou pásma.

### 4.3 REALIZACE KOMBINOVANÉHO KALORIMETRICKÉHO SENZORU

Na základě nepřímých měřicích metod byl navržen, realizován a testován kombinovaný kalorimetrický senzor okamžitého výkonu a energie impulsu. V první etapě byl proveden návrh senzoru pro měření v uzavřeném prostředí kruhového vlnovodu napájeného virkátorem. Senzor využívá jednoho aktivního prvku (absorpční vrstvy) pro realizaci obou nepřímých měřicích metod. Provedení kombinovaného kalorimetrického senzoru pro měření v uzavřeném vlnovodu je na obr. 4.5.

Obvodové zapojení sestává ze dvou částí. Pro měření energie impulsu je použit kalorimetrický most připojený přes oddělovací zesilovač k integrátoru. Realizovaný integrátor je Müllerova typu s automatickým nulováním offsetového napětí vznikajícího vlivem pomalých teplotních změn. Pro měření okamžitého výkonu impulsu je použit detektor s mikrovlnnou diodou  $D$  a nabíjecí kapacitou  $C$ . Diodový detektor je připojen k oddělovacímu zesilovači. Napájení senzoru je řešeno baterií článků umístěné rovněž ve stínícím krytu připojeném k hlavní části pomocí koaxiálních konektorů.



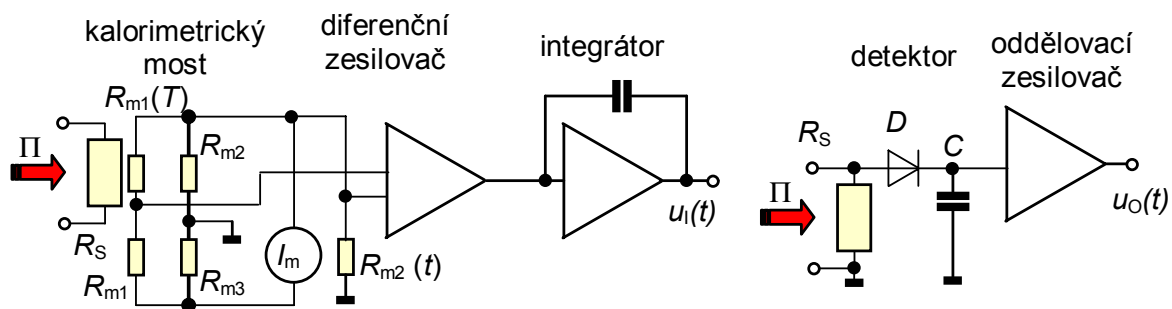
obr. 4.5 Provedení kalorimetrického senzoru pro měření v uzavřeném vlnovodu.

Pro kalibraci senzoru bylo navrženo uspořádání, kdy je senzor vybaven trychtýřovou anténou pro přizpůsobení vstupní impedance senzoru vlnové impedanci volného prostoru. Anténa byla realizována na základě numerického modelu **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Kalibrace kalorimetrického senzoru byla realizována ve zkušebních prostorách Vojenského technického ústavu

pozemního vojska (VTUPV) ve Vyškově. Zdrojem elektromagnetických impulsů byla anténa Hornova typu napájená z vysokofrekvenčního výkonového zesilovače. Aplikovány byly impulsy o frekvenci  $f = 5 \text{ GHz}$  s výkonovou úrovní  $P \in \langle 10; 100 \rangle \text{ W}$ . Změnou délky impulsu v intervalu  $t_d \in \langle 10; 1000 \rangle \text{ ms}$  byla měněna energie impulsu. Hodnota výkonu CW signálu na vstupní apertuře antény kalorimetru byla měřena pomocí sondy NARDA 8718B.

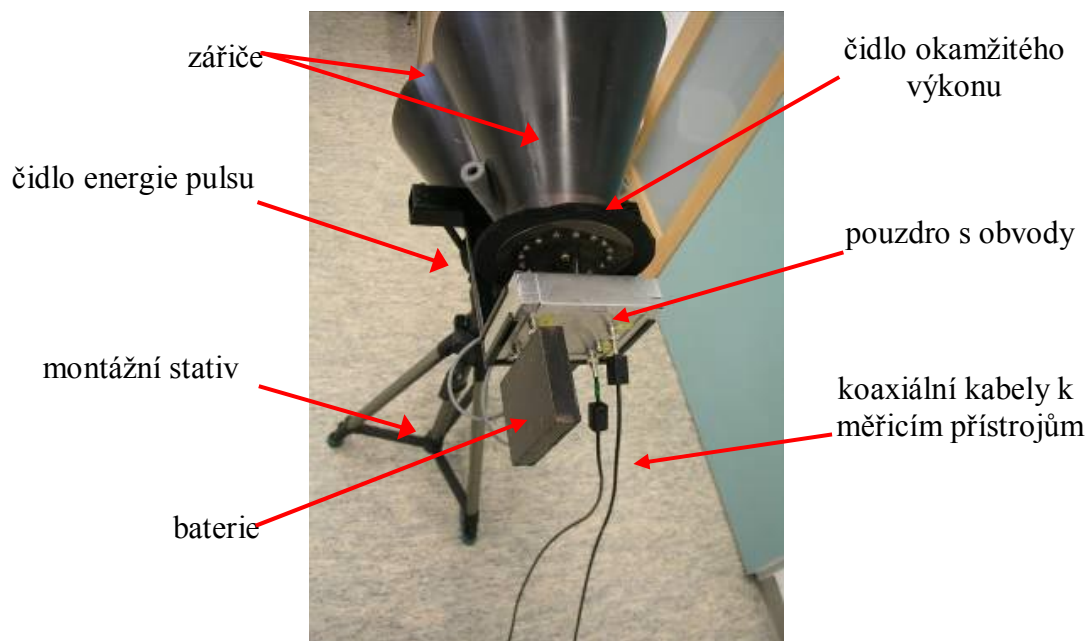
Na základě zkušeností s realizací kombinovaného kalorimetrického senzoru byla navržena jeho varianta pro měření ve volném prostoru. Podmínkou funkce senzoru je navázání elektromagnetického impulsu do snímací části senzoru pomocí vhodného přizpůsobení. Tím je anténa - zářič Hornova typu, který se osvědčil při předchozí kalibraci. V senzoru bylo dále důsledně konstrukčně odděleno čidlo okamžitého výkonu od čidla energie impulsu. Obě čidla byla vybavena vlastními zářiči.

Modifikována byla také elektronická část senzoru. Pro napájení kalorimetrického mostu je použito teplotně kompenzovaného zdroje konstantního proudu. Proud mostem je nastaven na nízkou úroveň  $I_m = 200 \mu\text{A}$ , aby nedocházelo k ohřevu termistorů vlastním protékajícím proudem. Proudem stejné velikosti je napájena referenční série termistorů stejné konfigurace, jaká je obsažena ve snímací větvi mostu. Referenční termistory jsou chráněny před ohřevem od absorpční vrstvy. Napětí na výstupu mostu a napětí na referenčních termistorech jsou přivedena na vstup diferenciálního zesilovače. Je tak potlačena citlivost na drift napětí vlivem okolních teplotních změn. Principiální schéma modifikované elektronické části senzoru je na obr. 4.6.

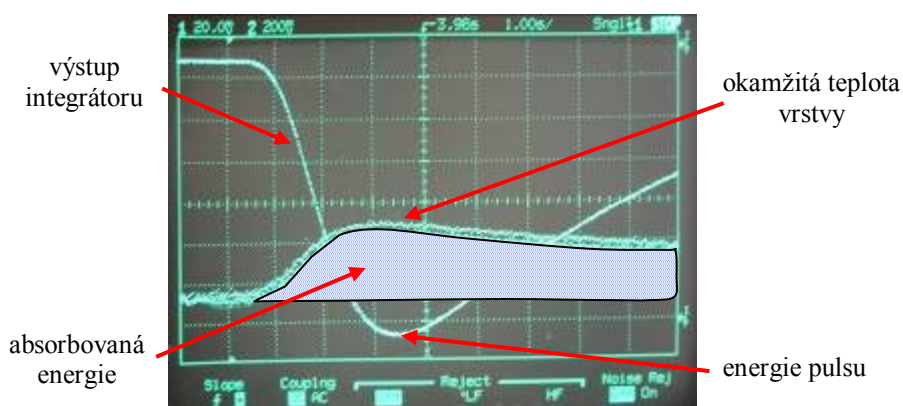


obr. 4.6 Principiální schéma modifikované elektronické části kombinovaného kalorimetrického senzoru pro měření ve volném prostoru.

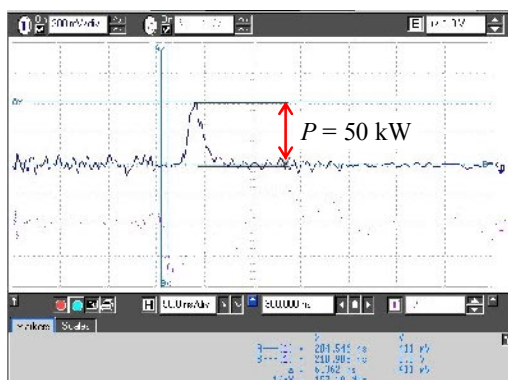
Koncepce senzoru byla navržena pro měření elektromagnetického impulsu o maximální výkonové úrovni  $P_{\max} = 300 \text{ MW}$ , době trvání impulsu  $t_d = 1-100 \text{ ns}$ . Kalorimetrický senzor byl kalibrován ve zkušebně VTUPV ve Vyškově. Příklady průběhu získaných při měření EMP pomocí kombinovaného kalorimetrického senzoru je na obr. 4.8 a obr. 4.9.



obr. 4.7 Sestava kombinovaného kalorimetrického senzoru.



obr. 4.8 Příklad průběhu změřeného senzorem energie impulsu.



obr. 4.9 Příklad průběhu změřeného senzorem okamžitého výkonu.

## 5 ZÁVĚR

V rámci disertační práce byla provedena analýza metod, které je možné použít jako nové v oblasti měření elektromagnetických polí velkého výkonu.. Pro nové metody byl ukázán způsob možné aplikace s ohledem na výhodnost řešení a související finanční náročnost.

V případě přímých měřicích metod byla navržena koncepce magneto-optického senzoru impulsního proudu. Princip senzoru byl experimentálně realizován v laboratoři v podmínkách simulujících podmínky při měření na impulsním výkonovém generátoru. V návaznosti na výsledky experimentu byly stanoveny možnosti citlivosti, linearity a šířky pásma senzoru.

Pro reálnou aplikaci bylo zvoleno optovláknové uspořádání integrálního senzoru impulsního proudu. Bylo navrženo jeho konstrukční řešení a byla provedena teoretická analýza použitých optických a elektronických komponentů.

V rámci práce byly provedeny realizační práce na kalorimetrickém senzoru. Na základě zkušeností získaných při jeho konstrukci byla navržena a realizována jeho upravená kombinovaná verze pro měření ve volném prostoru. Kombinovaný senzor byl s dobrými výsledky použit při měření na impulsním mikrovlnném zdroji.

Přínosem disertační práce v oblasti metrologie jednorázových elektromagnetických impulsů velkého výkonu jsou poznatky, diskuse a nové návrhy senzorů v oblasti metod pro měření veličin o extrémních parametrech. Předpokládá se, že navržené a realizované senzory jsou principiálně optimálním řešením pro danou problematiku.

# LITERATURA

- [1] FIALA, P. *Modelování a návrh výkonového impulsního zdroje*. Habilitační práce, Brno: FEKT VUT v Brně, 2004.
- [2] KOPP, C. *An Introduction to the Technical and Operational Aspects of the Electromagnetic Bomb*. Fairbairn: Air Power Studies Centre, Technical Report, 1996, ISBN 0-642-264155.
- [3] Internetový zdroj: <http://www.sandia.gov/impulsedpower/facilities/index.html>, 2006.
- [4] TRINKS, H., MATZ, G., SCHILLING, H. Electro-Optical System for EMP Measurement. *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*. 1980, vol. 22, no. 1.
- [5] HEATCOTE, R., GAUDOIN, J., CLARKE, R. J., NEELY, D., MEAD, M. J., PATEL, P. *Electromagnetic impulse characterization within a petawatt laser target chamber*. Central Laser Facility UK, Atomic Weapons Establishment UK, Lawrence Livermore National Laboratory USA, *Central Laser Facility Annual Report 2003/2004*, p. 29-30, 2004.
- [6] WEBER, T., HASERBORG, J. L. Measurement techniques for conducted HPEM Signals. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2004, vol. 46, no. 3, p. 431 - 438.
- [7] HWANG, E. U., KIM, B. Y. Impulsed high magnetic field sensor using polymethylmethacrylate. *Measurement Science and Technology*. 2006, vol. 17, p. 2015 - 2021.
- [8] FIALA, P., *Základní vlastnosti a koncepce převodu mechanické energie na elektrickou v impulsním zdroji, dílčí zpráva IX*. Brno: PMO-FEM, výzkumná zpráva, 2003.
- [9] DREXLER, P., KALÁB, P., STEINBAUER, M. Inductance-free high voltage divider for extreme conditions. In *Proceedings of 16th International Conference DISEE 2006*. Bratislava(Slovakia): Slovak University of Technology, 2006, p. 168 – 171. ISBN 80-227-2470-X.
- [10] DREXLER, P. *Elektronická část měřicí sondy magnetického pole s požadovanými parametry  $B_{min} = 10 \mu T$  a  $f_{max} = 1 GHz$* . Diplomová práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2004.
- [11] DORDOVÁ, L. *Speciální techniky měření elektrických nábojů*. Diplomová práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2006.
- [12] ROBERTSON, W. M. *Optoelectronic Techniques for Microwave and Millimeter-Wave Engineering*. Norwood: Artech House, 1995. 244 pages. ISBN 0-89006-711-2.
- [13] GROSS, H. *Handbook of Optical Systems, Volume 1, Fundamentals of Technical Optics*. New York: John Wiley & Sons, Ltd., 2007. 848 pages. ISBN 978-3-527-40377-6.
- [14] SZABÓ, Z. *Návrh optoelektronické metody měření koncentrace vzdušných iontů*. Diplomová práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2006.
- [15] KINGSLEY, S. A., TIAN, B., SRIRAM, S. Analog fiber optic links for EMC testing. *ITME 1999, Test Instrumentation*, 1999.
- [16] SRIRAM, S., KINGSLEY, S. A., Sensitivity Enhancements to Photonic Electric Field Sensor. *Transaction of the International Society for Optical Engineering*. 2004, vol. 5434, p. 143 - 152, ISSN 0277-786X.
- [17] SRIRAM, S., KINGSLEY, S. A., BOYD, J. T. *Electro-optical sensor for detecting electric fields*. U.S. Patent No. 5,267,336, 1993.

- [18] GABORIT, G., DUVILLARET, L., BREUIL, N., CRABOS, B., LASSERRE, J.-L. Low invasiveness, high-bandwidth vectorial pigtailed electro-optic sensors for high power electromagnetic measurements. In *Proceedings of Euro Electromagnetic International Conference EUROEM 2004*. Magdeburg (Germany), 2004.
- [19] Produktový katalog Thorlabs, Inc., 2007.
- [20] Produktový katalog Edmund Optics, GmbH, 2007.
- [21] FIALA, P., STEINBAUER, M., KUBÁSEK, R. *Testy výkonového impulsního generátoru s výstupním výkonem do 20 GW, dílčí zpráva IV/06*. Brno: UTEE FEKT VUT v Brně, výzkumná zpráva, 2006.
- [22] LENZ, J. E. A Review of magnetic field sensors. *IEEE Proceedings*. 1990, vol. 78, no. 6, p. 973 - 989.
- [23] XIAO, CH., ZHAO, L., ASADA, T., ODENDAAL, W. G., WYK, J. D. An overview of integratable current sensor technologies. In *Proceedings of 38th Industry Applications Conference IAS 2003*. vol. 78, no. 6, p. 1251 - 1258, 2003.
- [24] ARGÜESO, M., ROBLES, G., SANZ, J. *Measurement of high frequency currents with a Rogowski coil*. Department of Electrical Engineering, Universidad Carlos III de Madrid, 2005.
- [25] GAUGITSCH, M., HAUSER, H. Optimization of a magneto-optical light modulator. *Journal of Lightwave Technology*. 1999, vol. 17, vol. 12, p. 2633 - 2644.
- [26] CRAIG, A. E., CHANG, K. *Handbook of Optical Components and Engineering*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003. 1380 pages. ISBN 0-471-39055-0.
- [27] RIPKA, P. *Magnetic sensors and magnetometers*. London: IEEE; Artech House, 2001. 467 pages. ISBN 1-58053-057-5.
- [28] HAMPTON, J. R., MARTÍNEZ-ALBERTOS, J.-L., ABRUNA, H. D. Development of versatile SMOKE system with electrochemical applications. *Review of Scientific Instruments*. 2002, vol. 73, no. 8, p. 3018 - 3021.
- [29] WAYNANT, R. *Electro-Optics Handbook*. New York: McGraw-Hill Professional, 2000. 992 pages. ISBN 978-0070687165.
- [30] BORN, M., WOLF, E. *Principles of Optics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 986 pages. ISBN 978-0521642224.
- [31] RIORDAN, J. A., SUN, F. G., LU, Z. G., ZHANG, X.-C. Free-space transient magneto-optic sampling. *Applied Physics Letters*. 1997, vol. 71, p. 1452 - 1456.
- [32] KERSEY, A., BUCHOLTS, F., DANDRIGE, A. Sensitivity-bandwidth limitations in optical-fiber Faraday-rotation current sensors. *Journal of Optoelectronics*. 1988, vol. 3, no. 4, p. 323 - 332.
- [33] SOHLSTRÖM, H. *Fiber optic magnetic field sensors utilizing iron garnet materials*. Ph.D. Thesis. Stockholm: Royal Institute of Technology, 1993.
- [34] WILLIAMS, P. A., DAY, G. W., ROSE, A. H. Compensation for temperature dependence of Faraday effect in diamagnetic materials: application to optical fiber sensors. *Electronic Letters*, Vol. 72, No. 13 p. 1131 - 1132, 1991.
- [35] WILSCH, M., MENKE, P., BOSSELMAN, T. Magneto-optic current transformers for applications in power industry. In *Proceedings of 2nd Congress of Optical Sensor Technology OPTO 1996*. Leipzig (Germany), 1996, p. 237 - 242.



- [36] YOSHINO, T., MINEGISHI, K., NITTA, M. A very sensitive Faraday effect current sensor using a YIG/ring-core transformer in a transverse configuration. *Measurement Science and Technology*. 2001, vol. 12, p. 850-853.
- [37] YI, B., CHU, C. B., CHIANG, K.S., CHUNG, S. H. New design of optical electric-current sensor for sensitivity improvement. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*. 2000, vol. 49, no. 2.
- [38] YOSHINO, T., YOKOTA, M., AOKI, K., YAMAMOTO, K., ITOI, S., OHTAKA, M. Fiber linked Faraday effect current sensor by use of a flint glass cell with dielectric-coated retardation-compensated total reflection surfaces. *Applied Optics*. 2002, vol. 41, no. 28, p. 5963 - 5968.
- [39] ANTONOV, S. N. Sensitive fiber-optic magnetic field transducer. *Soviet Physics Technology*. 1991, vol. 36, no. 3, p. 357 - 358.
- [40] ULRICH, R., RASHLEIGH, S. C., EICKHOFF, W. Bending-induced birefringence in single-mode fibers. *Optical Letters*. 1980, vol. 5, p. 273 - 275.
- [41] TANG, D., ROSE, A. H., DAY, G. W., ETZEL, S. M. Annealing of linear birefringence in single-mode fiber coils: Applications to optical fiber current sensors. *Journal of Lightwave Technology*. 1991, vol. 9, no. 8, p. 1031 - 1037.
- [42] ROSE, A., REN, Z. F., DAY, G. W. Twisting and annealing optical fiber for current sensors. *Journal of Lightwave Technology*. 1996, vol. 14, vol. 11, p. 2492 - 2498.
- [43] LAMING, R. I., PAYNE, D. N. Electric current sensors employing spun highly birefringent optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*. 1989, vol. 7, no. 12, p. 2084 - 2094.
- [44] SCHAMILOGLU, E. High-Power Microwave Sources and Applications. In *Proceedings of IEEE MTTT International Microwave Symposium and Exhibition*. Forth Worth, Texas (USA), 2004.
- [45] BARKER, R. J., SCHAMILOGLU, E. *High-Power Microwave Sources and Technologies*. Boston: Wiley-IEEE Press, 2001. 528 pages. ISBN 978-0-7803-6006-8.
- [46] PFEFFER, M., KASAL, M. Automatický imimpulsní reflektometr. *Sdělovací technika*. 1986, vol. 10/11.
- [47] FIALA, P., DREXLER, P. *Senzor pro měření energie ultrakrátkého elektromagnetického imimpulsu,  $P = 0,1 - 1000$  J*. Brno: UTEE FEKT VUT v Brně, výzkumná zpráva, 2005.
- [48] FIALA, P. *Vyhodnocení modelovaných a měřených výsledků výkonového impulsního generátoru, dílčí zpráva III-A/03*. Brno: UTEE FEKT VUT v Brně, výzkumná zpráva, 2003.
- [49] DĚDEK, L., DĚDKOVÁ, J. *Elektromagnetismus*. Brno: VUTIUM, 1998. 229 pages. ISBN 80-214-1106-6.
- [50] ZHENGPING, W., CHONG, K., ZONGJUN, H., XUEYUAN, Z. Faraday mirror-typed optical current transformers and its theoretical analysis. *Optics and Laser Technology*. 2007, no. 39, p. 368 - 371.
- [51] SANTOYO-MENDOZA, F., BARMENKOV, Y. O. Faraday plasma current sensor with compensation for reciprocal birefringence induced mechanical perturbations. *Journal of Applied Research and Technology*. 2003, vol. 1, no. 2, p. 157 - 163.
- [52] WILLIAMS, P. A., ROSE, A. H., DAY, G. W., MILNER, T. E., DEEER, M. N. Temperature dependence of the Verdet constant in several diamagnetic glasses. *Applied Optics*. 1999, vol. 30, no. 10.

# ŽIVOTOPIS

Jméno: Petr Drexler

Narozen: 4. října 1980 v Moravské Třebové

## Vzdělání

od 2004	doktorské studium na FEKT VUT v Brně, Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky Téma studia: „Metody měření ultrakrátkých neperiodických elektromagnetických imimpulsů.“
2003-2004	AMI Semiconductor
1999-2004	Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Obor Elektronika a sdělovací technika
1992-1999	gymnázium Moravská Třebová

Petr Drexler absolvoval inženýrské studium na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně ve studijním oboru Elektronika a sdělovací technika. Zpracoval diplomovou práci na Ústavu radioelektroniky ve spolupráci s Ústavem teoretické a experimentální elektrotechniky na téma: „Elektronická část měřicí sondy magnetického pole s požadovanými parametry  $B_{\min} = 10 \mu\text{T}$ ,  $f_{\max} = 1 \text{ GHz}$ . Během studia absolvoval stáž ve firmě AMI Semiconductor, kde byl později zaměstnán, jako laboratorní pracovník pro testování a ověřování prototypů zákaznických integrovaných obvodů.

Od roku 2004 je Petr Drexler studentem doktorského studijního programu na Ústavu teoretické a experimentální elektrotechniky (UTEE). Tématem studia jsou metody měření ultrakrátkých neperiodických elektromagnetických impulsů. Jeho odborný zájem je zaměřen na využití elektrooptických a magnetooptických metod pro měření rychlých impulsních elektromagnetických dějů. V návaznosti se zabývá návrhem a konstrukcí optoelektronických obvodů, vlastnostmi elektro/magnetooptických senzorů a využitím optických komponentů. Podílí se na úlohách řešených na UTEE, které se zabývají impulsními výkonovými a mikrovlnnými zdroji. Petr Drexler se podílí na výuce předmětů Elektrotechnika I a II, Měření v elektrotechnice a Programování a počítače 2.

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the aspects of methods for pulsed high-level EM quantities measurement. Methods for current and voltage measurement in pulsed power generator and power measurement in pulse microwave generator are discussed. New approaches to single-shot measurement methods application are proposed. The theoretical analysis of suitable sensor designs is performed.

The magneto-optic measurement method has been experimentally realized. On the basis of experimental results a fiber-optic current sensor has been designed and theoretically analyzed.

For identification and measurement of the free-space electromagnetic pulse a combined calorimetric sensor has been designed and built.