



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta textilní



ANALÝZA ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ V PROCESU ELEKTRICKÉHO ZVLÁKŇOVÁNÍ

Diplomová práce

Studijní program: N3957 – Průmyslové inženýrství
Studijní obor: 3901T073 – Produktové inženýrství
Autor práce: **Bc. Jan Ondřich**
Vedoucí práce: Ing. Pavel Pokorný, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Textile Engineering ■

ANALYSIS OF ELECTRICAL PARAMETERS IN ELECTROSPINNING

Diploma thesis

Study programme: N3957 – Industrial Engineering
Study branch: 3901T073 – Product Engineering

Author: **Bc. Jan Ondřich**
Supervisor: Ing. Pavel Pokorný, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Ondřich**
Osobní číslo: **T13000163**
Studijní program: **N3957 Průmyslové inženýrství**
Studijní obor: **Produktové inženýrství**
Název tématu: **Analýza elektrických parametrů v procesu elektrického zvlákňování**
Zadávací katedra: **Katedra hodnocení textilií**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s principy elektrostatického zvlákňování.
2. Seznamte se s metodou měření průběhu elektrického proudu kapalinovou tryskou při elektrostatickém zvlákňování.
3. Navrhňte řešení pro měření průběhu elektrického proudu kapalinovou tryskou v případě napájení střídavým zdrojem.
4. Pokuste se navrženým řešením provést porovnání získaných průběhů elektrického proudu kapalinovou tryskou při napájení zdrojem vysokého stejnosměrného napětí s průběhem elektrického proudu kapalinovou tryskou při napájení zdrojem vysokého střídavého napětí. Pro srovnání použijte vodný roztok polyvinylalkoholu a lihový roztok polyvinylbutyralu.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: 50 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- [1] JIRSÁK, Oldřich - RŮŽIČKOVÁ, Jana - LUKÁŠ, David. Production of properties of Polymer nanofibres. Brno: In NANO 03, 21.10.2003-23.10.2003. ISBN 80-214-2527-X.
- [2] KREBSOVÁ, Milada. Nauka o polymerech. Liberec: VŠST, 1978.
- [3] AKOPJAN, Aleksandr Arkad'jevič. Technika vysokého napětí 1. Praha: St. nakl. techn. lit., 1956.
- [4] TRUHANOVÁ, Alena. Průběh elektrického proudu vláknem polymerního roztoku při elektrostatickém zvlákňování. Liberec: TUL, 2008.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Pavel Pokorný, Ph.D.

Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů

Konzultant diplomové práce:

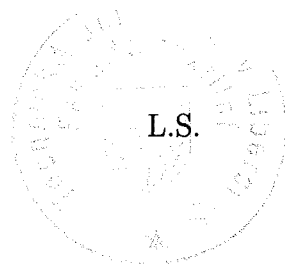
Ing. Miroslav Novák, Ph.D.

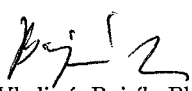
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání diplomové práce: 1. října 2014

Termín odevzdání diplomové práce: 14. května 2015


Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka




doc. Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 9. března 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Děkuji vedoucímu této práce panu Ing. Pavlu Pokornému, Ph.D. za příkladné vedení, podporu a za jasné stanovení cílů, konzultantovi panu Ing. Miroslavu Novákovi, Ph.D. za připomínky a návrhy na konstrukční vylepšení a oponentům za kritický přístup a závěrečná stanoviska.

Děkuji společnostem Texas Instruments, Analog Devices, Maxim Integrated, Linear Technology a ABB s.r.o. za poskytnutí vzorků klíčových součástek a potřebných informací.

Děkuji Technické univerzitě v Liberci za dobré studijní zázemí, zejm. katedrám KHT a KNT. V neposlední řadě děkuji své rodině a přátelům za podporu ve studiu.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou elektrostatického zvlákňování, což je metoda přípravy tenkých umělých vláken vhodných pro průmyslové využití. V silném elektrickém poli dochází za určitých specifických podmínek ke vzniku tenkých vláknenných útvarů z povrchu kapaliny s roztokem polymeru. K tomu účelu je v současnosti běžně používán stejnosměrný elektrický proud. Ukazuje se ale, že střídavý proud má vyšší potenciál průmyslového využití z důvodu vyšší výtěžnosti a efektivity výroby, proto je metoda elektrického zvlákňování střídavým proudem předmětem vědeckého zkoumání. V tomto procesu je požadováno měřit a zaznamenávat průběh elektrického proudu.

Tato práce se zaměřuje konstrukční aspekty vhodného měřicího zařízení, které měření a záznam průběhu elektrického proudu umožní. Dále uvádí možnosti použití takového měřicího přípravku.

Závěrem se práce zabývá analýzou velikosti a tvaru elektrických proudů vznikajících při elektrostatickém zvlákňování během experimentů probíhajících na pracovišti KNT FT TUL.

Klíčová slova

Elektrické zvlákňování, vlákna, měření, elektrický proud, vysoké napětí, nanotechnologie

Abstract

This diploma thesis deals with the subject of creating fiber in electrostatic field, a method known as Electrospinning, that is forming thin synthetic fiber suitable for various industrial utilization.

Under certain specific conditions submicron fibers are formed on the surface of a liquid with a polymer solution in a strong electrostatic field. Direct current is generally applied for this purpose. However, it seems that alternating current has greater potential for industrial utilization due to higher yield and efficiency in production. Consequently the alternating current method of creating fibers is currently the subject of scientific research. In this process it is necessary to carefully measure and record the level and the form of the electric current.

This study deals with the matter of constructing suitable equipment that will make the measurement and the recording of the various levels of the electric current possible. It also considers the possibilities of utilizing such a measuring device.

In conclusion the analysis of the amplitude and the form of electric currents resulting during the Electrospinning process is carried out as it occurred during experiments conducted in the KNT FT TUL laboratory.

KEYWORDS

Electrospinning, Electric Current, Measurement, High Voltage, Fiber, Nanotechnology

Obsah

Seznam zkratk a symbolů	9
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	12
1 ÚVOD	13
2 ROZBOR.....	15
2.1 Elektrostatické zvlákňování	15
2.2 Měření proudu při zvlákňování.....	16
2.3 Předchozí výzkumy.....	17
3 BEZPEČNOST	21
4 MĚŘÍCÍ PŘÍPRAVEK.....	23
4.1 Požadavky	24
4.2 Simulace elektrického pole	25
4.3 Vývojová stádia	27
4.4 Přenos signálu	29
4.5 Konstrukce	30
4.6 Použití přípravku.....	45
4.7 První světlo	55
4.8 Koronové výboje.....	64
5 REÁLNÉ MĚŘENÍ.....	68
5.1 Měření AC zvlákňování.....	69
5.2 Měření DC zvlákňování.....	72
5.3 Analýza dat	75
5.4 Vyhodnocení výsledků	79
6 DALŠÍ VÝZKUM	80
7 ZÁVĚR	82
Literatura a odkazy	84
Použité vybavení	85
Příloha A – Blokové schéma zapojení měřidla	86
Příloha B – Principiální schéma zapojení experimentu	87

Příloha C1 – Elektrické schéma zapojení.....	88
Příloha C2 – Elektrické schéma zapojení.....	89
Příloha C3 – Elektrické schéma zapojení.....	90
Příloha D1 – Realizované zařízení	91
Příloha D2 – Realizované zařízení	92
Příloha D3 – Realizované zařízení	93
Příloha E – Obsah CD	94

Seznam zkratek a symbolů

3D	<i>3dimenzionální</i>
A	<i>Ampere</i>
App	<i>Ampere peak-peak</i>
AC	<i>Alternating Current</i>
AD	<i>analogově-digitální</i>
ADC	<i>analogově-digitální konvertor</i>
AKU	<i>akumulátor</i>
AM	<i>Amplitude-Modulation</i>
b	<i>bit</i>
Bit/s	<i>bit/second</i>
cca	<i>circa</i>
CD	<i>Compact Disc</i>
cm	<i>centi-meter</i>
Cu	<i>Cuprum, Copper</i>
DA	<i>Digitálně-analogový</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DPS	<i>deska plošných spojů</i>
ef	<i>efektivní hodnota</i>
el.	<i>elektrický</i>
F	<i>Farad</i>
FEMM	<i>Finite Element Method Magnetics</i>
FT	<i>Fakulta textilní</i>
GBit/s	<i>Giga-Bit/second</i>
GDT	<i>Gas Discharge Tube</i>
GΩ	<i>Giga-Ohm</i>
H ₂ O	<i>voda</i>
HW	<i>Hardware</i>
Hz	<i>Hertz</i>
IR	<i>Infra-Red</i>
kBit/s	<i>kilo-bit/second</i>
kHz	<i>kilo-Hertz</i>
KHT	<i>Katedra hodnocení textilií</i>
KNT	<i>Katedra netkaných textilií a nanovlákných materiálů</i>
kΩ	<i>kilo-Ohm</i>
kSa/s	<i>kilo-Samples/second</i>
kV	<i>kilo-Volt</i>
kVac	<i>kilo-Volt-alternating</i>
Li-pol, LiPo	<i>lithium-polymerový akumulátor</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
μA	<i>micro-Ampere</i>

μ App	<i>micro-Ampere peak-peak</i>
μ m	<i>micro-meter</i>
μ s	<i>micro-second</i>
m	<i>meter</i>
mA	<i>milli-Ampere</i>
mApp	<i>milli-Ampere peak-peak</i>
MATLAB	<i>MatrixLab, ©MathWorks, Inc.</i>
MBit/s	<i>Mega-bit/second</i>
MB	<i>Mega-Byte</i>
MHz	<i>Mega-Hertz</i>
M Ω	<i>Mega-Ohm</i>
ms	<i>milli-second</i>
MSa/s	<i>Mega-Samples/second</i>
mm	<i>milli-meter</i>
mV	<i>milli-Volt</i>
mVpp	<i>milli-Volt peak-peak</i>
MV	<i>Mega-Volt</i>
MV/m	<i>Mega-Volt/meter</i>
nm	<i>nano-meter</i>
OS WIN	<i>operační systém Windows</i>
OZ	<i>operační zesilovač</i>
Ω	<i>Ohm</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
pF	<i>pico-Farad</i>
POF	<i>Polymer fiber cable</i>
PVA	<i>polyvinylalkohol</i>
PVB	<i>polyvinylbutyral</i>
s	<i>second</i>
Sa/s	<i>Samples/s</i>
TUL	<i>Technická univerzita v Liberci</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UV	<i>Ultra Violet</i>
V	<i>Volt</i>
Vpp	<i>Volt peak-peak</i>
VN	<i>Vysoké Napětí, příd. vysokonapěťový</i>
VVN	<i>Velmi Vysoké Napětí</i>
W	<i>Watt</i>
X	<i>reaktance</i>
ZD	<i>Zenerova dioda</i>

Seznam obrázků

číslo obrázku – popis	strana
1. Zjednodušené schéma principu elektrostatického zvlákňování	15
2. Zapojení obvodu pro měření průběhu elektrického proudu	16
3. Změřený průběh proudu stejnosměrného elektrostatického zvlákňování	17
4. Možné zapojení obvodu při střídavém zvlákňování bez kolektoru	18
5. Proud a napětí na primární straně transformátoru, bez zvlákňování	19
6. Proud a napětí na primární straně transformátoru, zvlákňování	20
7. Princip měření proudu na VN hladině, galvanické oddělení	24
8. Simulace rozložení intenzity elektrického pole v okolí elektrody	25
9. Simulace, přítomen kovový prvek s nulovým potenciálem	26
10. Simulace pole – detail intenzity okolo kapky roztoku	26
11. První verze návrhu	27
12. Finální verze návrhu	29
13. Transformátor KGUG36, výrobce ABB	30
14. Princip regulace výstupního napětí	30
15. Náhradní model transformátoru	31
16. Uvažované zapojení transformátoru	31
17. Elektrické proudy v obvodu	32
18. Nebezpečná oblast VN	33
19. Blokové schéma experimentu se zařazeným měřidlem proudu	34
20. Měřidlo má na kostře krabičky připojen jeden pól rezistoru	34
21. Umístění snímacího rezistoru	35
22. Ochrana proti přepětí – Gas Discharge Tube	36
23. Blokové schéma zapojení vstupu	36
24. Voltampérová charakteristika ochranné diody – transilu	37
25. Princip omezení přepětí integrovanými ochrannými diodami	37
26. Frekvenční charakteristika měřicího řetězce	38
27. USB osciloskop SainSmart DDS140	39
28. USB osciloskop OWON VDS2062	39
29. Srovnání možností jednotlivých typů osciloskopů	40
30. Blokové schéma zapojení celého měřidla	40
31. Blokové schéma napájecího zdroje	41
32. Dálkové ovládání	42
33. Standard JIS F05 – konektor optického kabelu	42
34. Elektrické schéma zapojení dálkového ovládacího modulu	43
35. Snímek rozpracovaného návrhu desky plošných spojů	43
36. Jednotlivé díly měřicího přípravku	44
37. Vnitřní uspořádání měřidla	44
38. Blokové schéma zařízení	45
39. Spuštěná ovládací aplikace	49
40. Spuštěná ovládací aplikace – aktivace menu a nastavení	49

číslo obrázku – popis	strana	
41.	Elektrické schéma experimentu	55
42.	Kryt měřicího zařízení je připojen na VN	56
43.	Zjednodušené blokové schéma experimentu	57
44.	Bez zvlákňování, plná vzorkovací rychlost 250 MSa/s	58
45.	Se zvlákňováním, plná vzorkovací rychlost 250 MSa/s	58
46.	Bez zvlákňování	59
47.	Se zvlákňováním	59
48.	Oblast zájmu s několika impulzy při zvlákňování	60
49a.	Zvětšená oblast zájmu s několika impulzy při zvlákňování	60
49b.	Zvětšená oblast zájmu s jedním impulzem při zvlákňování	61
49c.	Detail proudového impulsu při zvlákňování	61
50.	Frekvenční spektrum záznamu při zvlákňování střídavým proudem	63
51.	Frekvenční spektrum záznamu BEZ zvlákňování	63
52.	Pohled na krabičku měřidla	64
53.	Zkonstruované a zakrytované měřidlo	65
54.	Měřidlo doplněné protikoronovým opatřením	65
55.	Detail zvlákňovací elektrody v klidu (nulové napětí)	66
56.	Detail zvlákňovací elektrody se zapnutým zdrojem	66
57.	Konfigurace experimentů – v obou případech stejná elektroda	68
58.	Principiální blokové schéma AC experimentu (bez kolektoru)	69
59.	Pozadí 36 kV AC bez připojené elektrody	70
60.	Pozadí 36 kV AC s elektrodou (1 mA a 2 ms na dílek)	70
61.	Pozadí 36 kV AC e elektrodou – detail	71
62.	PVA 39 kV AC (50 μ A a 2 ms na dílek)	71
63.	PVB 27 kV AC (20 μ A a 2 ms na dílek)	72
64.	Principiální blokové schéma DC experimentu	72
65.	Pozadí 30 kV DC s elektrodou	73
66.	Pozadí 48 kV DC s elektrodou	73
67.	Pozadí 48 kV DC s elektrodou – vyfiltrováno	74
68.	DC PVA 48kV	74
69.	DC PVB 30kV	75
70.	48 kV DC bez zvlákňování (200 μ A a 500 ms na dílek)	75
71.	48 kV DC s polymerem	76
72.	Porovnání filtrovaných průběhů	76
73.	Proudová špička v čase 2 s	77
74.	Proudová špička v čase 2 s – detail	77
75.	Výsledek FFT signálu proudu bez zvlákňování	78
76.	Výsledek FFT signálu proudu při probíhajícím zvlákňování	78

Seznam tabulek

číslo tabulky – popis	strana	
1.	Standardizované minimální rozměry zóny přiblížení	22
2.	Technické parametry zařízení	53

1 ÚVOD

Tenká přírodní nebo umělá vlákna jsou základními prvky, ze kterých sestávají rozličné textilní útvary vhodné pro nejrůznější využití. Typicky se jedná o textilie oděvního průmyslu nebo o produkty používané v jiných aplikacích, kterými jsou např. filtry, tlumící prvky apod. Zásadní vliv na chování výsledného produktu má samotné vlákno, mezi jehož nejdůležitější popisné parametry patří tzv. „jemnost“ (nejčastěji značíme T [g/km]), což je vlastnost přímo související s jeho průměrem. Člověk se snaží napodobovat vlákna z přírodních zdrojů a vytváří vlákna umělá, která mohou v určitých aspektech nabídnout lepší užité vlastnosti pro konkrétní aplikaci.

Elektrostatické zvlákňování je jedna z metod přípravy umělých textilních vláken, která mají v poslední době rostoucí význam. Submikronová vlákna o tloušťce stovek nm mají široké průmyslové uplatnění a jejich aplikační možnosti se rychle rozvíjejí. Studium podmínek jejich výroby a uplatnění těchto poznatků je vhodnou cestou k optimalizaci výrobních procesů a jejich nákladů nejen v textilním průmyslu.

Spolu s výzkumem vlastností samotných experimentálně připravených vzorků je zapotřebí také sledovat a zkoumat podmínky jejich výroby, mezi které patří mj. vlivy prostředí, druh a koncentrace polymeru v roztoku, ale i velikost a intenzita elektrického proudu, který se na procesu zvlákňování přímo podílí. Silné elektrické pole je v tomto případě nutnou podmínkou přípravy takových vláken. V tomto výzkumu je proto nutné sledovat elektrické poměry napětí a tvary příslušných proudů procházejících zvlákňovací elektrodou, resp. samotnou tryškou, kde vlákna vznikají.

Na katedře netkaných textilií a nanovláknenných materiálů (dále jen „KNT“) existuje pracoviště, které se výzkumem zabývá. Zkoumají se zde mj. procesy elektrického zvlákňování popsané výše. Pro hlubší proniknutí do podmínek přípravy vláken touto metodou je zapotřebí existující experiment doplnit o zařízení, které umožní měření a záznam velikosti a tvaru elektrického proudu.

Současný experiment sestává z vysokonapěťového (dále jen „VN“) zdroje, který poskytuje elektrický potenciál potřebný ke splnění základních podmínek výše uvedené metody, tj. dostatečně vysoké napětí, které lze regulovat.

S provozem tohoto experimentu úzce souvisí otázka bezpečnosti obsluhy a ochrana zdraví a majetku. VN zdroj, který je nutnou součástí experimentu, je pro obsluhu velice nebezpečný stroj a už i zde byla dříve přijata určitá bezpečnostní opatření, která musí být při provozu dodržována. Protože popisovaný měřicí přípravek se stane nedílnou součástí experimentu, musí splňovat určité bezpečnostní požadavky ze strany obsluhy.

Současné poznatky z předchozích výzkumů dávají do souvislosti vznik vlákna a určitou změnu toku proudu v elektrickém obvodu. Při vzniku každého jednotlivého vlákna, resp. při začátku procesu zvlákňování, nastane charakteristická změna proudového odběru impulzního charakteru. Velikost a tvar tohoto impulzu vypovídá mnohé o procesu tvorby vláken.

Měřicí přípravek by měl umožnit tyto změny ve tvaru a intenzitě elektrického proudu zachytit a zaznamenat pro další analýzu, přitom nesmí zásadně ovlivnit podmínky samotného procesu.

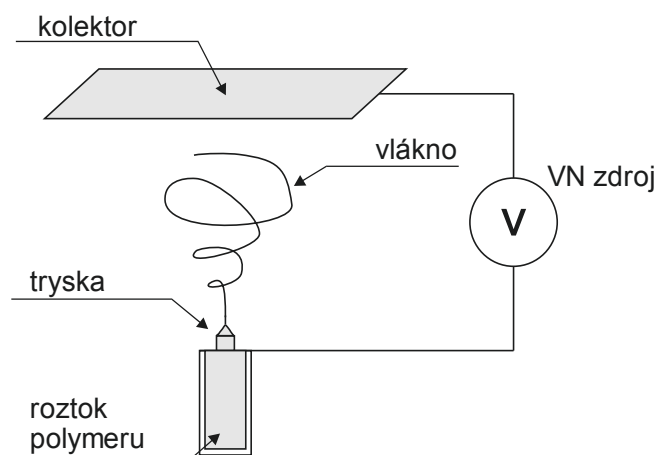
Předpokládá se, že současným sledováním tvorby vláken na zvlákňovací elektrodě a jemu odpovídajícímu tvaru elektrického proudu lze dojít k novým komplexním závěrům týkajícím se vhodných podmínek této metody, které mohou být následně využity v průmyslu.

2 ROZBOR

2.1 Elektrostatické zvlákňování

Elektrické zvlákňování můžeme rozdělit na zvlákňování z roztoku nebo z taveniny. Liší se sice podoba materiálu, který do procesu vstupuje, v obou případech je ale zapotřebí působení silného elektrického pole, které je příčinou „vytažení“ tenkého vlákna z povrchu.

Za určitých vhodných okolností (silné elektrické pole, roztok polymeru v dané koncentraci a další podmínky) dochází k destabilizaci povrchu hladiny a ke vzniku tzv. „kapalinové trysky“. Schéma experimentu je naznačeno na Obr. 1.



Obr. 1. Zjednodušené schéma principu elektrostatického zvlákňování

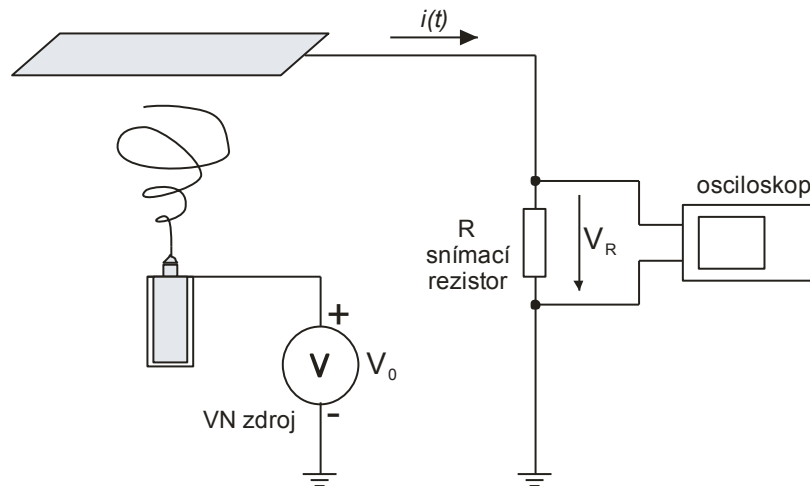
V roce 1914 byl poprvé pozorován vznik kapalinové trysky a tento jev byl popsán [1]. Z tohoto objevu vycházela metoda přípravy umělých vláken. Struktura, která vznikne z povrchu kapaliny, se často označuje jako „Taylorův kužel“. Taylor popsal chování kapaliny v těchto rovnovážných stavech a kuželovitý tvar počátku vznikajícího vlákna [2]. V roce 2005 byla metoda úspěšně uvedena do průmyslové výroby [3], kdy použitá technologie již umožnila efektivní produkci submikronových vláken v dostatečném množství.

Často využívanou metodou je průmyslová příprava vláken pomocí stejnosměrného velmi vysokého napětí (dále jen „VVN“) v řádu desítek kV. Destabilizace povrchu kapaliny se vyskytuje v místech s vysokým gradientem elektrického pole.

Současnými postupy lze připravovat vlákna o průměrech v řádu stovek nm. Některé prameny takto vyrobená vlákna označují jako „nanovlákna“. Nejčtenější průměry elektricky připravených vláken jsou od 300 nm do 1 μm . Protože oblast nanotechnologií předpokládá, že alespoň jeden rozměr nepřevyšuje velikost cca 10 nm, je běžnější ustálené označení „submikronová vlákna“, tj. vlákna o průměrech pod 1 μm .

2.2 Měření proudu při zvlákňování

Při elektrostatickém zvlákňování je z vysokonapětového zdroje (dále jen „VN“) odebírán elektrický proud, který přímo souvisí s vlastním procesem tvorby vláken. Za účelem dalších úvah a souvisejících výzkumů je zapotřebí tento proud měřit a analyzovat, aby bylo možné identifikovat a rozeznat od sebe odpovídající fáze zvlákňování. Práce [4] popisuje výzkum chování elektrického proudu v procesu, kdy byl průběh proudu měřen a zaznamenáván způsobem dle Obr. 2.



Obr. 2. Zapojení obvodu pro měření průběhu elektrického proudu [4]

Uvedený princip snímání proudu je založen na měření úbytku napětí osciloskopem. Úbytek napětí V_R vzniká průchodem proudu I snímacím rezistorem R . Svorkové napětí zdroje v klidu rovno napětí mezi jehlou (tryskou) a kolektorem. Jakmile obvodem začne protékat elektrický proud I , na rezistoru R vzniká úbytek napětí V_R , dle Ohmova zákona přímo úměrný intenzitě proudu I . Tedy

(2.1)

$$V_R = I \cdot R$$

kde

V_R je napětí ve [V]

I je proud v [A]

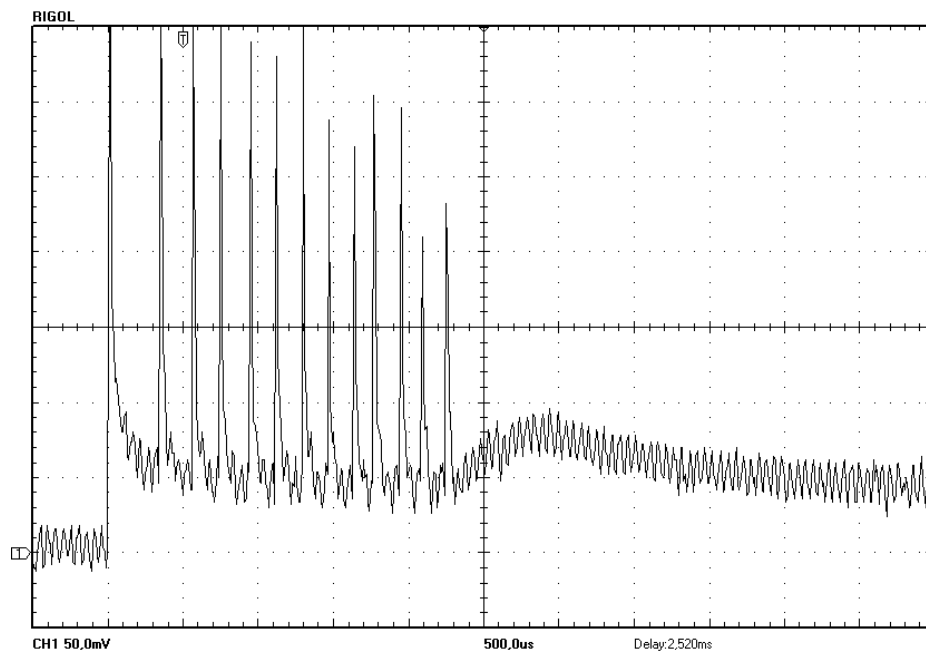
R je reálná hodnota rezistoru v [Ω]

Celým obvodem protéká stejný elektrický proud I , vychází se tedy z předpokladu, že úbytek napětí na rezistoru R je tomuto proudu ekvivalentní. Z výše uvedeného lze vyvodit, že ze změřeného průběhu napětí na R lze následně prostým výpočtem (vynásobením konstantou) jednoznačně odvodit průběh proudu obvodem.

2.3 Předchozí výzkumy

Během experimentu [4] při stejnosměrném zvlákňování, kdy bylo napětí VN zdroje V_1 stejnosměrné a o přibližně konstantní velikosti, byly získány záznamy průběhu proudu, viz Obr. 3. Průběh proudu odpovídá experimentu s 8% vodným roztokem PVA. Podmínky měření byly:

- $R=10\text{ k}\Omega$
- jedno dělení na osciloskopu je 50 mV/d a odpovídá tak proudu $I=5\text{ }\mu\text{A/d}$,
- nula je posunuta o 50 mV výše (je naznačena kurzorem),
- jeden dílek na časové ose odpovídá reálnému času $500\text{ }\mu\text{s}$.

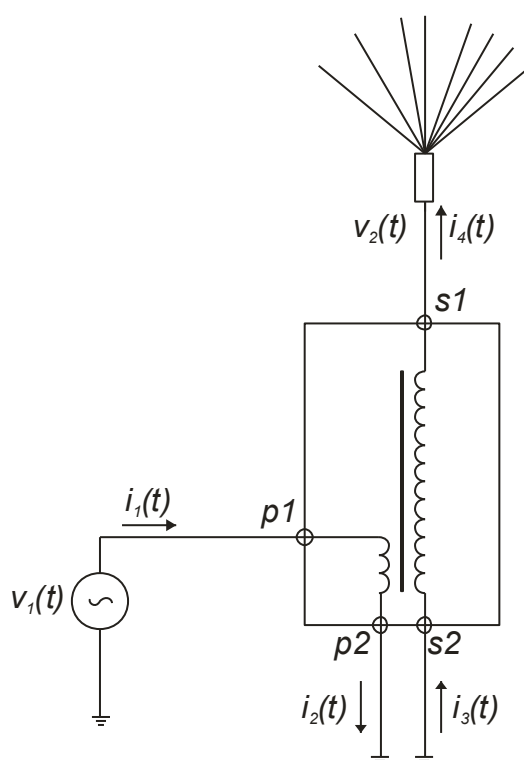


Obr. 3. Změřený průběh proudu během procesu stejnosměrného elektrostatického zvlákňování, zdroj: [4]

V průběhu na Obr. 3 je patrný rušivý signál – zvlnění o velikosti cca 25 mVpp v celém oscilogramu, které nejspíše nepochází z vlastního experimentu. Jedná se o signál s periodou cca $50\text{ }\mu\text{s}$, což odpovídá frekvenci cca 20 kHz . Pro analýzu průběhu proudu v obvodu jsou ale důležité výrazné proudové špičky o velikosti desítek μA , kterých je zde 13 a dále střední hodnota signálu v jednotlivých fázích experimentu. V čase nula (na začátku oscilogramu) je střední hodnota proudu přibližně nulová, je zde přítomen pouze uvedený rušivý signál. Vlastní zvlákňování nastalo v čase $500\text{ }\mu\text{s}$ první výraznou proudovou špičkou. Od tohoto času proces zvlákňování probíhal a střední hodnota proudu se zvýšila cca na $5\text{ }\mu\text{A}$.

Elektrické zvlákňování může ale probíhat i se střídavým zdrojem VN. Elektrické napětí mezi jehlou a kolektorem pak periodicky mění polaritu. Kolektor nemusí být vůbec použit, protože jeho úlohu zastává okolí zvlákňovací elektrody. Pouze je nutné vznikající vlákna vhodným způsobem zachytávat. Střídavé zvlákňování může nabídnout vyšší výtěžnost výrobního procesu, proto je předmětem vědeckého zkoumání.

Obvyklý způsob zapojení takového experimentu je naznačen na následujícím Obr. 4. Tato metoda jako zdroje obvykle využívá transformátor, který je vhodným a osvědčeným zdrojem VN. Měření proudu při střídavém zvlákňování je, vzhledem k jiné konfiguraci obvodu, poněkud náročnější úlohou než u stejnosměrného principu. Je to způsobeno omezenými možnostmi, kam do obvodu vlastní měřidlo proudu připojit, v tomto případě, kam zapojit rezistor R s osciloskopem.



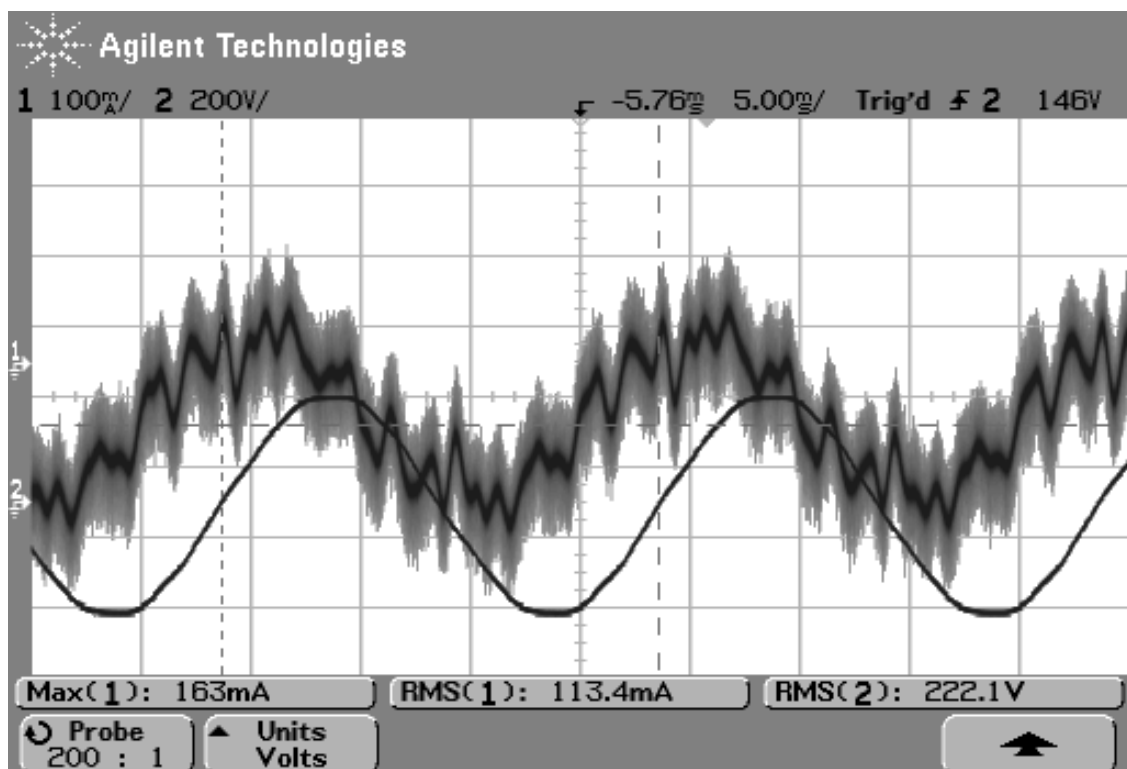
Obr. 4. Možné zapojení obvodu při střídavém zvlákňování bez kolektoru

V konfiguraci experimentu odpovídající Obr. 4 je možné sledovat 4 různé proudy. Z hlediska zkoumání průběhu proudu vznikajícího v souvislosti se zvlákňováním je zapotřebí měřit proud $i_4(t)$, protože ten přímo prochází zvlákňovací elektrodou. V ideálním případě by bylo možné měřit $i_3(t)$ a předpokládat, že $i_3(t) = i_4(t)$. Protože ale pracujeme s reálnými prvky, nelze tak úlohu postavit. VN transformátor, vodiče a ostatní obvodové prvky mají nejrůznější parazitní veličiny, jejichž důsledkem je $i_3(t) \neq i_4(t)$. Transformátor navíc nemá ideální frekvenční charakteristiku.

Z uvedených důvodů nelze měření průběhu proudu realizovat na „studeném“ konci sekundárního vinutí transformátoru měřením $i_3(t)$ na svorce s_2 , ale je nutné měřit $i_4(t)$ přímo na vývodu s_1 . Důsledkem tohoto závěru je obtížné zajištění bezpečnosti pro obsluhu experimentu a vysoké riziko poškození měřicího vybavení, neboť na svorce s_1 je plný VN potenciál.

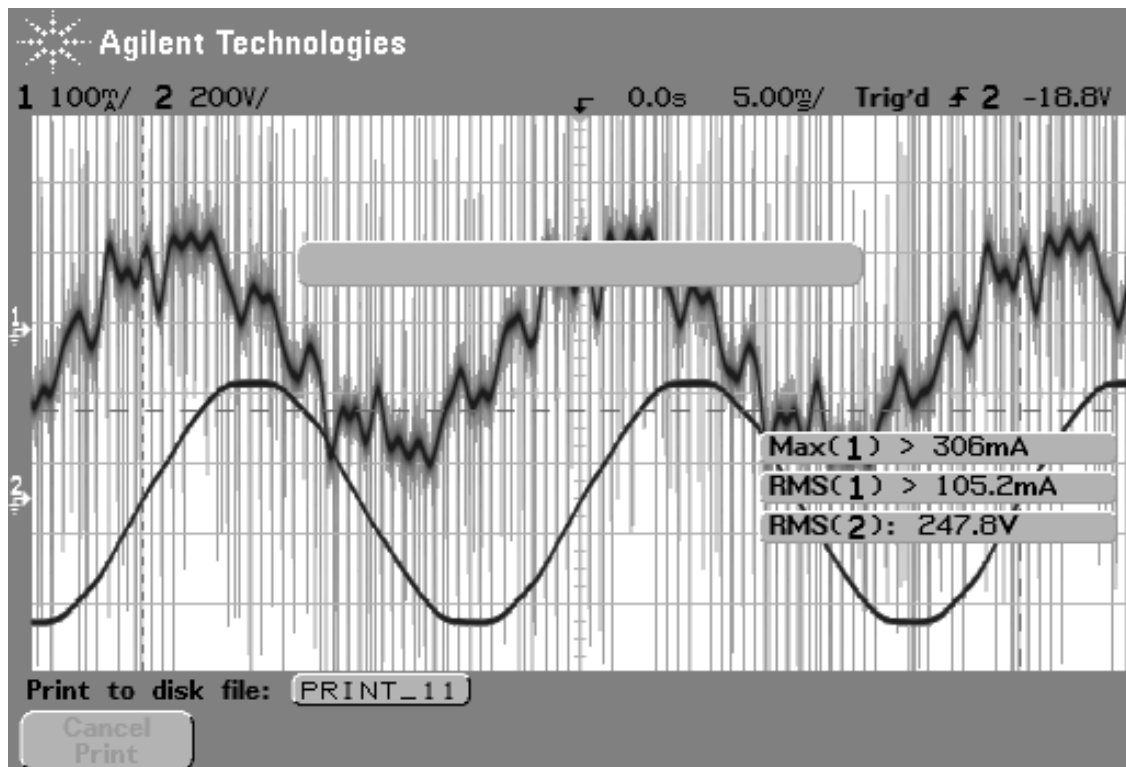
Specifikaci nároků na měřicí přístroj pomohl upřesnit předchozí výzkum [5], kdy byly dvoukanálovým osciloskopem zaznamenány průběhy primárních veličin transformátoru. Byly tedy k dispozici průběhy napětí a proudu na primární straně transformátoru. Hodnota proudu se pohybovala kolem $150 \text{ mA}_{\text{ef}}$. Špičkový odběr, dosahoval hodnot až 1 A_{ef} , tj. cca $\pm 1,5 \text{ A}$. Hodnoty silně závisely na výstupním napětí, použitém VN kabelu atd. Fázový posun proudu před napětím naznačuje, že zdroj je zatížen převážně kapacitně. Následující Obr. 5 a 6 zobrazují průběhy proudu bez zvlákňování (Obr. 5) a se zvlákňováním (Obr. 6.).

Převodový poměr transformátoru je $p = \frac{36\,000 \text{ V}}{230 \text{ V}} \approx 156,5$. Potom lze, za předpokladu ideálního transformátoru, odhadnout efektivní hodnotu sekundárního proudu jako $\frac{150 \text{ mA}}{156,5} \approx 0,96 \text{ mA}$. Ve skutečnosti dochází v transformátoru ke ztrátám, proto lze očekávat velikost výstupního proudu menší než uvedenou teoretickou hodnotu cca 1 mA .



Obr. 5. Proud a napětí na primární straně transformátoru, bez zvlákňování, (kanál 1=proud, kanál 2=napětí).

Na průběhu primárního proudu jsou patrné vyšší harmonické frekvence, ale impulzní charakter proudu se zde nevyskytuje, zdroj: [5]



Obr. 6. Proud a napětí na primární straně transformátoru, při probíhající procesy zvlákňování (kanál 1=proud, kanál 2=napětí). Na průběhu primárního proudu jsou patrné impulzy s vysokou amplitudou odpovídající koronovým výbojům a zvlákňování, neobsahují ale nejvyšších frekvencí, které byly pozorovány na sekundární straně přímo u zvlákňovací elektrody. Zdroj: [5].

3 BEZPEČNOST

Důležitým výstupem pro budoucnost vývoje střídavého zvlákňování na pracovišti FT TUL by měla být revize provozní bezpečnosti celého experimentu. Bezpečnostní opatření, ač jsou v současnosti na dobré úrovni, by mohla být ještě dále zlepšena. Musí být zcela vyloučen lidský faktor, aby nedošlo ke zranění nebo ke škodám ani v případě jakéhokoliv selhání obsluhy zařízení.

Za tímto účelem byly prozkoumány možnosti instalace standardních optických a akustických varovných systémů. Záměrem je bezpečnostní opatření, které umožní provoz pouze v tom případě, kdy je přítomna k provozu oprávněná osoba, jež je při vědomí a jen tehdy, kdy nehrozí žádné nebezpečí nebo riziko zranění.

Splnění základních bezpečnostních předpisů je samozřejmostí, protože se jedná o člověku nebezpečné zařízení. Proto je vhodné, aby byl provozní technik pod dohledem další osoby. Byla zvážena ochrana polohou a zábranou. Byla použita ochrana omezením maximální velikosti proudu na VN potenciálu (rezistorem $10\text{ M}\Omega$ na VN straně transformátoru) na hodnotu 1 mA a ochrana sledováním limitu unikajících proudů. Bohužel má tento rezistor i negativní důsledky na pochody zvlákňovacího procesu – omezuje špičkové hodnoty proudu a způsobuje posun provozních parametrů napětí směrem k vyšším hodnotám, než které by byly pro provoz bez rezistoru nutné. Z měření teploty povrchu tohoto ochranného rezistoru ($85\text{ }^\circ\text{C}$) lze hrubým odhadem stanovit ztrátový výkon 3 W a jemu ekvivalentní napěťový úbytek $U = \sqrt{PR} \approx 5,5\text{ kV}$. O tento úbytek napětí musí být napětí VN zdroje zvýšeno, aby proces zvlákňování mohl probíhat.

Byla doplněna ochrana odpojením při překročení maximálních unikajících proudů na primární straně (230 V) VN transformátoru. Unikající proud nad 10 mA na primární straně bude detekován a při jeho překročení dojde k samočinnému odpojení transformátoru od sítě. Principiálně se jedná o klasický proudový chránič používaný v elektrorozvodných sítích nízkého napětí. Dalšími opatřeními bude seznámení obsluhy měřicího zařízení, zejm. s bezpečnostními předpisy o provozu experimentu, bezpečnosti práce, práce s elektrickým zařízením a s předpisy týkajícími se použitých lithiových akumulátorů.

V měřicím zařízení je pro napájení použit lithiový akumulátor $14,8\text{ V}/4\text{ Ah}$. Bezpečnost provozu je z tohoto pohledu zabezpečena elektronickými obvody včasného odpojení akumulátoru dříve, než dojde k jeho úplnému vybití. Nebezpečnému přebíjení je zamezeno používáním k tomu účelu určeného nabíječe.

Nejdůležitější bezpečnostní opatření, která je nutné při provozu experimentu dodržet:

- Obsluha a práce na elektrických zařízeních ČSN EN 50110,
- bezpečnost práce s lithiovými akumulátory,
- bezpečnost a ochrana zdraví při práci vyplývající ze zákonů ČR,
- další interní předpisy.

Protože se jedná o zařízení s napětím, které je klasifikováno jako velmi nebezpečné, vztahují se na ně předpisy pro práci na elektrických zařízeních. Že je nutné dodržet i související předpisy dokládá úryvek ČSN EN 50110 z kapitoly *Pracovní postupy* [9]: „*Při práci musí být zajištěno stabilní postavení při práci, které pracující osobě umožňuje mít obě ruce volné. Osoby musejí být vhodně oblečeny a mít odpovídající osobní ochranné prostředky a pomůcky. Nemají mít na sobě žádné kovové předměty například osobní šperky, jestliže je to možné, že by tyto způsobily nahodilou poruchu či zranění.*“

Tab. 1. Standardizované minimální rozměry zóny přiblížení

Jmenovité napětí soustavy U_N kV Efektivní hodnota (r.m.s.)	Minimální přípustná vzdušná vzdálenost určující vnější hranici ochranného prostoru DL mm	Minimální přípustná vzdušná vzdálenost určující vnější hranici zóny přiblížení DV mm
22	260	1 260
35	370	1 370
400	2 600	4 600

zdroj: ČSN EN 50110

Technická doporučení na dovybavení experimentu z hlediska bezpečnosti:

- Přidat ochranu zábranou (např. dle ČSN 33 2000-4-41), pro 45 kV je předepsaná vnější hranice zóny přiblížení 1480 mm,
- doplnit nouzová STOP tlačítka, která umožní okamžité odstavení experimentu z více míst,
- doplnit experiment systémem automatického odstavení a odpojení od sítě s vhodným časovým limitem (např. po 2 minutách bez obsluhy),
- doplnit akustickou a optickou signalizaci provozu, která na možné nebezpečí upozorní náhodně přichozí, přestože budou mimo nebezpečný prostor.

Organizační doporučení:

- Přijmout jednoznačná provozní pravidla, např. dohled další osoby,
- proškolit všechny pracovníky, kteří se experimentu účastní:
 - BOZP,
 - ovládání experimentu vč. nouzového vypnutí,
 - první pomoc při úrazu elektrickým proudem a úrazy sekundárními,
 - zvýšit čistotu a zajistit vyšší míru uspořádanosti prostředí (snížit riziko svodových proudů a omezit možnost náhodného dotyku nebo přiblížení elektricky vodivých předmětů k „živým“ částem).

4 MĚŘÍCÍ PŘÍPRAVEK

Současný experiment obsahuje plně funkční zařízení pro přípravu vláken metodou střídavého elektrostatického zvlákňování. Experiment je třeba doplnit o možnost měření elektrického proudu tekoucího do zvlákňovací elektrody.

Vzhledem k vysokému napětí není zapotřebí řešit otázku úbytku napětí na samotném měřidle, jelikož úbytek napětí v řádu 1 V ovlivní v konečném důsledku elektrické parametry v obvodu o cca $\frac{1}{35000} \approx 3^{-5}$. Bude proto považován za zanedbatelný.

Bude zde ale řešena otázka bezpečnosti obsluhy. Přípravek je koncepčně navržen tak, že je celý elektricky připojen na VN potenciál. Musí proto být zajištěno jeho vzdálené ovládání a přenos měřených signálů do bezpečné vzdálenosti takovou metodou, která dostatečnou bezpečnost s rezervou zajistí.

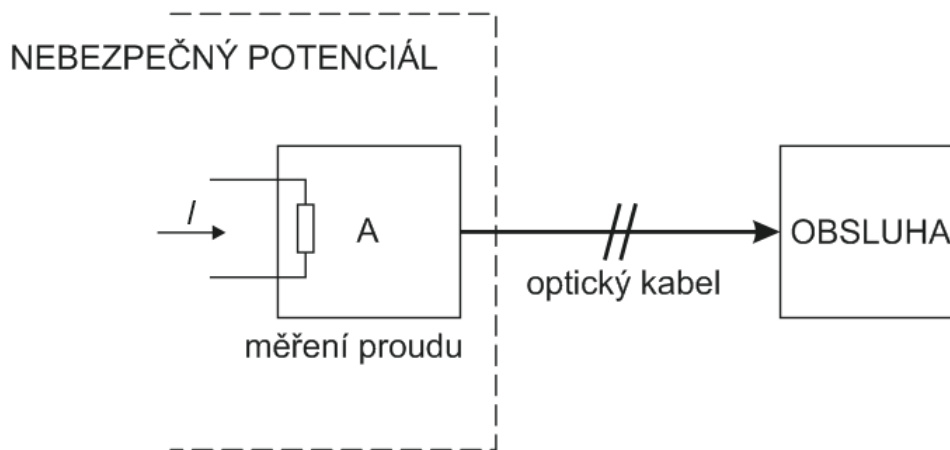
Další překážkou bude fyzická velikost měřidla a jeho umístění. Z teoretických předpokladů plyne požadavek na jeho co nejmenší velikost, aby nebylo ovlivněno rozložení elektrického pole v okolí zvlákňovací elektrody. Zároveň musí být jeho rozměry dostatečně velké z důvodu potlačení koronových ztrát, které jsou zde nežádoucí, protože ovlivňují průběh proudu v obvodu.

V neposlední řadě bude muset být vyřešeno napájení měřícího přípravku. Jelikož bude umístěn přímo na VN potenciálu u elektrody, musí jeho napájení zajišťovat akumulátor, protože napájení jiným způsobem by snižovalo provozní bezpečnost. Tento akumulátor musí být schopen zajistit provoz měřidla po dostatečně dlouhou dobu. Experiment může probíhat po dobu několika hodin a bylo by nežádoucí práci přerušovat, neboť některé statisticky méně časté (vzácné) události mohou být jen obtížně opakovatelné.

4.1 Požadavky

Vlastní úloha měření proudu si vyžádala určitou inovaci běžně zavedených postupů a metod. Měření proudu na VN potenciálu je značně rizikové, protože i drobné opomenutí může obsluhu způsobit vážné zranění, smrt, nebo způsobí škody na majetku.

Cílem proto bylo sestrojít snímač průběhu proudu, který je umístěn přímo na VN potenciálu několika desítek kV, a který snímá průběh proudu. Ten bude vhodným způsobem přenášet do bezpečné vzdálenosti, kde může být původní signál rekonstruován, sledován a zaznamenáván. Schéma měřicího přípravku bude vypadat dle Obr. 7.



Obr. 7. Princip měření průběhu elektrického proudu do zvlákňovací elektrody na VN hladině, galvanické oddělení bylo realizováno optickým kabelem

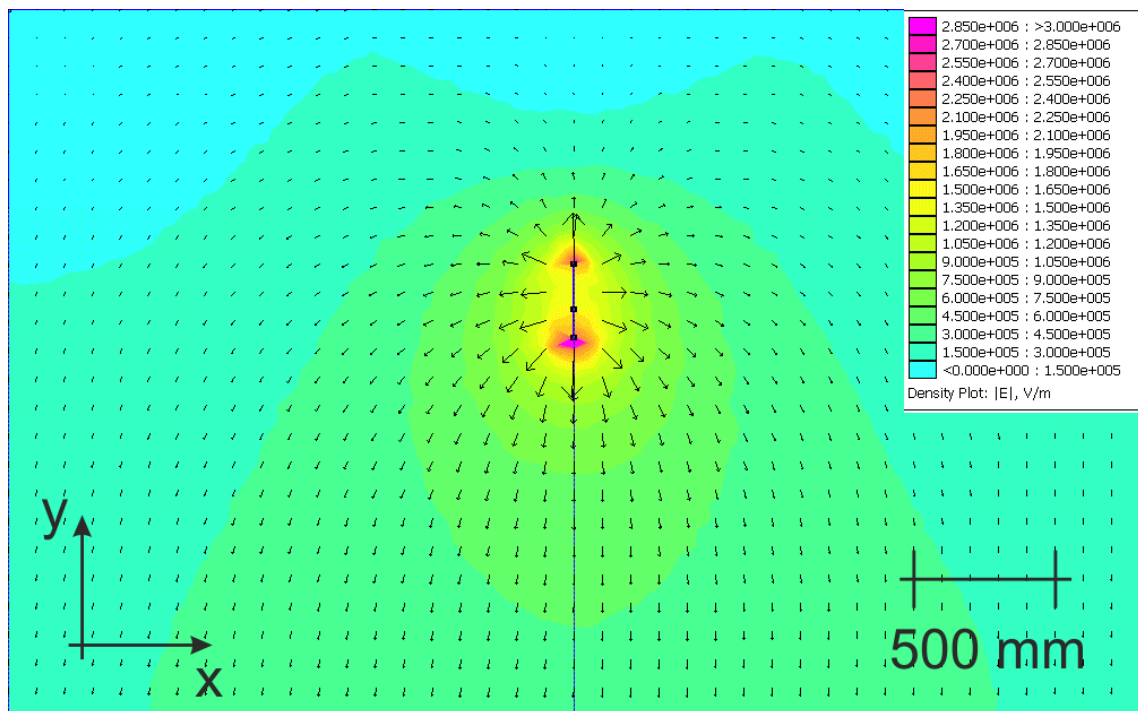
Bylo použito optické elektricky nevodivé vlákno, které umožnilo přenos signálu do dostatečné vzdálenosti od VN elektrody, kde se průběh proudu měří. Měřicí řetězec sestává z vlastního proudového snímače A, optického kabelu a počítače, na kterém je zobrazován průběh proudu.

Modul A provádí snímání proudu a tento signál převádí do digitální podoby, ve které se odesílá po optickém vláknu. Modul obsahuje ochrany proti přepětí, obvody pro zpracování signálu a digitální USB osciloskop. Modul je napájen z akumulátoru, protože jeho napájení musí být galvanicky odděleno od všech ostatních obvodů v celém řetězci. Typ akumulátoru byl zvolen tak, aby byl umožněn nepřerušovaný provoz experimentu po dobu několika hodin. Použitý datový optický kanál využívá rozhraní USB1.1 s přenosovou rychlostí 12 MBit/s.

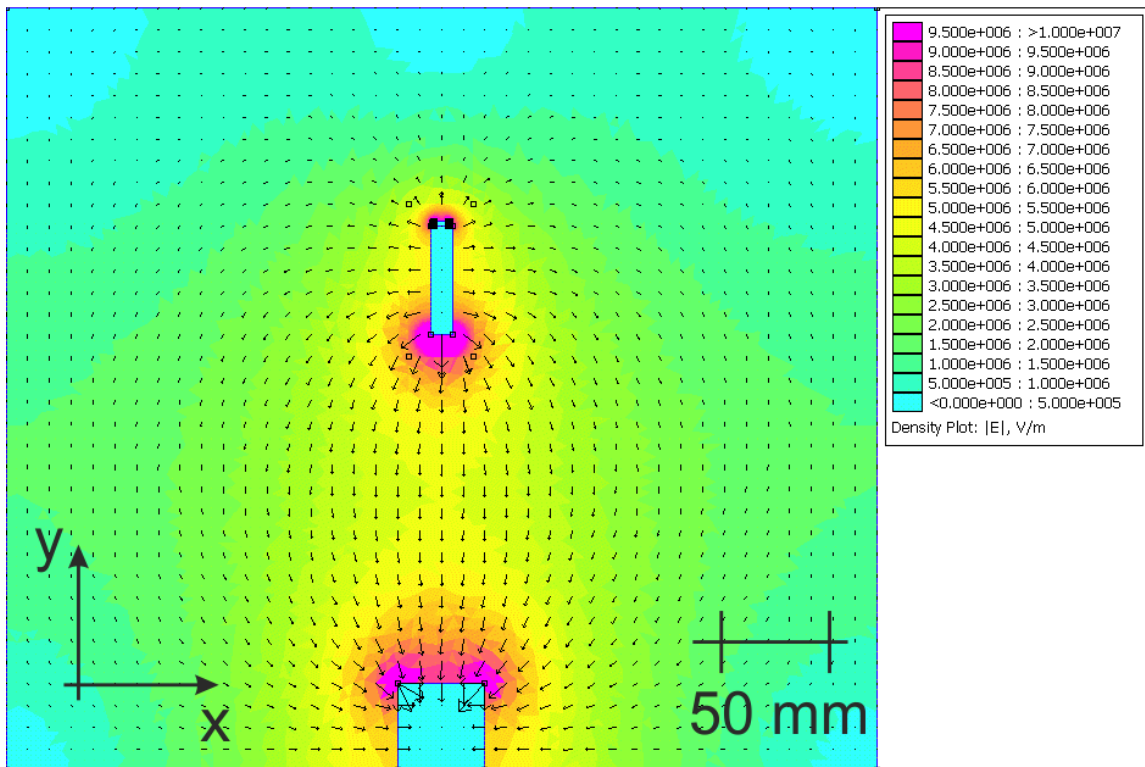
4.2 Simulace elektrického pole

Vlastní příčinou vzniku submikronových vláken je silné elektrické pole v blízkém okolí zvlákňovací elektrody. Přiblížením jakéhokoliv elektricky vodivého předmětu k této elektrodě dochází k deformaci tvaru a ke změně intenzity elektrického pole s následným negativním dopadem na kvalitu zvlákňovacího procesu. Z tohoto důvodu byla provedena řada simulací rozložení intenzity elektrického pole v celém experimentu. Cílem bylo stanovit, jak velké (objemné) může být samotné měřicí zařízení a v jaké vzdálenosti od elektrody musí být umístěno, aby samotná jeho přítomnost výrazně neovlivnila elektrické pole v okolí elektrody. Simulace probíhaly ve výpočetním systému FEMM [g] ovládané skripty prostředí Matlab [a]. Pomocí systému FEMM lze řešit problémy z oblasti elektrostatiky, magnetické nebo termické jevy a další.

Samotné měřicí zařízení musí být umístěno v kovové krabici z důvodu možného poškození extrémně silnými elektrickými potenciály. Pokud by byl tento přípravek příliš blízko zvlákňovací elektrody, došlo by k ovlivnění procesu tvorby vláken a tím také ke změně provozních parametrů. Na Obr. 8. je výsledek simulace intenzity el. pole v okolí samotné elektrody.

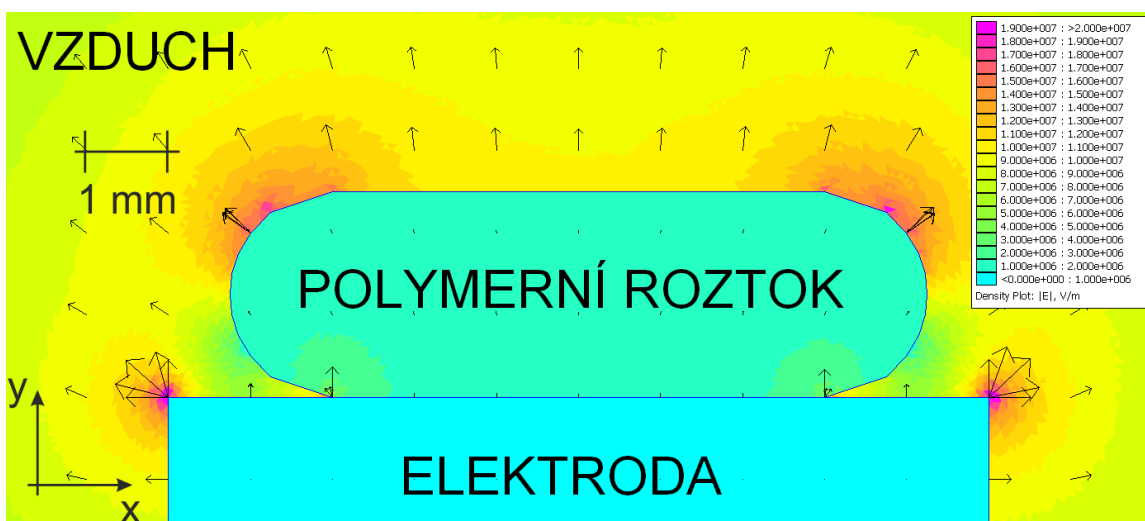


Obr. 8. Simulace rozložení intenzity elektrického pole v okolí elektrody, (intenzita el. pole je kódována barvou: modrá-fialová odpovídá 0-3 MV/m)



Obr. 9. Simulace rozložení intenzity elektrického pole v okolí elektrody, pod elektrodou je přítomen kovový prvek s nulovým potenciálem, (intenzita el. pole je kódována barvou: modrá-fialová odpovídá 0-10 MV/m)

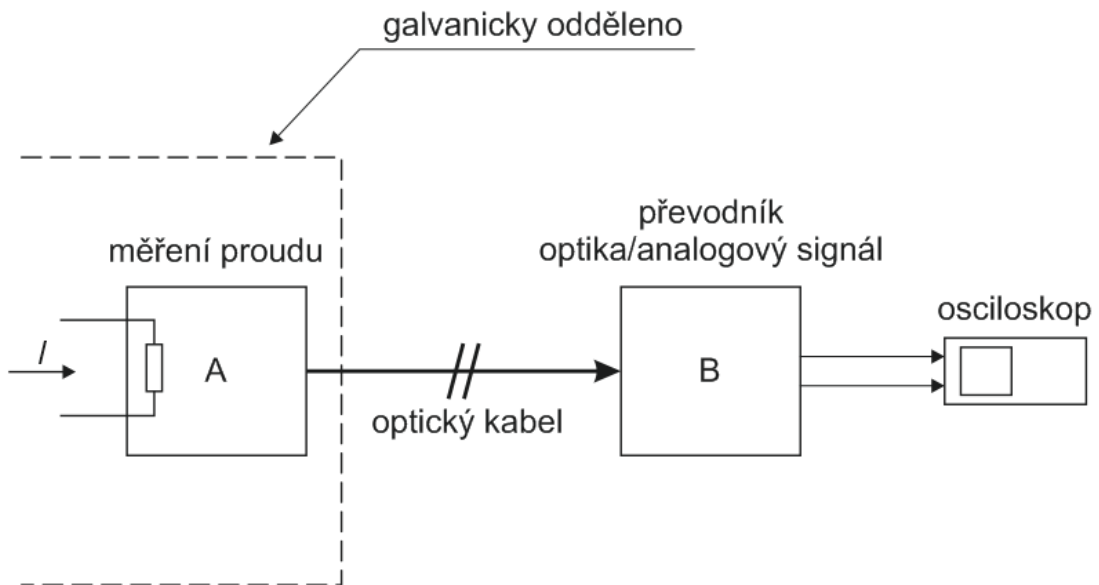
Přidáním dalšího předmětu pod zvláknovací elektrodu dojde k deformaci pole, viz Obr. 9. Na Obr. 10 je zobrazen detail rozložení el. pole v blízkém okolí kapky polymerního roztoku. Elektroda je hliníková, v okolí je vzduch. Je zde patrná zvýšená intenzita pole v oblasti hran s malým zakřivením, kterými jsou okraje kapky nebo ostré hranice elektrody.



Obr. 10. Simulace rozložení intenzity elektrického pole – detail intenzity okolo kapky roztoku, (intenzita el. pole je kódována barvou: modrá-fialová odpovídá 0-20 MV/m)

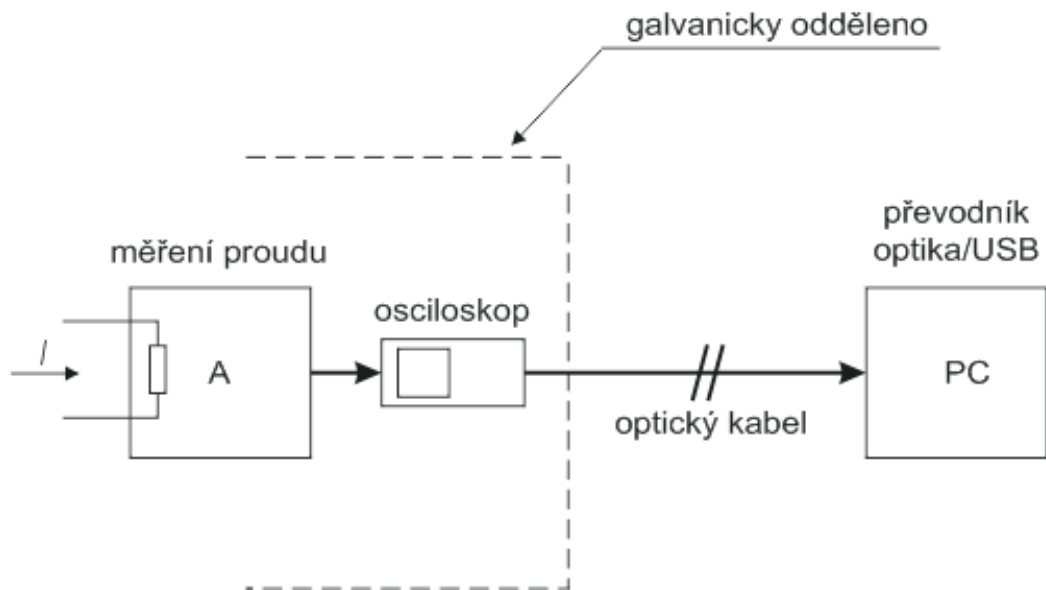
4.3 Vývojová stádia

Prvotní koncept předpokládal, že u zvlákňovací elektrody bude snímací rezistor. Napětí na tomto rezistoru (přímo úměrné protékajícímu proudu) bude upraveno vhodnými filtry, převedeno do digitální podoby, a nakonec odesláno po digitálním optickém vlákně do bezpečné vzdálenosti, kde dojde ke změně signálu do původní analogové podoby. Poté bude tento rekonstruovaný signál zaznamenán osciloskopem. Parametry byly 130 MSa/s s rozlišením převodníků 16 b.



Obr. 11. První verze návrhu

Toto řešení bylo velmi robustní, bohužel vyžadovalo použití osciloskopu, který signály zobrazoval. Vlastní záznam dat tak byl poněkud zdlouhavý z důvodu nutnosti přenosu dat z osciloskopu do PC. Navíc tato metoda používala trojí převod podoby signálu (AD/DA/AD), což může být potenciálním zdrojem nejrůznějších chyb a nežádoucího rušení. Bylo by sice možné digitální data ukládat přímo do PC, musel by se však zajistit způsob, jak spolehlivě ukládat rychlostí cca 300 MB/s. Tyto předpoklady dnešní standardní PC nespĺňuje. Toto řešení nakonec bylo zkonstruováno, a to z důvodu otestování požadavků a realizovatelnosti finální verze. Po nejrůznějších úvahách, jak tyto nedostatky odstranit, bylo rozhodnuto osciloskop z měřicího řetězce vyřadit. Ukázalo se, že vhodnějším přístupem bude systém, který bude signály přenášet přímo do PC, jelikož cílem je pozdější zpracování a analýza získaných dat.



Obr. 12. Finální verze návrhu

Tento přístup sice vyžaduje vždy připojené PC, zato nabízí bohatší možnosti ovládání přístroje a okamžité ukládání dat. Použité přenosové rozhraní je USB1.1 s přenosovou rychlostí 12 Mbit/s, přičemž čistý efektivní přenos dat může probíhat až do 1 MB/s. Tato přenosová zcela postačuje pro aktualizaci snímků signálu v ovládací aplikaci dostatečnou rychlostí 5 snímků/s. Po zastavení záznamu konkrétního průběhu měřeného proudu lze data z paměti osciloskopu do PC přenést za několik sekund.

4.4 Přenos signálu

Kritickou částí návrhu bylo stanovení požadované měřené, resp. přenášené, šířky pásma. Nejprve bylo navrženo pásmo DC-10 MHz. Vycházelo se z předpokladu, že signály budou podobného charakteru jako při původních výzkumech se stejnosměrným zvlákňováním, kdy měly impulzy dobu náběžné hrany cca 300 ns. S postupujícími obavami, i mírou určité nejistoty, bylo nakonec rozhodnuto, že minimální horní hranice se zvýší na 30 MHz. Později se toto rozhodnutí ukázalo jako oprávněné, jelikož se v signálech vyskytují frekvence desítek MHz. S ohledem na požadovanou šířku pásma bylo postupně navrženo několik variant, jak signál z nebezpečného VN potenciálu přenášet a jak ho zaznamenávat. V úvahu přicházely tyto metody:

- **Přímé měření na studeném konci transformátoru:**
Sekundární strana transformátoru je za normálních okolností uzemněna (viz dále). Když se do cesty vloží vhodný rezistor, může na něm být měřeno napětí úměrné proudu. Předpokládá se ale, že signál bude v tomto místě vypadat jinak, než přímo u zvlákňovací elektrody. Otestováno, zaznamenán sinusový průběh a jehlové impulzy, nicméně transformátorem neprocházejí nejvyšší frekvence.
- **Zesilovač, ADC, serializer, sériový přenos po 2,5Gbit/s SFP modulu:**
Tato první zkonstruovaná verze narazila na problém ukládání velkého množství dat (viz dále).
- **Modulovaná červená LED s AM + TOS-LINK:**
Digitální PC optický standard pro přenos zvuku, předpoklad DC-50MHz, náročný zesilovač na přijímací straně, citlivost na stav konektorů, na teplotu, vysoké nelinearity, apod.
- **USB osciloskop přímo u VN elektrody:**
 - Přenos z osciloskopu přes optický USB3.0 převodník, USB osciloskop SainSmart DDS140, optický USB3 extender Adnaco ADNACO-UF1-10 převodník USB3-USB2 ADNACO-UT1: USB osciloskop SainSmart DDS140 se neosvědčil, má malou paměť a nemá HW trigger, nelze se synchronizovat na jehlové impulzy.
 - Přenos z osciloskopu přes optický USB3.0 převodník, USB osciloskop OWON VDS2062, optický USB3 extender Adnaco ADNACO-UF1-10, převodník USB3-USB2 ADNACO-UT1: Optický USB3 extender Adnaco ADNACO-UF1-10 má integrovaný kovový vodič 10 Ohm, takže je nepoužitelný. Zastaveno kvůli kovovému drátu v optickém kabelu USB3.
 - Přenos z osciloskopu přes optický USB1.1 převodník, USB osciloskop OWON VDS2062, optický USB1.1 Icron USB Rover 200, USB2.0 HUB i-tec 4port (tato varianta byla úspěšně realizována).

Finální verzí je použití USB osciloskopu OWON VDS2062, který je připojen přes vhodné obvody ke snímacímu rezistoru. Přístroj je připojen ke standardnímu PC, je však připojen galvanicky odděleným optickým USB kabelem. V PC se nachází ovládací aplikace osciloskopu, která umožňuje provádět záznam signálu.

4.5 Konstrukce

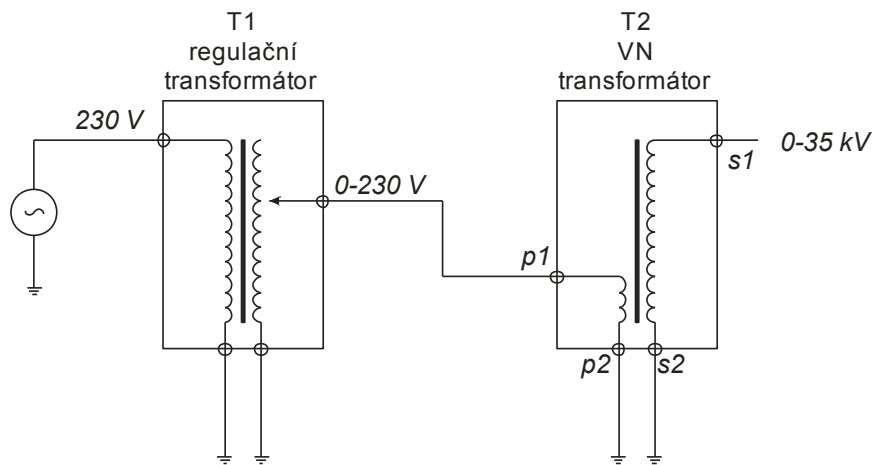
Předpokládá se využití předchozích zkušeností a příznivých výsledků dosavadní práce [4] s VN měřícím transformátorem s převodovým poměrem 35 kV/230 V typu KGUG 36, výrobce ABB [6]. Tento transformátor je určen pro přesná měření napětí na VN hladině 35 kV. Pro účely střídavého elektrostatického zvlákňování je vhodný z toho důvodu, že má výbornou izolační pevnost a je určen pro trvalý provoz.

Tento transformátor lze jako zdroj VN použít tak, že na původně sekundární vinutí bude připojeno napětí 230 V/50 Hz. Na původně primární straně pak bude k dispozici transformovaný potenciál 35 kV konstrukčně daný převodním poměrem závitů. Transformátor je pak zapojen poněkud netypickým způsobem, kdy je směr toku energie opačný, nejsou však známy okolnosti, které by takové zapojení nedovolovaly.

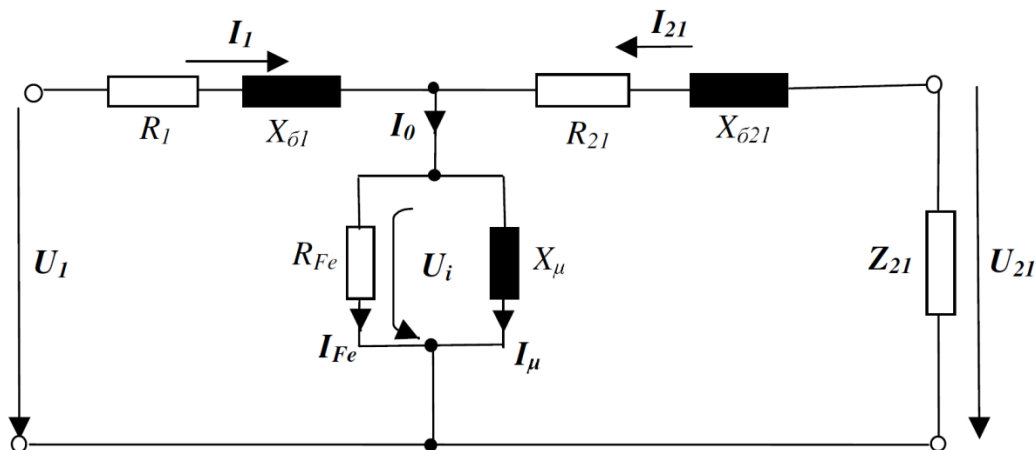


Obr. 13. Transformátor KGUG36, výrobce ABB [6]

Požadavkem zadání je zajistit regulovatelné výstupní napětí. Toho lze dosáhnout např. zařazením dalšího (regulačního) transformátoru do primárního obvodu dle Obr. 14. V úvahu připadá také použití polovodičového regulátoru (triak) nebo frekvenčního měniče (regulace motorů). Z důvodu robustnosti, odolnosti, jednoduchosti konstrukce a ovládání byla zvolena uvedená metoda řízení regulačním transformátorem, který „budí“ primární stranu VN transformátoru.



Obr. 14. Princip regulace výstupního napětí



Obr. 15. Náhradní model transformátoru [12]

Ohmický odpor primárního vinutí $R_1 = 9\,623\ \Omega$

Ohmický odpor sekundárního vinutí $R_{21} = 0,28\ \Omega$

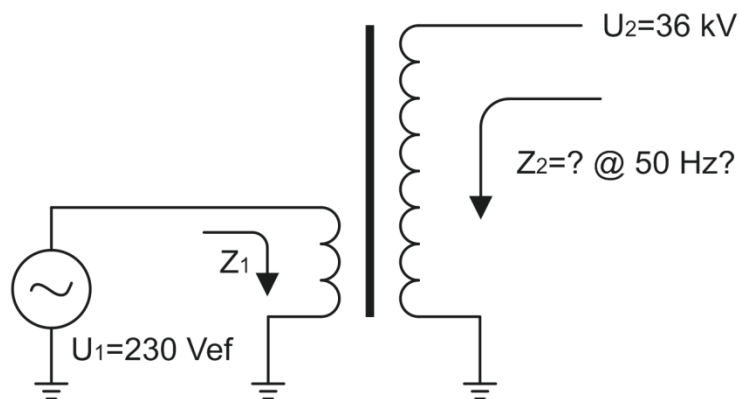
Rozptylová reaktance primárního vinutí $X_{\sigma 1} = 11\,584\ \Omega$

Rozptylová reaktance sekundárního vinutí $X_{\sigma 21} = 0,479\ \Omega$

Odpor zahrnující ztráty v železe $R_{Fe} = 14\,601\,521\ \Omega$

Magnetizační reaktance $X_U = 12\,250\,509\ \Omega$

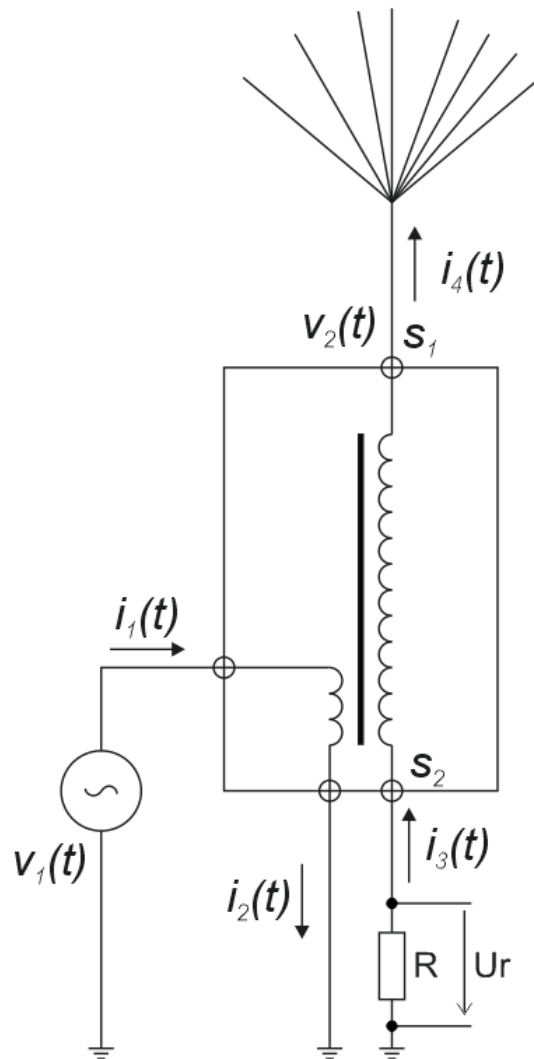
Tyto parametry [6] posloužily k simulacím provozních parametrů.



Obr. 16. Uvažované zapojení transformátoru

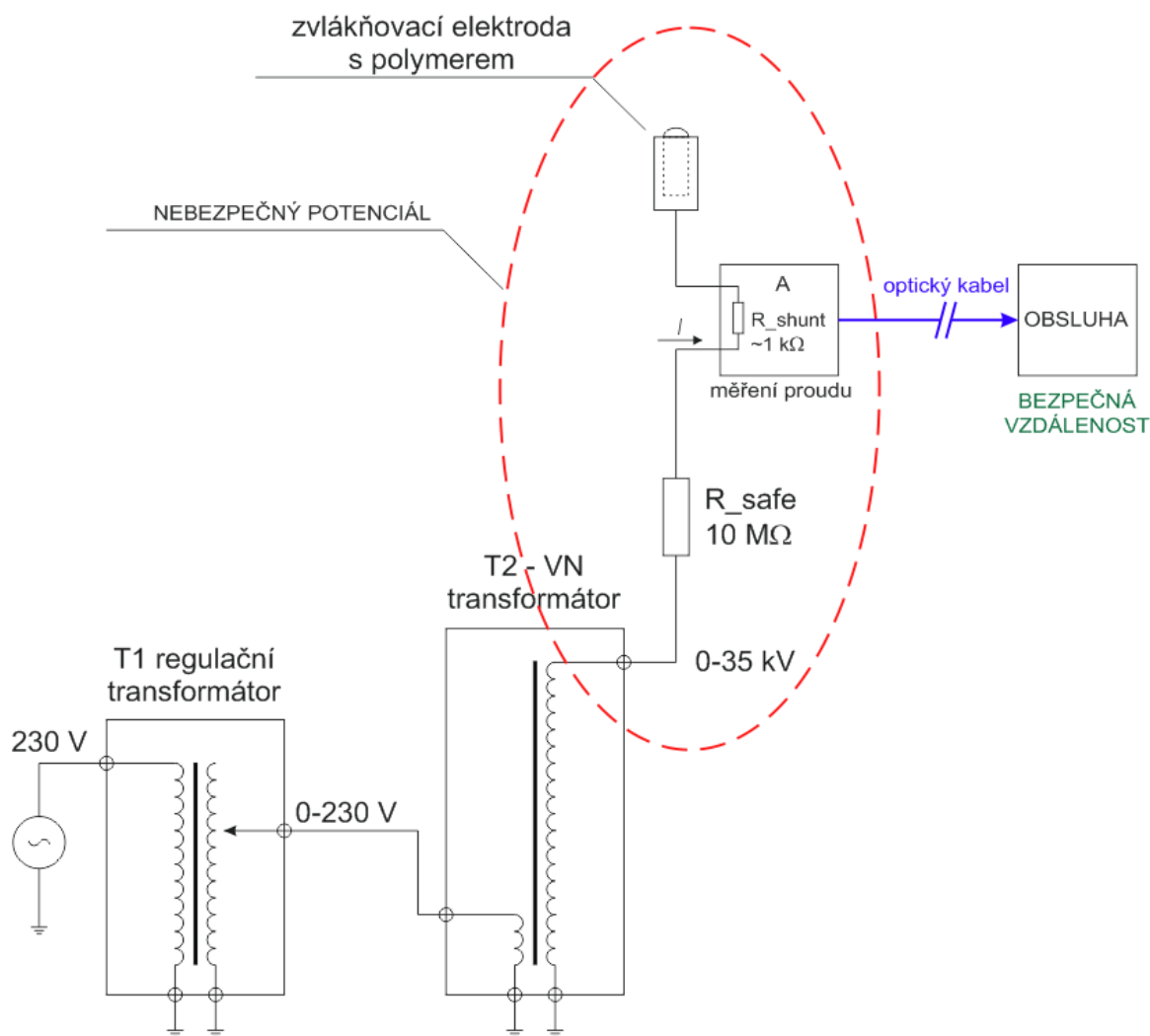
Prvním rozhodnutím, které mělo v procesu padnout, byl výběr vhodné metody měření. V první řadě bylo potřeba zjistit, zda bude možné měřit proud v místě „studeného“ konce transformátoru. Pokud by bylo možné měření provádět zde, jednalo by se o relativně bezpečný přístup, neboť nemá tak závažné bezpečnostní důsledky. Postačila by volba vhodné hodnoty snímacího rezistoru R , který by byl vložen mezi tzv. „studený“ konec transformátoru a nulový potenciál.

Jako „studený“ konec vinutí se často označuje ten vývod konkrétního vinutí, který je za normálních provozních okolností propojen s nulovým pracovním potenciálem. Tento vývoj je na následujícím obrázku označen jako s_2 , zatímco svorka s_1 je v tomto případě VN potenciál přiváděný ke zvlákňovací elektrodě. Otázka tedy zní, zda můžeme uvažovat $i_3(t) \stackrel{?}{=} i_4(t)$.



Obr. 17. Elektrické proudy v obvodu

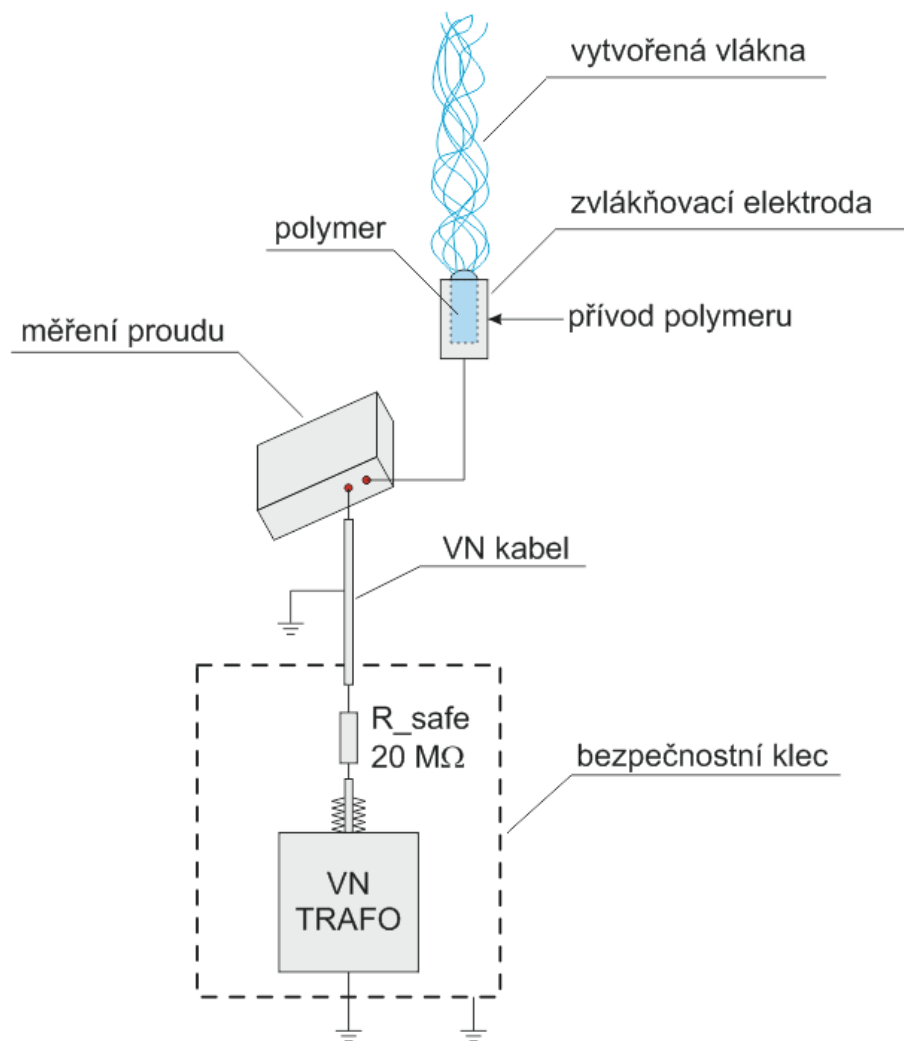
Při prvním naměření reálných průběhů proudu bylo zjištěno, že proud i_4 tekoucí do zvlákňovací elektrody obsahuje široké frekvenční spektrum zasahující do oblasti desítek MHz. Toto řešení je z hlediska požadovaných výsledků neuspokojivé a nelze jej takto realizovat, přestože by přineslo značné usnadnění realizace. Jakmile byla vyloučena možnost měření výše uvedenou metodou na „studeném“ konci VN vinutí, upřel se vývoj směrem k výběru metody, která bude měřit proud v blízkosti zvlákňovací elektrody.



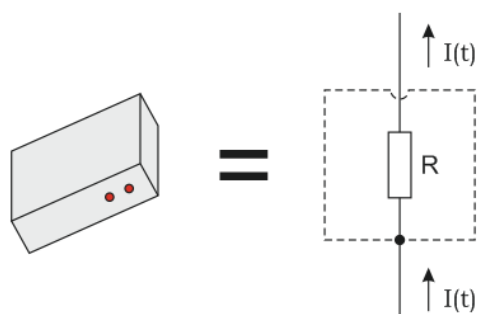
Obr. 18. Nebezpečná oblast VN

Fyzické rozmístění ilustruje následující Obr. 18, kde je patrný princip připojení snímačího rezistoru u elektrody. Snímání proudu bude založeno na rezistoru s vhodnou hodnotou.

Rezistor bude umístěn v kovové krabici, která bude elektricky propojena přímo s VN potenciálem. Rezistor přitom bude jedním pólem propojen na kostru a druhým na připojenou zvlákňovací elektrodu.



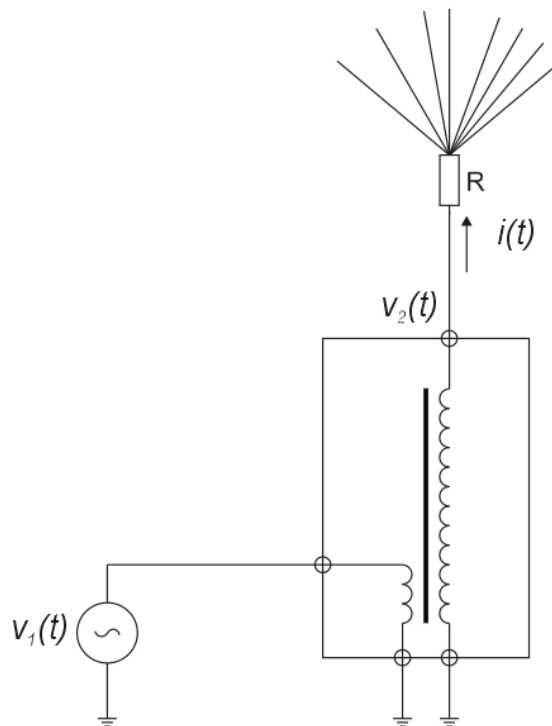
Obr. 19. Blokové schéma experimentu se zařazeným měřidlem proudu



Obr. 20. Měřidlo má na kostře krabičky připojen jeden pól rezistoru

Zcela stěžejní vliv na funkci celého měřicího řetězce má snímací rezistor. Jeho ohmická hodnota by měla být taková, aby neovlivnila elektrické poměry v obvodu. Vzhledem k tomu, že v obvodu je již obsažen bezpečnostní rezistor $10\text{ M}\Omega$, nebude jeho velikost kritická. Jeho hodnota byla nejprve určena teoretickým odvozením ze známých hodnot proudu z původních experimentů při stejnosměrném zvlákňování. Zde byly špičkové hodnoty při tomto procesu na hodnotě desítek až stovek μA .

Abychom měli vhodné napětí pro zpracování vstupními analogovými obvody osciloskopu, je vhodné, aby byla velikost napětí v rozsahu 100 mVpp až 1 Vpp . Pro určení hodnoty rezistoru bylo tedy nejprve použito toto odvození: $R = \frac{U}{I} = \frac{1}{1E-4} = 10\text{ k}\Omega$. Experimentálně byla hodnota nakonec stanovena na $1\text{ k}\Omega$, a to z toho důvodu, že špičkové hodnoty proudu zde byly podstatně vyšší a vzniklý napěťový signál by překračoval dovolené meze vstupu osciloskopu.



Obr. 21. Umístění snímacího rezistoru

Jelikož se zde pracuje s VN potenciálem, je třeba brát ohled na možnosti přetížení obvodových prvků a poruch vzniklých z důvodu přepětí. Vstupní obvody proto obsahují systém přepěťových ochran, které zajišťují omezení nežádoucího přepětí na přijatelnou mez, kdy nedojde k poškození žádných součástí na vstupu ani následných analogových obvodů.

Pakliže je potřeba ochránit citlivé polovodičové součástky před přepětím v řádu desítek kV, jedinou vhodnou metodou je použití ochrany typu Gas Discharge Tube (dále jen „GDT“).

Jedná se o komoru vyplněnou vhodnou inertní atmosférou, ve které jsou umístěny dvě plošné elektrody, jejichž vzdálenost je přibližně úměrná požadovanému kritickému napětí, při kterém mezi nimi dojde k výboji. Tento výboj je poté charakterizován nízkým vnitřním odporem a lze ho proto využívat k omezení přepětí v systémech s omezeným maximálním proudem.

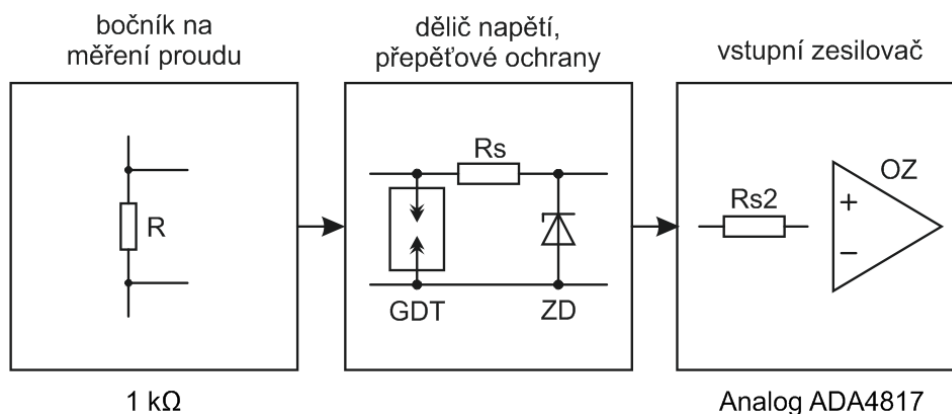
B88069X1640T902 výrobce Epcos



Obr. 22. Ochrana proti přepětí – Gas Discharge Tube

Tento GDT prvek je zapojen paralelně ke snímacímu rezistoru. V případě, kdy nadměrný proud vytvoří určitý kritický napěťový úbytek na snímacím rezistoru (v tomto případě cca 90 V), dojde v GDT k přeskočení výboje a tím k podstatnému snížení jeho impedance.

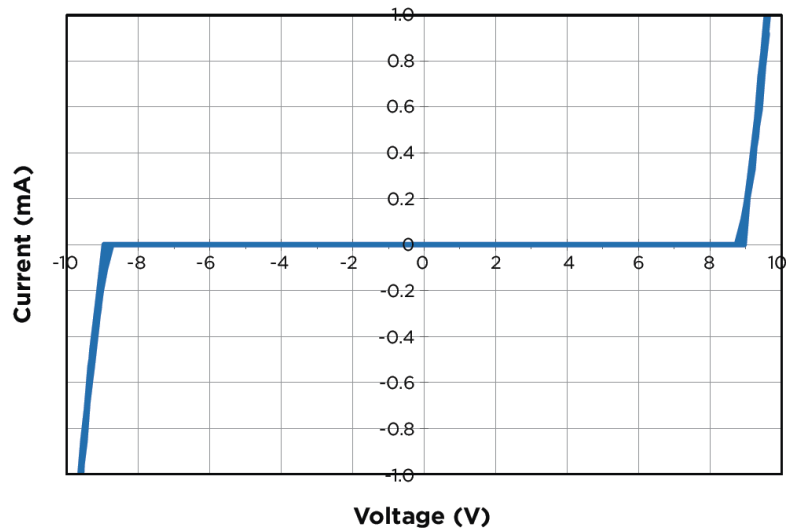
Impulzní přepětí má sice vyšší hodnotu, výrobcem je však garantováno, že nepřekročí 600 V. Jedná se tedy o první stupeň ochrany proti přepětí, který má velmi malou kapacitu (méně než 1 pF), vysoký ekvivalentní odpor (nad 1 G Ω), neovlivňuje tedy tvar ani velikost měřeného signálu.



Obr. 23. Blokové schéma zapojení vstupu

Dalším prvkem v cestě signálu je rezistor R_s (250 Ω), má za úkol případné přepětí dále snížit v kombinaci s dalším omezujícím prvkem, kterým je ochranný transil ZD typu SESD0201X1UN. Jeho maximální provozní napětí, kdy nedochází k deformacím napěťového signálu je cca ± 8 V.

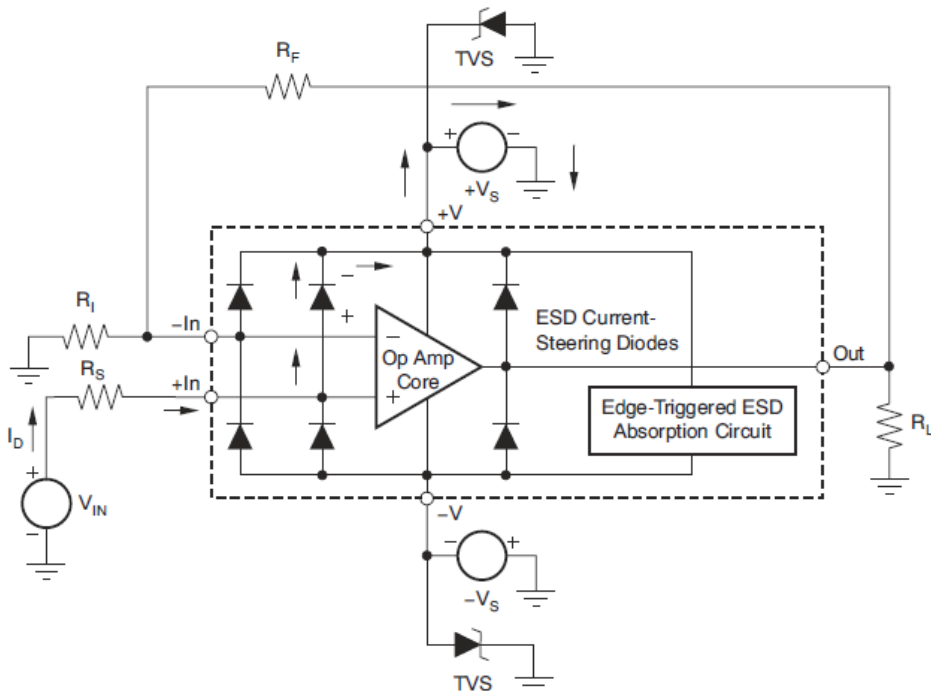
SESD Bi-directional IV



Obr. 24. Voltampérová charakteristika ochranné diody – transilu

Při napětích větších než ± 9 V dojde k jeho otevření a svedení přepětí do nulového potenciálu. Jeho maximální parazitní kapacita je 0,2 pF, proto, stejně jako GDT v prvním stupni, nedochází ke změnám v přenášeném signálu. V tomto místě signálové cesty je tedy původní přepětí dále omezeno na 9 V.

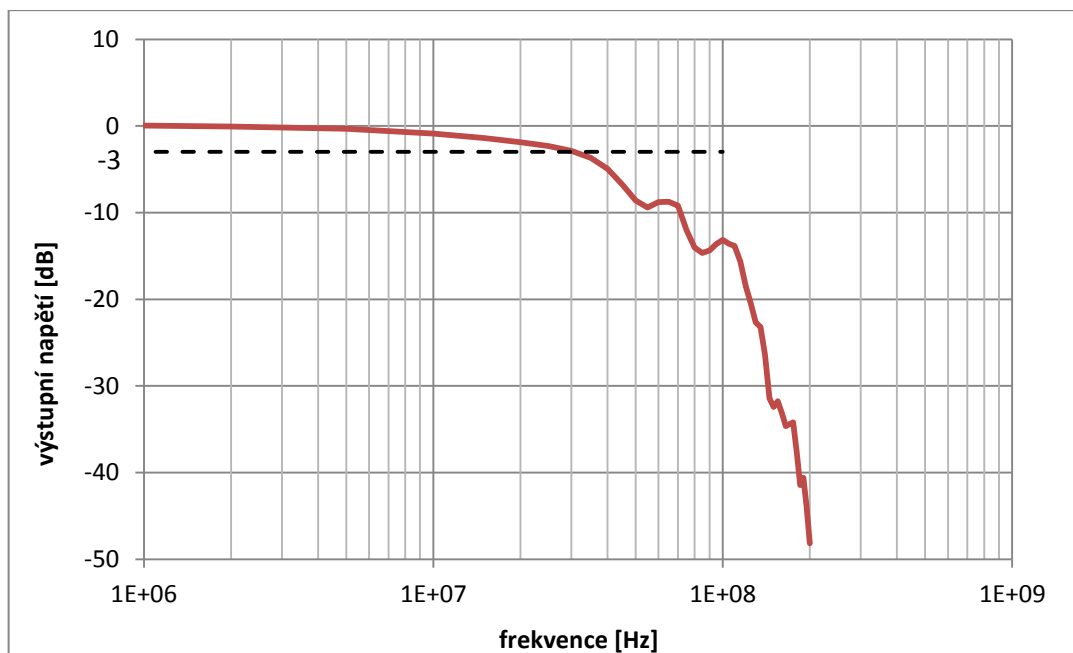
Posledním, třetím stupněm ochrany vstupu proti přepětí, je další rezistor R_{s2} o hodnotě 100 Ω , skrze který je signál připojen na samotný vstup operačního zesilovače (dále jen „OZ“). V OZ jsou na vstupech integrovány ochranné diody, které přepětí (nad ± 5 V) svádějí do napájecích vývodů OZ.



Obr. 25. Princip omezení přepětí na vstupech operačního zesilovače integrovanými ochrannými diodami

Vstupní analogová část má za úkol připravit signál, který byl na snímacím rezistoru převeden na napěťové úrovni, do podoby vhodné pro zpracování vstupem osciloskopu, tj. digitalizaci. Musí zde být zajištěna ochrana proti přepětí (popsaná výše), dále impedanční oddělení, jelikož vstupní díly osciloskopu mají obvyklou vstupní kapacitu 10-25 pF. V neposlední řadě musí být splněn Shannonův teorém, tedy podmínka maximálních frekvencí v signále odpovídající $f_s/2$, kde f_s je vzorkovací frekvence osciloskopu. Tato frekvence je v tomto případě 100 MSa/s, nejvyšší frekvence signálu proto musí být nižší než 50 MHz, jinak hrozí nežádoucí následky „překládání“ frekvencí. Tuto úlohu zčásti řeší již samotný osciloskop, nelze se zde však na kvalitní filtraci za všech okolností spolehnout.

U tohoto experimentu se předpokládá impulzní charakter signálu, podobně jako u výzkumů předchozích. Je proto nutné frekvenci signálu omezit vhodnými filtry dříve, než bude signál digitalizován. Výsledkem je frekvenční charakteristika měřicího řetězce 0-30 MHz/-3 dB.



Obr. 26. Graf frekvenční charakteristiky měřicího řetězce

Filtry jsou typu „dolní propust“ a jsou založeny na aproximacích Bessel, nepotlačují proto impulzní tvar signálu, pouze dochází ke snížení amplitudy pro vyšší frekvence. Jejich odezva je pro tyto signály velmi vhodná, protože mají minimální překmit a konstantní zpoždění. Pokud by návrh filtry neobsahoval, docházelo by k podstatnému ovlivnění tvaru signálu.



Obr. 27. USB osciloskop SainSmart DDS140

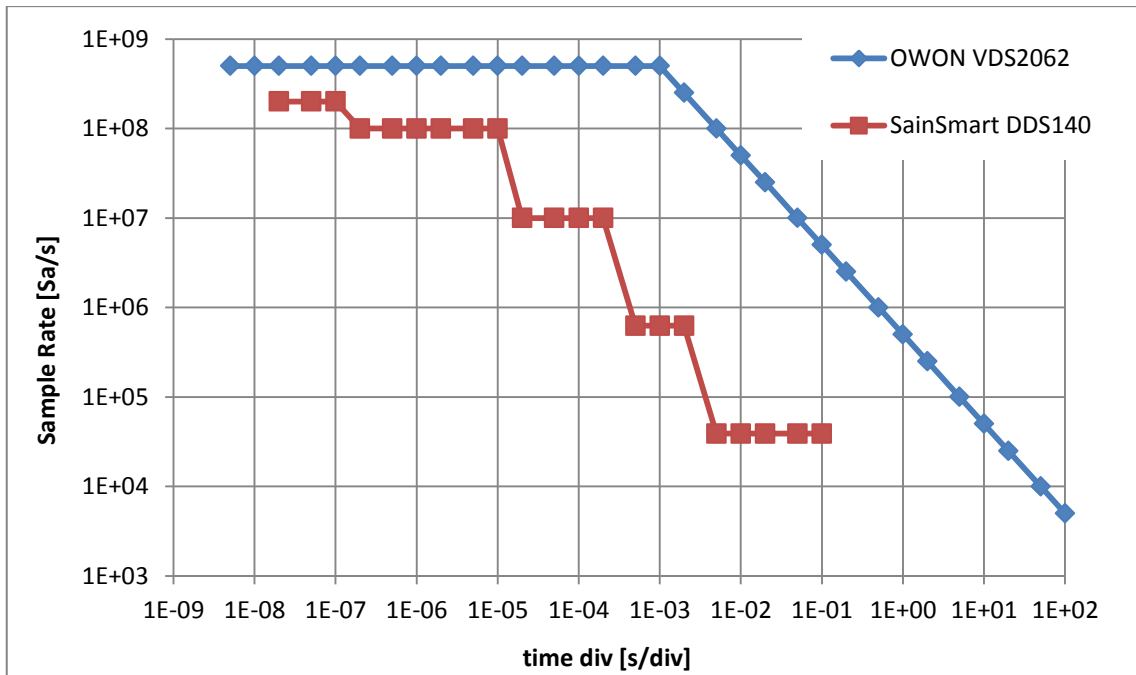
Jakmile bylo rozhodnuto použít USB osciloskop přímo na VN potenciálu, byl vybrán nejprve typ SainSmart DDS140. Postupně se však ukázalo, že pro daný účel není příliš vhodný.

Prvním nedostatkem byla nemožnost použití funkce „Trigger“ (spuštění záznamu) na náběžnou náběžnou hranu proudového impulsu. Ukázalo se, že zabudovaná paměť 64 kbit je zcela nedostatečná, jelikož je sdílena oběma kanály, a ekvivalentní vzorkovací frekvence klesá při 5 ms/div na 39 kSa/s. Vybranou náhradou byl OWON VDS2062. Ten disponuje vzorkováním 500 MSa/s a má hloubku paměti 10 MSa tj. 10 milionu 8b vzorků. Viz následující Obr. 28.



Obr. 28. USB osciloskop OWON VDS2062

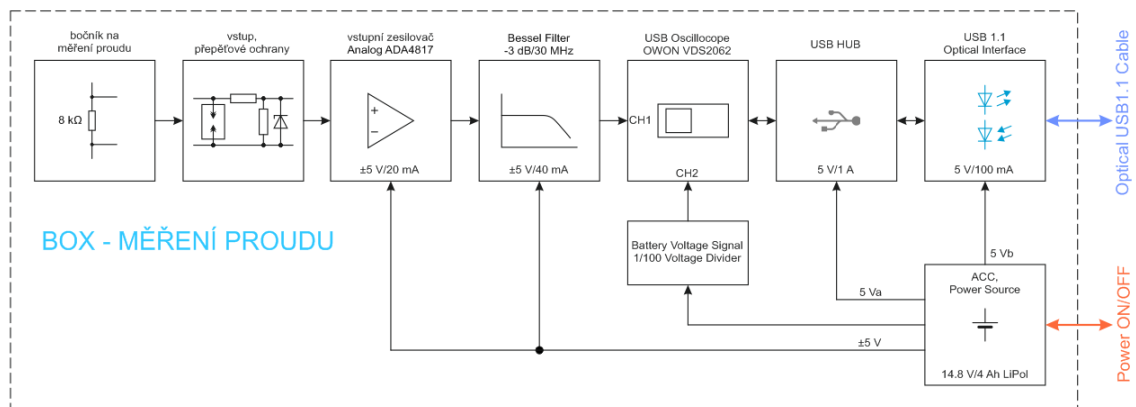
Značný rozdíl v paměti zde přináší podstatně lepší záznamové možnosti. VDS2062 umožňuje při 5 ms/div vzorkovat vstupní analogový signál (převádět do digitální podoby) rychlostí 100 MSa/s, zatímco původní typ DDS140 pouze 39 kSa/s.



Obr. 29. Srovnání možností jednotlivých typů osciloskopů

Další vhodnou funkcí novějšího osciloskopu VDS2062 je, že umožňuje akviziční mód „Peak Detect“. Ten sice není zcela přesný v čase, zato ale umožňuje zachytit a zobrazit krátké špičky v signálu, kterými je proudový signál v prováděném experimentu specifický.

Vstupní obvody, a stejně tak zabudovaný osciloskop, jsou na VN straně experimentu, přímo na napětí zvláknovací elektrody. Je proto nutné vytvořit napájecí zdroj, který bude zajišťovat jejich spolehlivou funkci.

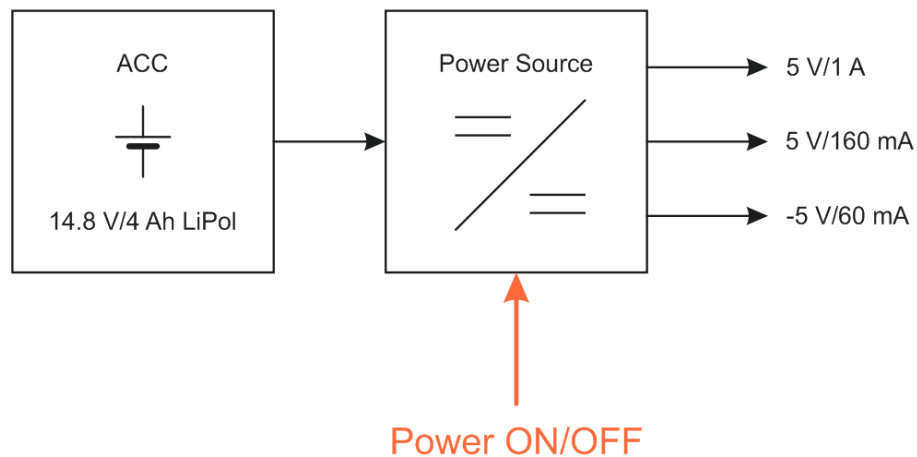


Obr. 30. Blokové schéma zapojení celého měřidla

Požadavky na napájecí zdroj jsou:

- 5 V/1 A pro osciloskop VDS2062,
- ± 5 V/20 mA pro vstupní zesilovač,
- ± 5 V/40 mA pro aktivní vstupní filtry,
- 5 V/100 mA pro optické USB rozhraní.

Celkově tak je potřeba vytvořit tři samostatné napájecí zdroje, které by z vhodného akumulátoru připravovaly 5 V/1 A, 5 V/160 mA a -5 V/60 mA. Z důvodu účinnosti a celkové potřebné doby výdrže akumulátoru byly zvoleny zdroje impulzní.

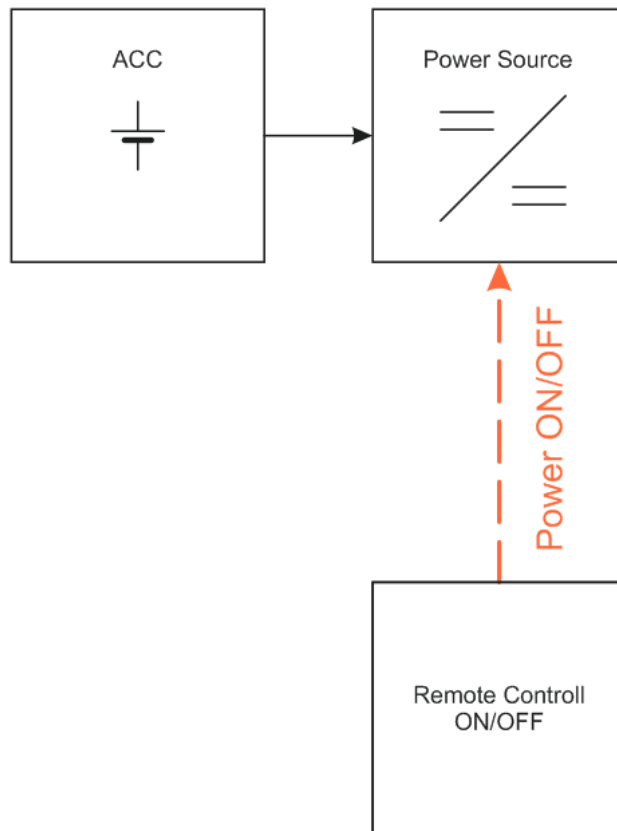


Obr. 31. Blokové schéma napájecího zdroje

Důležitou úlohou napájecí části je, kromě zajištění napájení všech obvodů, také bezpečnost provozu akumulátoru. Použitý akumulátor je typu LiPOL 14,8 V/4 Ah. Jedná se o 4 články v sérii. Dle výrobce je vhodné jeho vybíjení ukončit při napětí cca 3,7 V/článek, resp. 3,5 V/článek, což je kritická hodnota, kdy dochází k prudkému snížení jeho životnosti. O tyto požadavky se stará napájecí zdroj, který při příliš nízkém napětí ukončí svoji činnost a akumulátor odpojí, takže není dále vybíjen. Zdroj obsahuje také tavnou pojistku, k jejímuž vybavení dojde v případě zkratu nebo přetížení zdrojové napájecí části.

Napájecí zdroj obsahuje obvody, které během provozu připojí napěťový dělič od akumulátoru k druhému, jinak nevyužívanému, vstupu zabudovaného osciloskopu. Je tak možné během provozu vzdáleně sledovat stav akumulátoru a odhadovat zbývající čas do jeho vybití.

Napájecí zdroj, a tím také celý měřicí přístroj, lze ovládat (zapínat a vypínat) k tomu účelu vyvinutým dálkovým ovladačem. Ovladač se nachází v bezpečné vzdálenosti od experimentu, takže obsluha není ohrožena vysokým napětím. Ovladač je s měřidlem propojen izolovaným optickým kabelem, který není elektricky vodivý. Na straně obsluhy je zdroj LED světla 650 nm, který při dostatečné intenzitě spustí samotný měřicí přípravek.



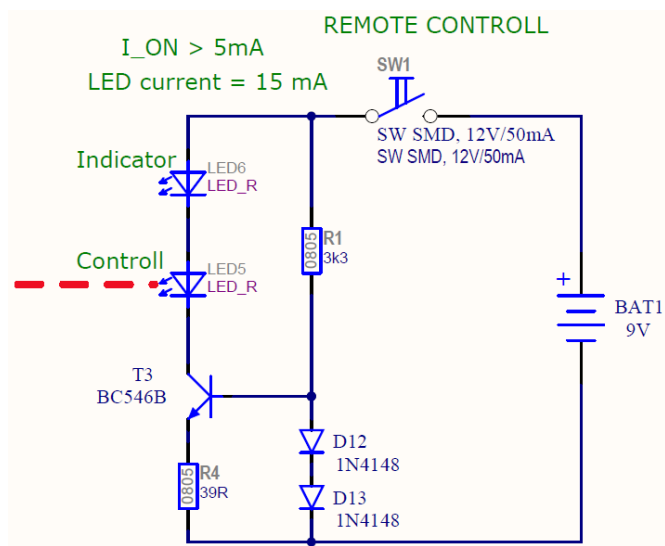
Obr. 32. Dálkové ovládání

Modul dálkového spouštění je realizován jako zdroj světla s konstantní intenzitou, který budí optický kabel typu TOSLINK. Tento typ optického kabelu je primárně určen pro krátká galvanicky oddělená spojení digitálních audiozařízení pomocí světla o vlnové délce 650 nm, kde má použité polymerní vlákno nejmenší ztráty. Nejedná se tedy o vlákno skleněné, ale plastové.



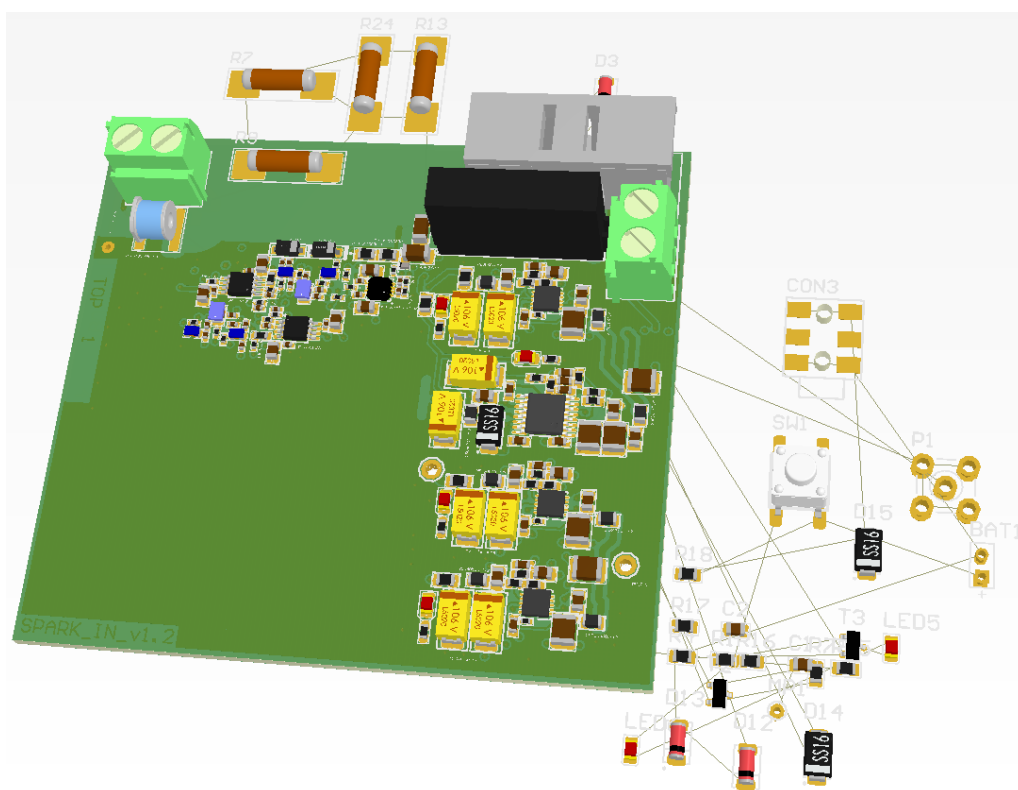
Obr. 33. Standard JIS F05 (TOS Link) – konektor optického kabelu použitý pro ovládání napájení [11]

Ke spuštění napájecích zdrojů v měřícím přípravku dojte tehdy, pokud proud LED zdroje světla překročí hodnotu 5 mA. V ovladači je nastaven konstantní proud LED 15 mA, což je zajištěno jednoduchým proudovým stabilizátorem, viz Obr. 34. Napájení ovládacího modulu je realizováno klasickou 9V alkalickou baterií typu 6F22.



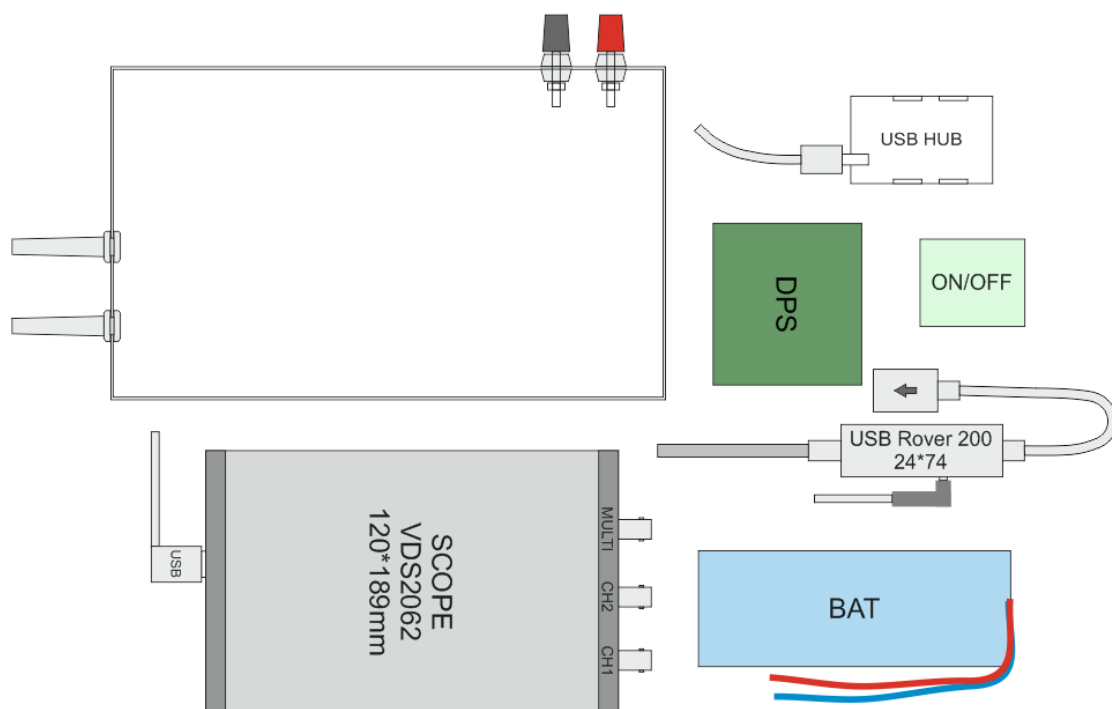
Obr. 34. Elektrické schéma zapojení dálkového ovládacího modulu

Veškeré obvody jsou vytvořeny technologií SMD na 4vrstvě plošném spoji. Na něm jsou umístěny vstupní obvody, filtry a napájecí zdroje. Plošný spoj o rozměru 67×74 mm je oboustranně osazen, obsahuje 222 elektronických součástek. Jeho návrh byl proveden v návrhovém systému Altium Designer [f], který mj. umožňuje zobrazení jak 3D modelů součástek, konstrukčních dílů, tak i zástavbu do vyšších průmyslových celků.

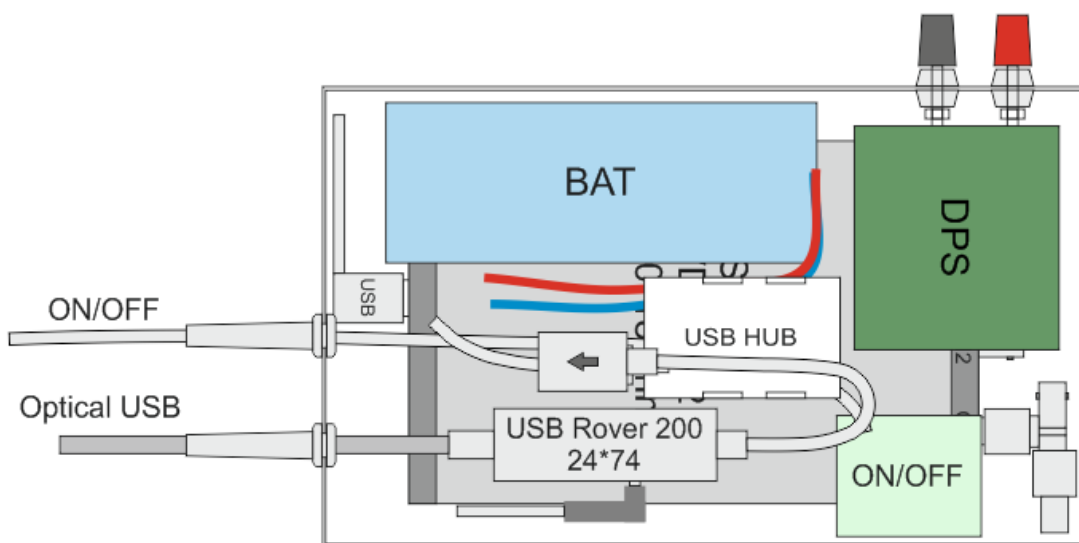


Obr. 35. Snímek rozpracovaného návrhu desky plošných spojů (prostorové zobrazení)

Celek měřicího přípravku se skládá z uvedených obvodů, které jsou integrovány v kovovém uzavřeném krycím dílu. Jedná se o hliníkový box s rozměrem 250×150×50 mm, který má jednu plochu uzavíratelnou. Tato krabička byla zvolena tak, že představuje nejmenší možný objem, s minimální rezervou, potřebný k umístění osciloskopu a akumulátoru. Ostatní obvody mají jen minimální nároky na prostor, přesto muselo být jejich rozmístění optimalizováno. Výsledné uspořádání je znázorněno na Obr. 37.



Obr. 36. Jednotlivé díly měřicího přípravku



Obr. 37. Vnitřní uspořádání měřidla

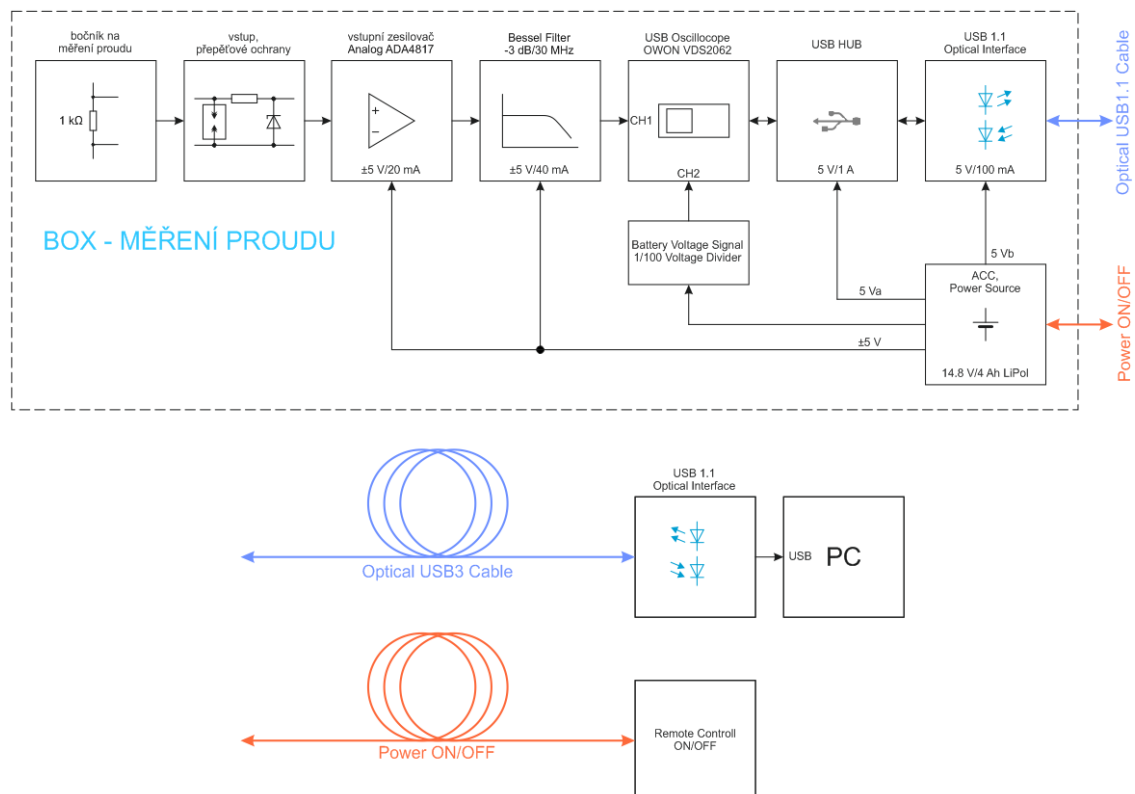
4.6 Použití přípravku

Vyvinuté zařízení slouží k bezpečnému vzdálenému měření proudu na vysokonapětovém potenciálu. Zařízení je určeno pro provoz na Katedře netkaných textilií Technické univerzity v Liberci při výzkumech elektrostatického zvlákňování střídavým proudem.

Tato kapitola poskytuje základní informace o struktuře a funkci zařízení, a dále obsahuje bezpečnostní upozornění, pokyny pro jeho provoz a údržbu. Je zde popsána koncepce zařízení, jeho funkce a použití. V příloze jsou obvodová schémata a další dokumenty potřebné k jeho provozu. Kapitola shrnuje vlastnosti měřicího zařízení určeného pro výzkum elektrostatického zvlákňování a zároveň je souborem pokynů k jeho bezpečnému provozování.

Přípravek pro měření proudu (dále jen „zařízení“) slouží k zobrazení a záznamu průběhu elektrického proudu zvlákňovací elektrodou s polymerem při procesu střídavého elektrostatického zvlákňování. Zařízení se skládá z těchto částí:

- Hlavního Boxu (dále jen „Box“), který snímá průběh proudu,
- signálového optického kabelu, kterým probíhá přenos signálu do PC,
- modulu dálkového spouštění, kterým se aktivuje Box (zapnutí a vypnutí),
- ovládací aplikace v PC.



Obr. 38. Blokové schéma zařízení se skládá z Boxu, optického USB kabelu a PC, dálkového ovladače

V hlavním Boxu je umístěn USB osciloskop, který má na 1. kanál *CH1* přiveden signál ze snímacího rezistoru. Na 2. kanálu *CH2* je napětí AKU v poměru *1:100*. Je možné využít i konektor s označením *MULTI*, který může být nastaven např. jako *Trigger-Output*.

Box je elektricky připojen na VN potenciál – celá krabička je přímo na výstupu VN transformátoru. K Boxu se proto během provozu experimentu nesmí přibližovat pracovníci nebo jakékoliv elektricky vodivé předměty. Box obsahuje lithium-polymerový akumulátor (dále jen „*AKU*“), snímací rezistor, ochrany proti přepětí, USB osciloskop, optický USB převodník a výstupní konektor. Na vnější povrch Boxu je přivedeno VN přímo z transformátoru. K výstupnímu konektoru se pak připojuje zvláknovací elektroda s polymerem.

V Boxu je integrován snímací rezistor, na kterém vzniká dle Ohmova zákona při průtoku elektrického proudu odpovídající úbytek napětí. Takto vzniklý signál je upraven a převeden na signál optický, který se přenáší do PC s ovládacím programem.

Napájecí zdroj s AKU poskytuje napětí ± 5 V pro napájení všech obvodů. Použitý AKU zajišťuje provoz zařízení po dobu šesti hodin. AKU je 4článekový ($4 \times 3,70$ V), nominální napětí je 14,80 V. Nabíjení probíhá k tomu určeným nabíječem „*DC-4S*“ nebo ekvivalentním zařízením, které zajišťuje rovnoměrné rozložení napětí na všech člancích (dále jen „*balancování*“). K nabíječi se AKU připojuje 5pinovým konektorem, který balancování zajišťuje. Nabíjení je nabíječem ukončeno v okamžiku dosažení $4 \times 4,20 = 16,80$ V. Během provozu je napětí AKU v Boxu sledováno, jakmile klesne pod hodnotu $4 \times 3,40 = 13,60$ V, dojde k automatickému vypnutí zařízení a odpojení AKU. V tomto případě je nutno AKU ihned dobít.

Proti zkratu je AKU chráněn tavnou skleněnou pojistkou typu 5×20 mm T2 A/250 V. Hodnota je tedy 2 A a pojistka je tzv. *pomalá* resp. *zpožděná*. V případě jejího vybavení (přepálení), je možné ji nahradit uvedeným typem. Pokud však opětovně vybaví, nemá smysl pokoušet se věc napravit instalací pojistky o vyšší hodnotě. Použití pojistky jiného typu se z bezpečnostních důvodů nedoporučuje.

Aby bylo možné bezpečně ovládat osciloskop v Boxu, je komunikace s PC zajištěna optickým USB kabelem. Tento kabel obsahuje optické vlákno a má elektricky nevodivý plášť, takže poskytuje mimořádně dobré galvanické oddělení. Jeho délka je 10 m. Dovoleno poloměr ohybu tohoto kabelu je 7 cm. Ovládací modul dálkového spouštění (včetně jeho elektrických částí) je tedy galvanicky oddělen od Boxu. S ohledem na reálné provozní podmínky (prach, vlhkost) však nelze vyloučit latentní elektrické svody v řádu $10^{10} \div 10^{12} \Omega$, proto je nutné kabel ve vhodném místě „*uzemnit*“ např. obtočením okolo uzemněného kovového předmětu. Omezí se tak případný přenos náboje a svodových proudů na stranu dálkového ovladače. Dovoleno nejmenší poloměr ohybu ovládacího kabelu je 7 cm.

Signálový kabel je vyroben z elektricky nevodivých materiálů a je tedy galvanicky oddělen od Boxu. S ohledem na reálné provozní podmínky (prach, vlhkost) však nelze vyloučit latentní elektrické svody v řádu $10^{10} \div 10^{12} \Omega$, proto je nutné kabel na vhodném místě „uzemnit“ např. otočením okolo uzemněného kovového předmětu. Omezí se tak případný přenos náboje a svodových proudů na stranu USB konektoru a PC.

Box je ovládán z bezpečné vzdálenosti pomocí modulu dálkového spouštění. Tento modul obsahuje zdroj světla (LED 650 nm), který je nasměrován do ovládacího optického kabelu typu POF 980/1000 μm . Při přepnutí kolébkového vypínače na modulu do polohy „1“ dojde k aktivaci hlavního Boxu. V poloze „0“ je Box vypnutý. Pro aktivaci Boxu je zapotřebí takový světelný výkon, který v ovládacím modulu odpovídá proudu LED $>5 \text{ mA}$. Nastavený proud LED je 15 mA. Modul dálkového spouštění je napájen běžnou 9V alkalickou baterií typu 6F22. Tato baterie má v ovladači životnost 7 hodin provozu.

Ovládací aplikace na PC s OS WIN umožňuje vzdáleně nastavovat osciloskop v Boxu. Dále zobrazuje změřené průběhy elektrického proudu přenášené z Boxu USB optickým oddělovačem. Ovládací aplikaci pro použitý osciloskop *OWON VDS2062* lze získat zdarma na webu výrobce *Fujian Lilliput Optoelectronics Technology Co., Ltd.*:

http://www.owon.com.hk/software/pc/OWON_VDS_setup.rar

V době vzniku tohoto dokumentu (8/2014) byl název instalačního souboru s aplikací po extrakci archivu „*OWON_VDS_S2_1.0.33_Setup.exe*“.

Před vlastním měřením je nutno dodržet tento postup:

- Seznamte se s bezpečnostními opatřeními,
- do PC nainstalujte ovládací aplikaci (viz kapitola *Ovládací aplikace*), ovladač pro WIN se instaluje automaticky během instalace aplikace,
- změřte napětí 9V baterie v dálkovém spouštěči^{*1}:
 - pokud je ve vypnutém stavu $>8,5 \text{ V}$, je její stav uspokojivý a lze pokračovat,
 - pokud je ve vypnutém stavu $<8,5 \text{ V}$, krabičku spouštěče odkrytujte odšroubováním 4 vrutů, baterii vyměňte za novou a spouštěč zakrytujte,
- zkontrolujte stav nabití AKU v Boxu^{*2}, přibližný odhad zbývající energie resp. zbývajícího času provozu dle napětí (100 % odpovídá cca šesti hodinám provozu):
 - $16,8 \text{ V} \approx 100 \%$, AKU plně nabit,
 - $15,2 \text{ V} \approx 50 \%$, dostatečná zbývající kapacita,
 - $<14,4 \text{ V} \approx 5 \%$, nelze pokračovat, nabijte AKU,
- ujistěte se, že na USB kabelu (konektoru) není zbytkový elektrický náboj, aby nedošlo k poškození PC nebo optického převodníku, případný náboj svěst do Země přes rezistor o hodnotě $1 \text{ M}\Omega$,
- zatím ještě nepřipojujte USB signálový kabel do PC,
- zajistěte bezpečnost experimentu.

Pozn.:

*1 Kontrolu napětí 9V baterie v dálkovém spouštěči lze provést změřením napětí na konektoru JACK 3.5mm na ovladači.

*2: Kontrolu napětí AKU lze provést buď otevřením krytu Boxu a přímým měřením na svorkách AKU, nebo připojením zařízení k PC a kontrolou stejnosměrné úrovně na kanálu 2 v ovládací aplikaci. Kanál 2 osciloskopu je přes napěťový dělič s poměrem 100:1 po aktivaci Boxu dálkovým spouštěčem připojen na AKU. Např. měřené napětí 154 mV potom odpovídá svorkovému napětí AKU o hodnotě 15,4 V.

Po provedení kroků popsaných v kapitole *Příprava zařízení* lze zařízení spustit a provozovat. Doporučený postup je tento:

- Ujistit se, že jsou zajištěna veškerá bezpečnostní opatření,
- aktivovat Box přepnutím přepínače na dálkovém spouštěči do polohy „1“,
- vyčkat 5 s,
- připojit USB signálový kabel do PC,
- spustit ovládací aplikaci v PC (pokud je ovladač osciloskopu správně nainstalován, osciloskop je připojen a funkční, pak aplikace rozhraní automaticky připojí).

Pozn.: Pokud nyní měřící řetězec nepracuje, je zapotřebí provést vizuální kontrolu celého zařízení a pokusit se znovu o spuštění zařízení výše uvedeným postupem.


Pokud je vše v pořádku, tedy osciloskop v Boxu reaguje na povely z aplikace a naměřené průběhy (kanál 1) se přenášejí na monitor PC, lze začít s experimenty. Manuál k osciloskopu OWON VDS2062 lze získat na webu výrobce:

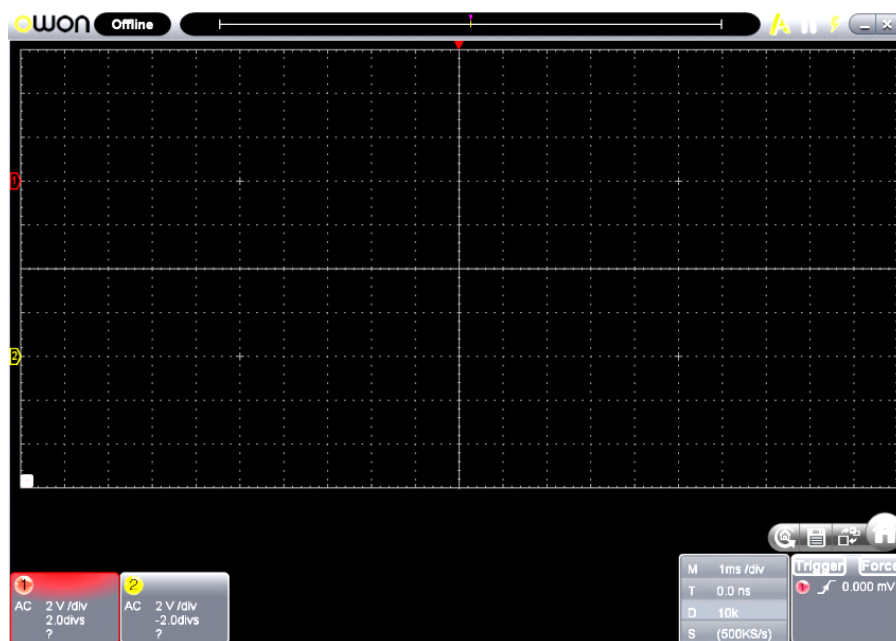
http://www.owon.com.hk/probook/VDS_Series_User_Manual.pdf

Pozn.: V ovládací aplikaci lze během provozu kontrolovat hodnotu napětí AKU. Kanál 2 osciloskopu je přes napěťový dělič s poměrem 100:1 připojen na AKU. Např. měřené napětí 154 mV odpovídá skutečnému svorkovému napětí AKU o hodnotě 15,4 V s tolerancí 2 %.

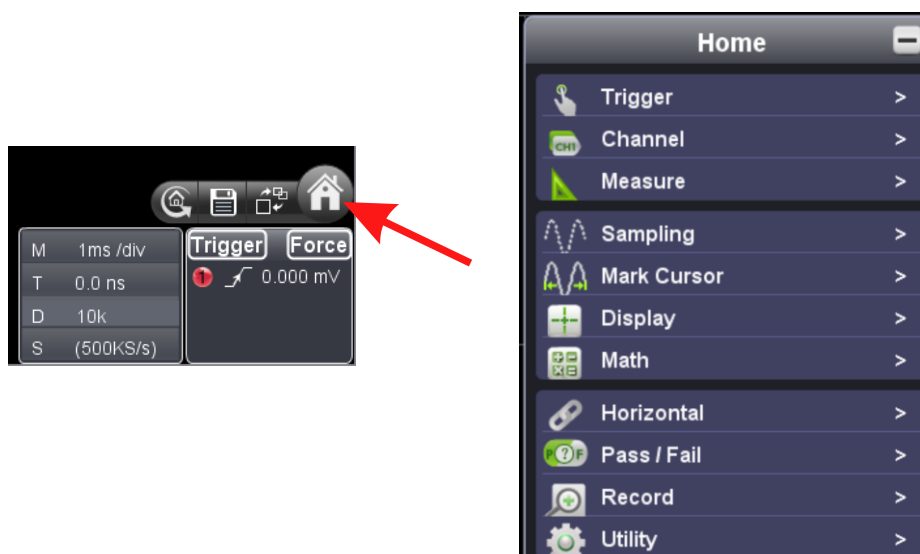
Pozn.: Tento návod nenahrazuje původní manuál od výrobce osciloskopu, pouze uvádí tipy, jak osciloskop nejlépe využít k záznamu proudu při zvlákňování.

SW, který ovládá osciloskop v zařízení, pravděpodobně při instalaci umístí na pracovní

plochu počítače ikonu s názvem „VDS_S2“.  Po spuštění aplikace by mělo být vidět aplikační okno, viz Obr. 39.



Obr. 39. Spuštěná ovládací aplikace




Obr. 40. Spuštěná ovládací aplikace – aktivace menu a nastavení parametrů

Parametry nastavení a další funkce:

- CHANNEL
 - u obou kanálů CH1 a CH2: nastavte Coupling *DC*, probe *1:1*
- MEASURE
 - u CH2 nastavte zobrazení V_{AVG} (údaj o napětí AKU/100 [V])
- SAMPLING Mode (jak je vzorkován signál)
 - *Sampling*: doporučeno, tento mód je vhodný pro většinu měření
 - *Peak Detect*: vhodný pro sledování impulzů, náhodné impulzy jsou zachyceny s vyšší pravděpodobností, ale není zcela přesný v čase
- UTILITY
 - export obrázku průběhu
 - *.png, *.bmp, apod., obrázky (snímek aplikace s průběhem)
 - export surových dat se provede zvolením vhodného formátu a kliknutím na tlačítko *PAUSE&EXPORT*
 - formát *.bin (doporučeno), velikost cca 10 MB, tato data lze později ovládací aplikací i načíst, prohlížet, případně dále exportovat do jiného formátu
 - formát *.txt, velikost cca 247 MB, čas a hodnota, odděleno mezerami
 - *.csv, velikost cca 155 MB, čas a hodnota, odděleno čárkou
 - *.xls, vytváří soubory typu MS Excel o velikosti cca 3 MB, přičemž do každého uloží jen část průběhu o délce 50 tisíc vzorků, 10 milionů vzorků tak bude rozděleno do 200 *.xls souborů (omezení starších verzí Excel jest 64 tisíc řádků na 1 list)
 - načtení dříve uloženého záznamu do aplikace pro jeho prohlížení
 - lze provést kliknutím na Open File, vybere se dříve uložený záznam formátu *.bin, tato uložená data lze prohlížet i bez připojeného osciloskopu, lze nastavit časové i napěťové rozlišení a v záznamu se pohybovat
 - MULTI
 - toto nastavení se týká třetího BNC konektoru na osciloskopu s označením MULTI, tento konektor může být využit např. jako výstup signálu Trigger (začátek záznamu)

Tipy pro nastavení a používání ovládací aplikace:

- Vždy mějte nastavenou plnou hloubku paměti osciloskopu *10 M* (tj. 10 milionů vzorků)
- během měření a záznamu vypněte *CH2* (napětí AKU), obvykle se tak dosáhne vyšší vzorkovací rychlosti na *CH1*, případně budou menší výstupní soubory s daty,
- horizontální časovou osu mějte nastavenou v režimu *Main*, nikoliv *Zoom*,
- jakmile aplikace detekuje připojení osciloskopu, obvykle ho spustí, a to v módu *Auto-Trigger/RUN*, v opačném případě je nutno kliknout na ovládací prvek *RUN/STOP*  v pravém horním rohu aplikace,
- pokud potřebujete ukládat data pro další zpracování, použijte přednostně formát *.bin – viz výše Parametry nastavení/UTILITY/export surových dat.

Činnost zařízení se ukončí přepnutím kolébkového přepínače na dálkovém spouštěči do polohy „0“. Tím se odpojí AKU a zařízení je uvedeno do režimu *vypnuto*. AKU je fyzicky odpojen od dalších obvodů a není vybíjen. Před ukončením používání zařízení se zkontroluje stav AKU pomocí kanálu 2 osciloskopu v ovládací aplikaci. Pokud je napětí nižší než 14,8 V, tak je vhodné po ukončení činnosti zařízení AKU nabít na *skladovací napětí* 15,2 V.

Pokud se nepředpokládá provoz zařízení během následujících třiceti dní, doporučuje se, aby se AKU odpojil, vyjmul z Boxu, nabíl na *skladovací napětí* 15,2 V a bezpečně uskladnil na místě k tomu určeném. Nedoporučuje se skladovat AKU při jiném než *skladovacím napětí*, tj. 15,2 V (3,8 V/článek). Povolená tolerance *skladovacího napětí* je $\pm 0,4$ V celkem na celou baterii ($\pm 0,1$ V/článek). Pokud má AKU před uskladněním napětí vyšší než 15,6 V, je nutno ho nejdříve částečně vybit na *skladovací napětí*.

Aby bylo minimalizováno riziko úrazu obsluhy nebo škody na majetku, musí být splněny všechny bezpečnostní pokyny a související předpisy. Musí se dodržovat příslušné předpisy a postupy, zejména tyto:

- Dodržujte bezpečnost práce,
- před zapnutím experimentu se ujistěte, že jsou zajištěna a splněna všechna bezpečnostní opatření,
- nedotýkejte se za provozu boxu,
- nepřibližujte se za provozu boxu,
- k boxu se za provozu nesmí přibližovat žádné elektricky vodivé předměty,
- na boxu je VN (VVN), hrozí újma na životě na zdraví a na majetku,
- box musí být viditelně označen symbolem VN,
- box musí být umístěn tak, aby jeho umístění zajišťovalo ochranu polohou nebo zábranou dle příslušných elektroinstalačních předpisů,
- manipulaci s boxem musí předcházet odpojení VN zdroje a kontrola a odstranění zbytkového náboje,

- zařízení smí obsluhovat pouze osoby s příslušným oprávněním,
- box se nesmí provozovat otevřený (odkrytovaný),
- doporučuje se obsluha v počtu minimálně dvou kvalifikovaných pracovníků,
- v případě vybití AKU během provozu vypněte a odpojte VN zdroj a AKU ihned dobijte:
 - na 100 % 16,8 V, pokud ještě budete zařízení používat,
 - na skladovací napětí 15,2 V, pokud již zařízení používat nebudete.
- Používejte kalibrovaná měřidla,
- po ukončení činnosti zařízení jej vypněte,
- v případě nepoužívání zařízení na více než 30 dní odpojte akumulátor a uskladněte ho (viz kapitoly *vypnutí a skladování zařízení, bezpečnost – AKU*),
- v případě požáru nehaste vodou.

Použitý AKU vyžaduje pozornost obsluhy a pravidelnou údržbu. jedná se o LiPol AKU, proto musí být dodržovány zejména tyto podmínky a pokyny:

- Nesmí se nabíjet nad 4,20 V/článek (odpovídá 16,80 V),
- nesmí se vybíjet pod 3,40 V/článek (odpovídá 13,60 V),
- pokud se nepoužívá, musí se skladovat, skladuje se při napětí 3,80 V/článek, odpovídá 15,20 V (viz *skladovací napětí*),
- nesmí se skladovat vybitý (viz *skladovací napětí*),
- nesmí se skladovat plně nabitý (viz *skladovací napětí*),
- musí se nabíjet výhradně nabíječem k tomu určeným,
- během nabíjení musí být AKU pod neustálým dohledem,
- nesmí se vystavovat teplotám nad 63 °C,
- nesmí se mechanicky namáhat,
- nesmí do něj vnikat jakékoliv předměty,
- nesmí do něj vniknout voda ani vzdušná vlhkost,
- musí se skladovat na místě k tomu určeném, tj. zabezpečeném proti následkům případné exploze, vývinu kouře, tepla, apod.,
- musí se skladovat na místě k tomu určeném s nízkou relativní vlhkostí prostředí a při teplotách +10÷30 °C,
- nesmí se převážet letadlem,
- po skončení životnosti se nesmí vyhodit do běžného komunálního odpadu,
- likvidace se provádí předepsaným způsobem,
- lithiové baterie se při požáru nesmí hasit vodou,
- všechny osoby, které pracují s AKU, musí být obeznámeny s bezpečnostními pokyny.

Tab. 2. Technické parametry zařízení

veličina	parametr	poznámka
název zařízení	<i>SPARK 36000</i>	
typ AKU v Boxu	<i>Li-pol 4×3,7 V sériově</i>	čtěte bezpečnostní informace
kapacita AKU	<i>4 Ah</i>	
energie v AKU	<i>60 Wh</i>	
nominální napětí AKU	<i>14,8 V</i>	
skladovací napětí AKU	<i>15,2 V</i>	dovolená tolerance ±400 mV
napětí plně nabitého AKU	<i>16,8 V</i>	dovolená tolerance ±80 mV
ochrana proti podpětí AKU	<i><13,6 V</i>	AKU se odpojí
provozní odběr proudu z AKU	<i>typ. 700 mA</i>	
doba nepřetržitého provozu	<i>typ. 6 hodin</i>	plně nabitý AKU
doba provozu 9V baterie v dálkovém spouštěči	<i>min. 7 hodin</i>	nová 9V baterie
pojistka proti zkratu	<i>T2A</i>	5×20 mm, 2 A zpožděná
typ nabíječe AKU	<i>HobbyKing DC-4S nebo funkční ekvivalent</i>	nabíječ 4×LiPol s balancováním článků a s ochranami
dovolený nabíjecí proud AKU	<i>max. 2 A</i>	
rezistor pro snímání proudu	<i>888 Ω 2 pF</i>	(impedance vstupu)
vzdálené měření napětí AKU v Boxu (napěťový dělicí poměr)	<i>100:1</i>	napětí AKU je přivede- no přes napěťový dělič na vstup CH2
vzdálené měření napětí AKU v Boxu (chyba děliče+chyba osciloskopu)	<i>±2 %</i>	napětí AKU je přivede- no přes napěťový dělič na vstup CH2
napěťová citlivost signálového vstupu celku	<i>±1 V</i>	tj. optimální úbytek napětí na snímacím rezistoru
dovolené krátkodobé přepětí na vstupu celku	<i>±5 V</i>	krátkodobě

zdroj: výsledky této práce

Tab. 2. Technické parametry zařízení – pokračování

ochrana proti přepětí signálového vstupu	$\pm 90 \text{ V GDT}$ přímo na vstupu, poté v sérii rezistor 250Ω a $\pm 9 \text{ V ZD}$	vstupní ochrana GDT + ZD
povolené provozní napětí VN strany	<i>max. $\pm 93 \text{ kV}$</i>	vůči Zemi s nulovým referenčním potenciálem
latence signálové přenosové cesty	<i>$10 \text{ ms} \div 1 \text{ s}$</i>	tj. zpoždění mezi sejmutím průběhu proudu a zobrazením v ovládací aplikaci
typ osciloskopu v Boxu	<i>OWON VDS2062</i>	
propojení s PC	<i>optické USB 1.1</i>	12 MBit/s
frekvenční rozsah celého měřicího řetězce	<i>$DC \div 30 \text{ MHz}$</i>	-3 dB
impedance signálového vstupu osciloskopu	<i>$1 \text{ M}\Omega // 25 \text{ pF}$</i>	
rozměry Boxu	<i>$150 \times 250 \times 50 \text{ mm}$</i>	
délka optického kabelu k dálkovému spouštěči	<i>5 m</i>	
délka optického kabelu USB pro přenos signálu	<i>10 m</i>	
dovolený poloměr ohybu optických kabelů	<i><i>min. 7 cm</i></i>	

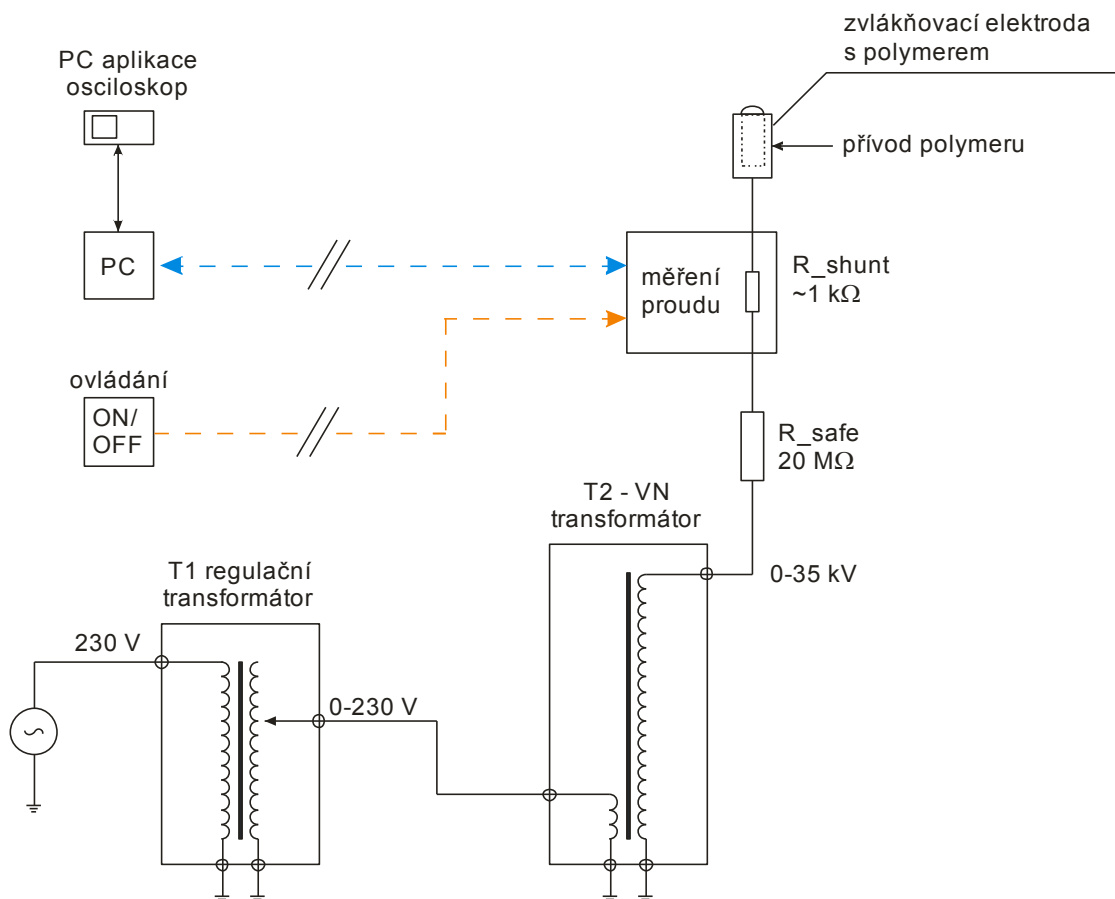
zdroj: výsledky této práce

4.7 První světlo

Tato kapitola poskytuje prvotní informace získané uvedeným zařízením při reálném měření. Stalo se tak dne 9. října 2014, kdy byly poprvé úspěšně naměřeny průběhy elektrického proudu do elektrody při střídavém zvlákňování. Tyto průběhy byly zaznamenány a dále analyzovány.

Po otestování schopnosti měřidla vydržet VN potenciál bylo přistoupeno k vlastnímu měření. To proběhlo ve dvou krocích, kdy se nejprve zaznamenal signál pozadí (proudu bez zvlákňování), a teprve poté, při druhém měření, byl zaznamenán průběh proudu, kdy zvlákňovací proces viditelně probíhal.

Na Obr. 41. je schematicky naznačena konfigurace experimentu. Těsně před zvlákňovací elektrodou bylo do cesty elektrického proudu vloženo měřicí zařízení se snímacím rezistorem. Úbytek napětí na rezistoru byl přenášen do PC jako signál ekvivalentní elektrickému proudu tekoucímu do elektrody.

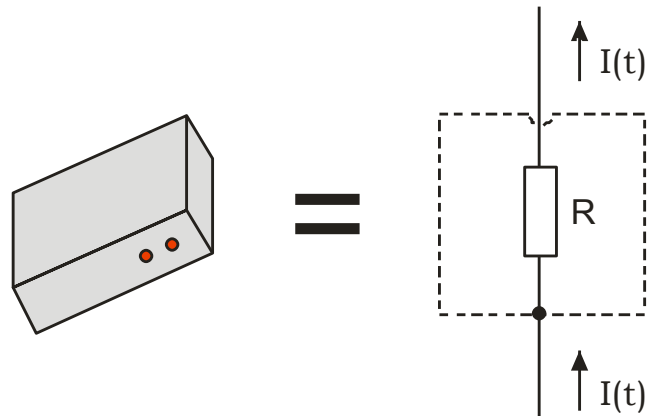


Obr. 41. Elektrické schéma experimentu

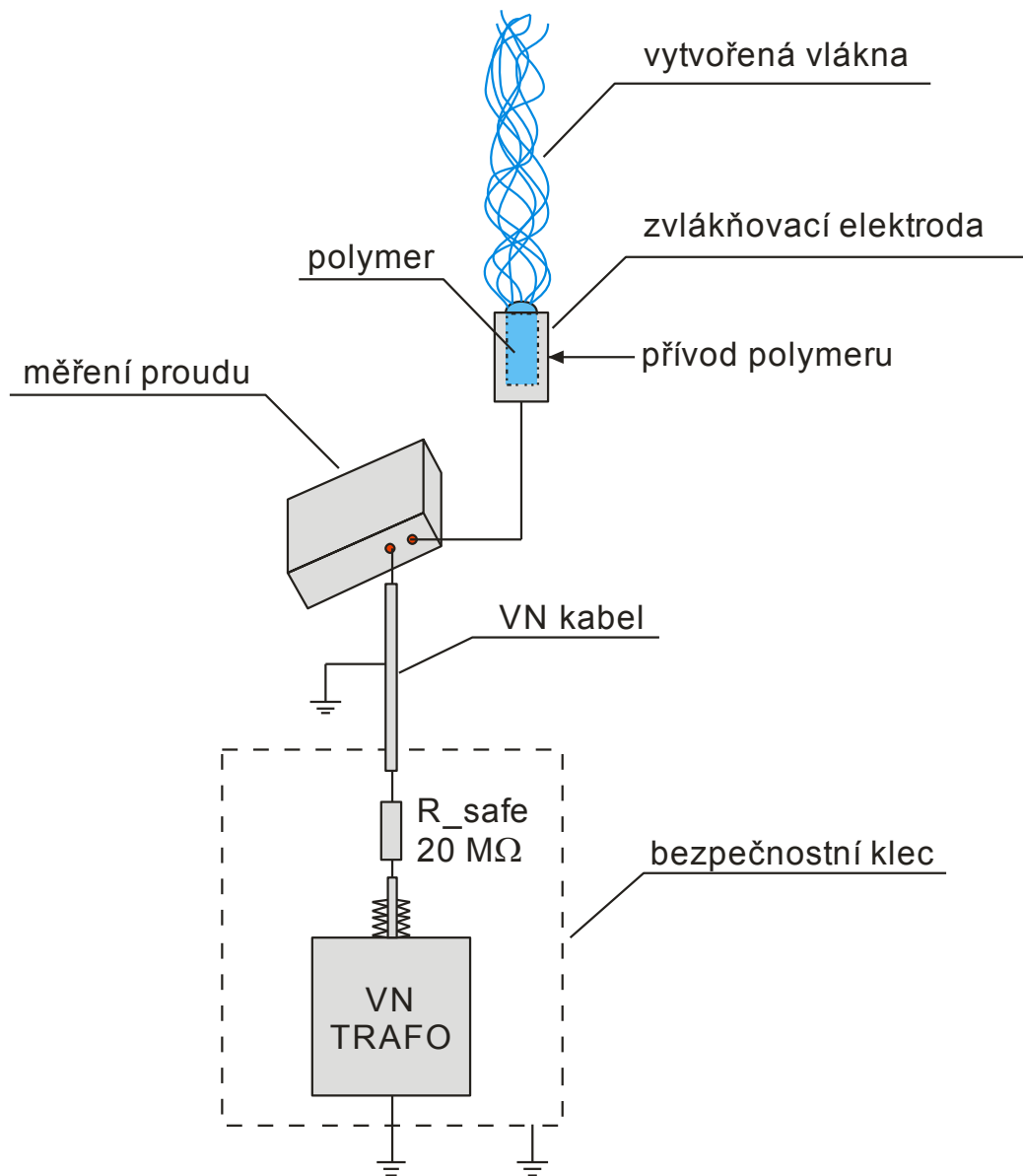
Podmínky měření a nastavení osciloskopu:

- Síťový kmitočet 50 Hz,
- velikost snímacího rezistoru 888 Ω ,
- citlivost vstupu 50(100) mV/dílek (8b rozlišení),
- vzorkovací frekvence 250 MSa/s,
- Acquisition Mode: „Sampling“,
- časová osa 2 ms/dílek (20 dílků na záznam),
- zaznamenané průběhy měly délku 40 ms (časové rozlišení 4 ns),
- ukládáno bylo vždy 10 milionů vzorků (využití plné paměti osciloskopu).

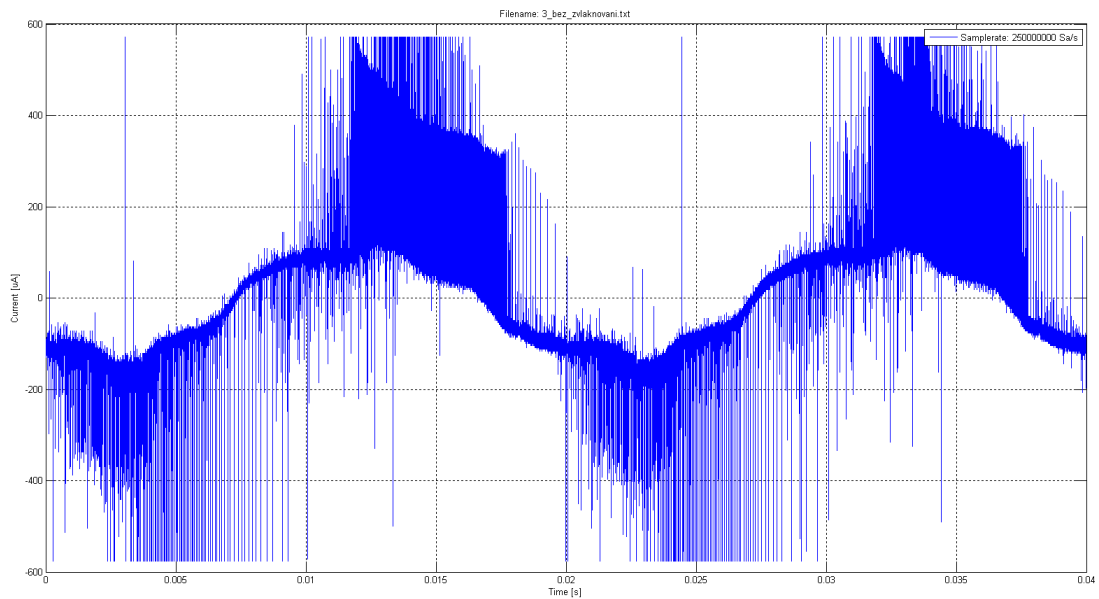
Měřicí zařízení bylo umístěno těsně u zvláknovací elektrody, a tak na jeho krabici byl plný VN potenciál, viz Obr. 42. Na Obr. 43. je znázorněno reálné uspořádání experimentu. Naměřené průběhy jsou na následujících Obr. 44 a dále.



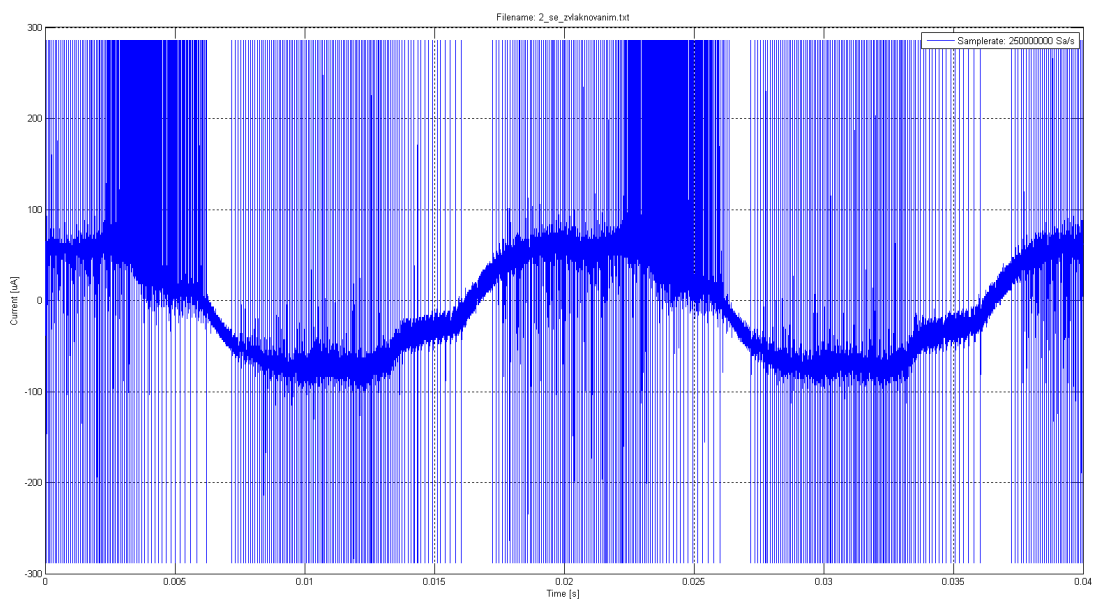
Obr. 42. Kryt měřicího zařízení je připojen na VN



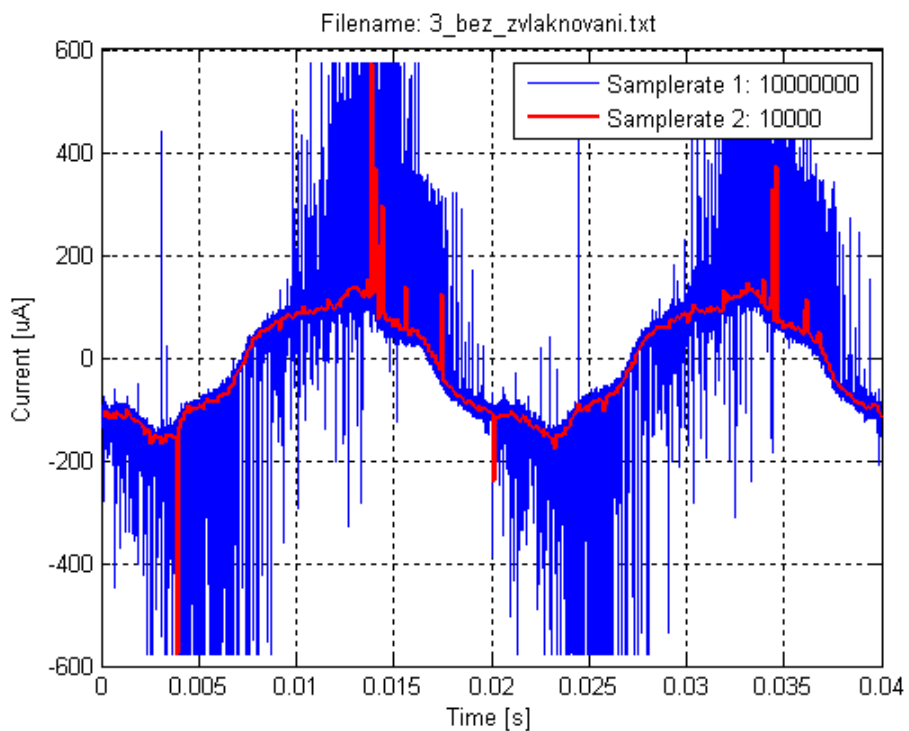
Obr. 43. Zjednodušené blokové schéma experimentu



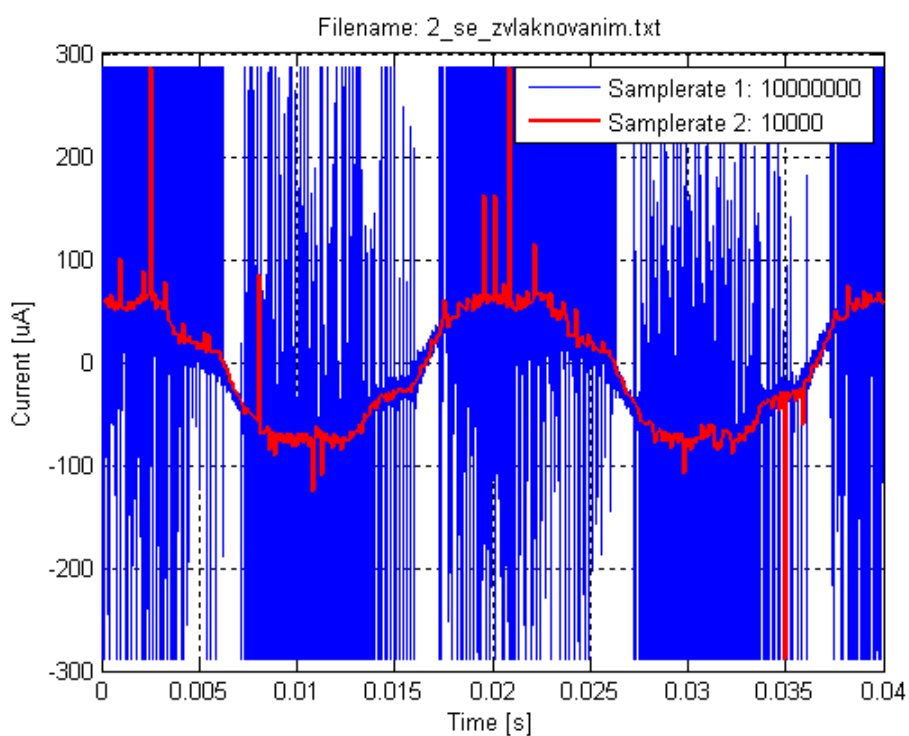
Obr. 44. Bez zvlákňování, plná vzorkovací rychlost 250 MSa/s, 200 μA a 5 ms na dílek, celková délka záznamu 40 ms



Obr. 45. Se zvlákňováním, plná vzorkovací rychlost 250 MSa/s, 100 μA a 5 ms na dílek, celková délka záznamu 40 ms

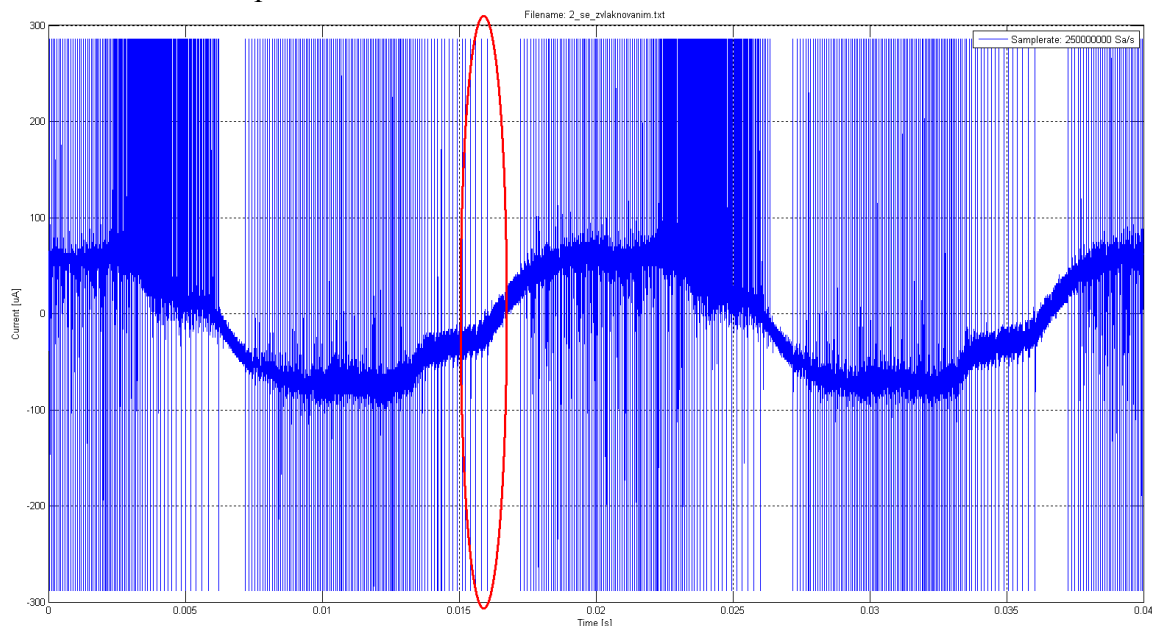


Obr. 46. Bez zvlákňování, průběhy zobrazeny jako 10 MSa/s (modrá) a 10 kSa/s (červená)

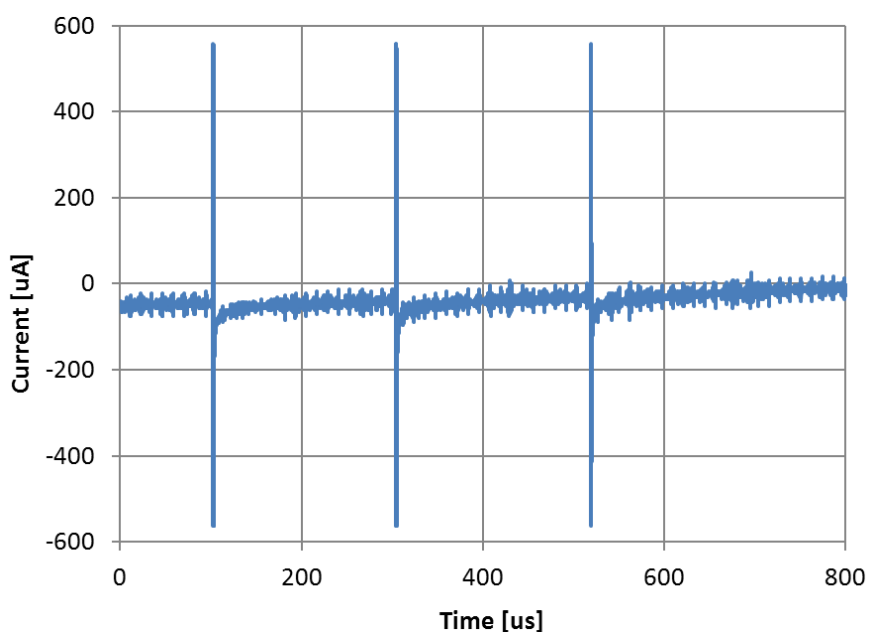


Obr. 47. Se zvlákňováním, průběhy zobrazeny jako 10 MSa/s (modrá) a 10 kSa/s (červená)

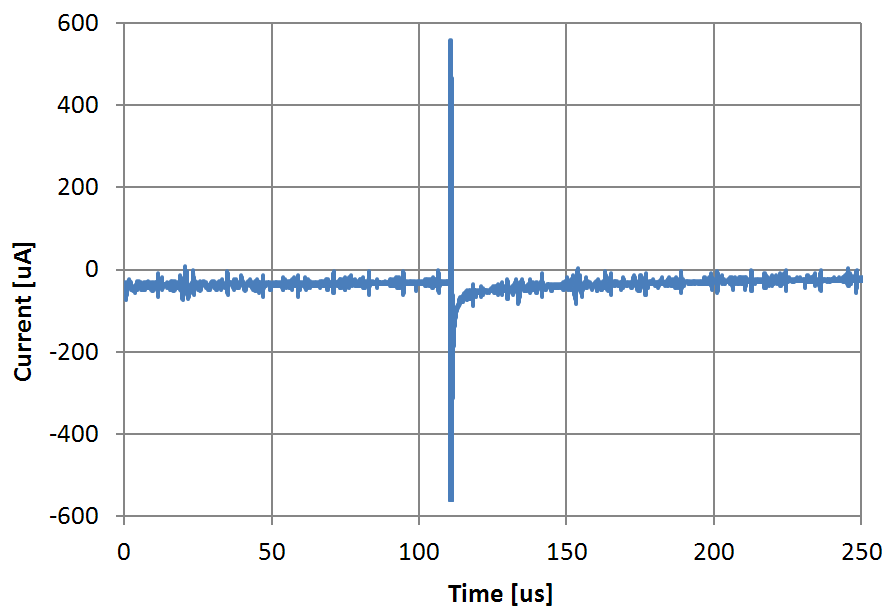
Po uložení uvedených signálů bylo možné přistoupit k jejich analýze. Z předchozích obrázků je patrné, že během probíhajícího zvlákňování sledovaný signál obsahuje periodické impulzy, které se jinak v signálu nevyskytují. Proto byla podrobněji prozkoumána červeně vyznačená oblast na následujícím Obr. 48, který lze nalézt ve větší velikosti v příloze.



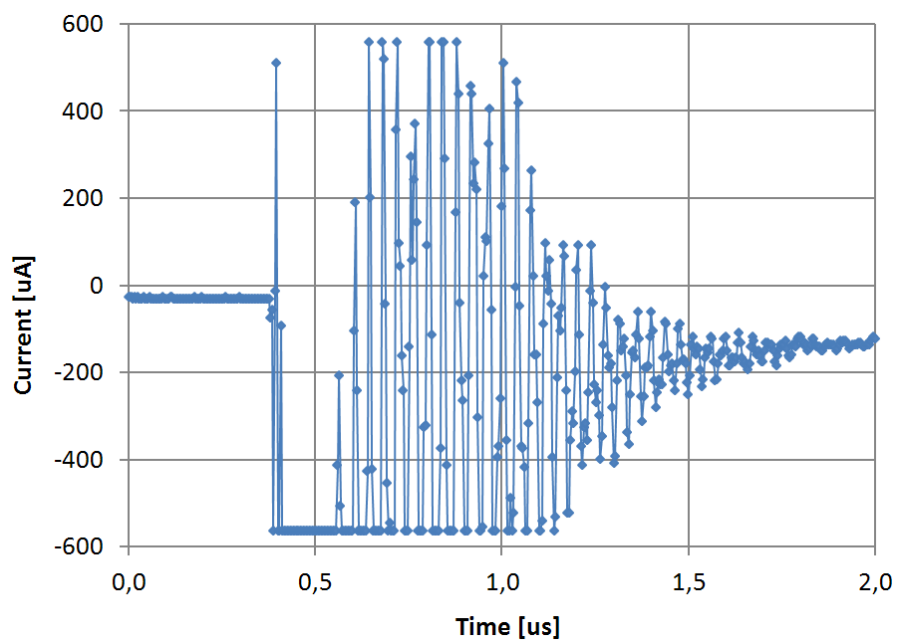
Obr. 48. Oblast zájmu s několika impulzy při zvlákňování (červeně vyznačená oblast), 100 μA a 5 ms na dílek, celková délka záznamu 40 ms



Obr. 49a. Zvětšená oblast zájmu s několika impulzy při zvlákňování (200 μs /dílek)



Obr. 49b. Zvětšená oblast zájmu s jedním impulzem při zvlákňování (50 µs/dílek)



Obr. 49c. Detail proudového impulsu při zvlákňování (500 ns/dílek)

Z Obr. 49a je patrné, že během zvlákňování se v tomto místě signálu vyskytovaly pulzy cca 200 μ s od sebe vzdálené (odpovídá opakovací frekvenci cca 5 kHz). Po dalším zkoumání bylo zjištěno, že opakovací frekvence těchto pulzů se měnila od cca 60 do 200 us. Tomu odpovídá frekvence cca 5÷16 kHz, v závislosti na tom, v jaké části periody síťového napájení se nacházíme.

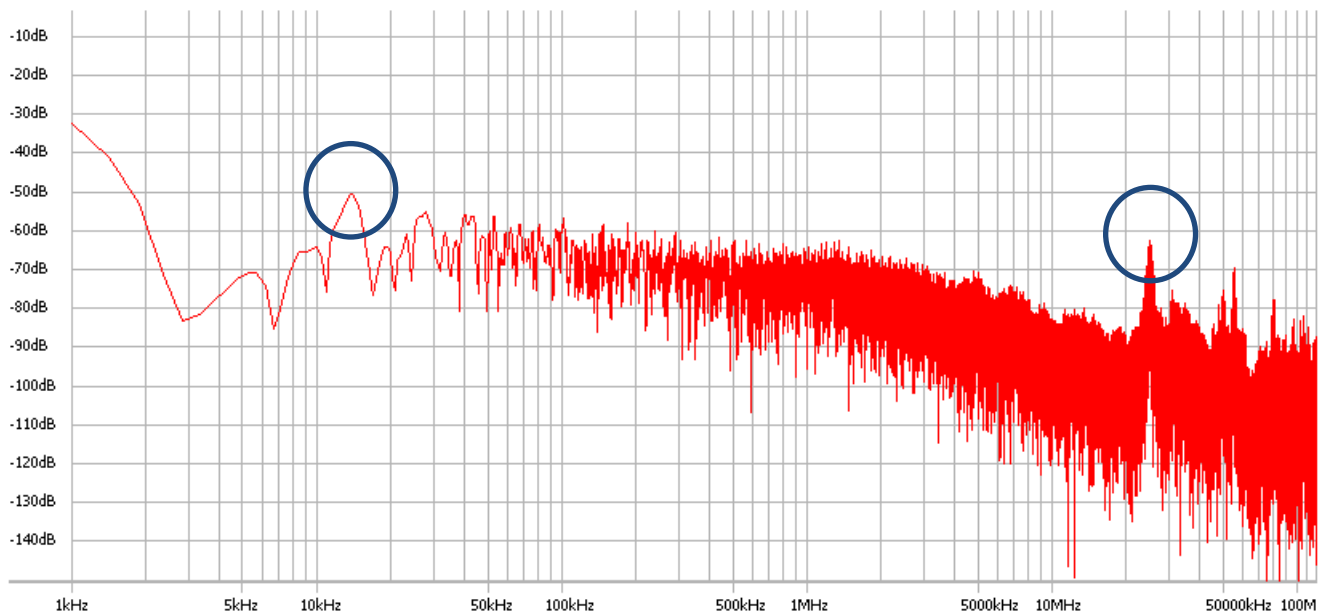
Na Obr. 49c je detail jednoho takového proudového pulzu. Jeho trvání bylo cca 1,5 μ s a skládal se z tlumených kmitů o frekvenci přibližně 25 MHz. Z důvodu saturace vstupu osciloskopu nebyl signál řádně zaznamenán, byl omezen na hodnoty $\pm 550 \mu$ A.

Dále byla provedena FFT [i] spektrální analýza na oba soubory dat se záznamy bez a se zvlákňováním. Frekvenční spektra těchto signálů na první pohled nevypadají příliš odlišně, avšak signál cca 25 MHz je v případě záznamu se zvlákňováním výrazně silnější. Viz následující Obr. 50 a 51.

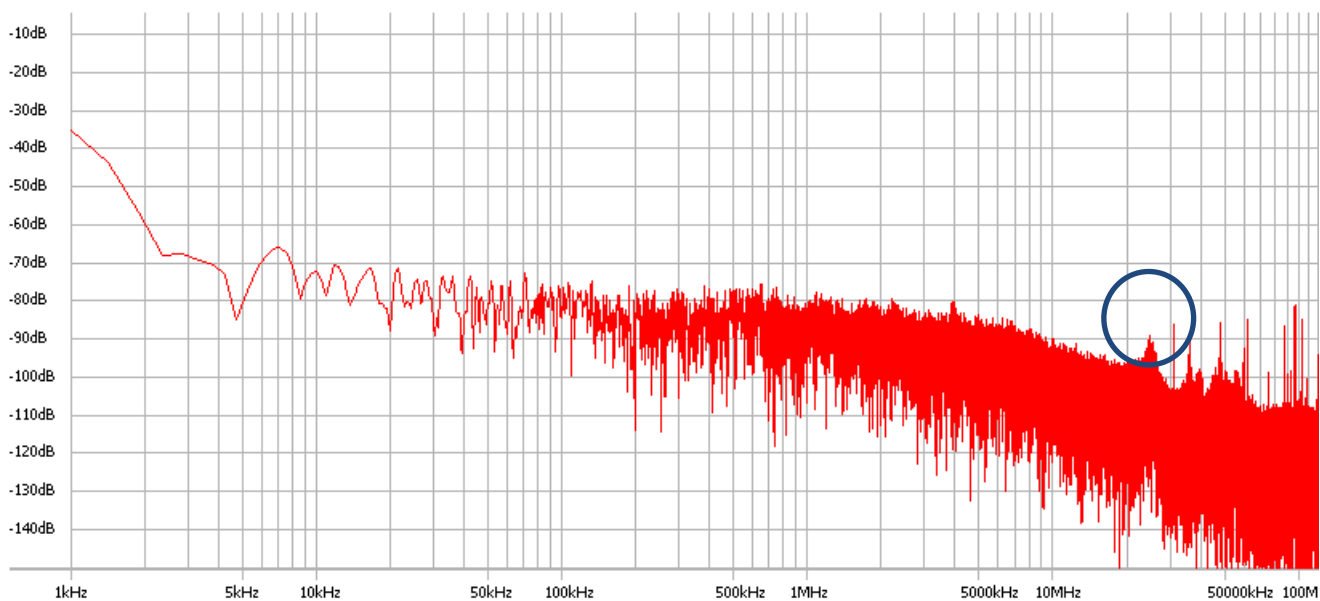
Po vyhodnocení průběhů proudu se ukázalo, že s procesem elektrostatického zvlákňování souvisí impulzní proudový odběr ze zdroje. Byly zde prokázány periodické impulzy, jejichž vzdálenost byla závislá na napětí zdroje. Nakonec bylo zjištěno, že každý takový impuls se ve skutečnosti sestával z více tlumených kmitů. Ukázalo se, že plná vzorkovací rychlost 250 MSa/s je nezbytná pro zachycení zmíněných rychlých dějů (okolo 25 MHz) v oblasti proudových impulzů tekoucích elektrodou při zvlákňování. Je možné, že uvedené chování bylo způsobeno (ovlivněno) použitím ochranného rezistoru 20 M Ω , který byl vložen mezi výstup VN transformátoru a zvlákňovací elektrodu.

Použité vybavení:

- VN transformátor KGUG36,
- měřicí zařízení SPARK 36000,
- polymer PVA 8 % v H₂O.



Obr. 50. Frekvenční spektrum záznamu při zvlákňování střídavým proudem. Je zde patrné lokální maximum na 25 MHz (rezonanční frekvence v impulzech) a maximum na cca 15 kHz, což je opakovací frekvence jednotlivých impulzů.



Obr. 51. Frekvenční spektrum záznamu BEZ zvlákňování (signál 25 MHz je výrazně slabší)

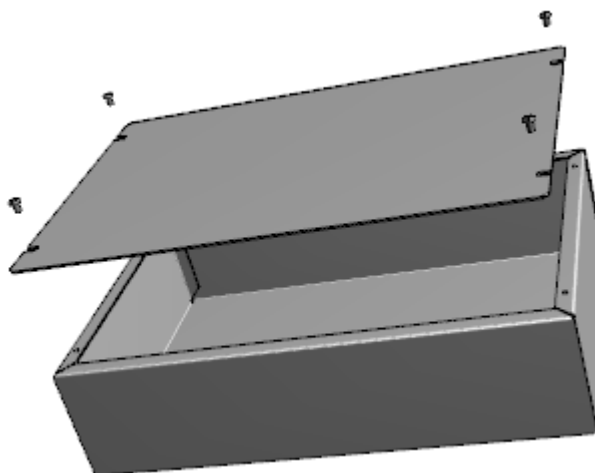
4.8 Koronové výboje

Korona, resp. korunové výboje, je fyzikální jev, který souvisí s povrchovou ionizací, např. na rozhraní vodiče a vzduchu, kde elektrický potenciál překračuje určitou minimální kritickou hodnotu. Tento jev se projevuje spektrální emisí s maximem v oblasti UV 200-400 nm. Ve většině případů má nežádoucí důsledky, mezi které patří zejm. zvýšení ztrát, širokopásmové rádiové rušení, vznik ozonu a dalších chemických prvků a sloučenin, akustické projevy aj. Při vyšších intenzitách dále např. dochází k poruchám prvků a součástí elektrorozvodných sítí.

Lidským zrakem může být korona vnímána až při vyšších intenzitách, kdy je ve spektru zastoupeno určité množství vlnových délek delších než 400 nm, kdy vzniká vjem fialovomodrých odstínů. V případě nižších napětí na menších poloměrech zakřivení (intenzit pole) přesto dochází k ionizačním jevům a doprovodným ztrátám, které nejsou viditelné, přesto je ze zdroje, resp. obvodu, odebírán elektrický proud.

Vznik korunových výbojů závisí zejm. na intenzitě pole, tvaru vodiče, atmosférickém tlaku, složení atmosféry, frekvenci napětí. Podstatný je ale vysoký gradient intenzity elektrického pole, který souvisí s tvarem vodiče. Experimentálně byly odvozeny vztahy [15], které definují pro dané napětí [V] minimální rádius [mm] při dalších podmínkách, pro které již korona nevzniká. Tento jev lze tedy potlačit, nebo zcela zabránit jeho vzniku tím, že pro vodiče budou použity takové geometrické útvary, jejichž nejmenší poloměr zakřivení je dostatečně veliký. Za normálního tlaku a při relativní vlhkosti je kritická hodnota zakřivení cca 2 mm. Protože atmosférické podmínky v důsledku ovlivňují požadovaný kritický poloměr zakřivení, byla v této práci uvažována hodnota $R > 3$ mm.

První navržená zkušební verze měřícího přípravku byla umístěna v kovové krabici o rozměrech 150×250×50 mm typu 1441-16 výrobce *Hammond Manufacturing*. Rádus (poloměr zakřivení) hran není v katalogovém listu definován, ale měřením bylo zjištěno, že jeho typické velikosti jsou $R < 1$ mm.



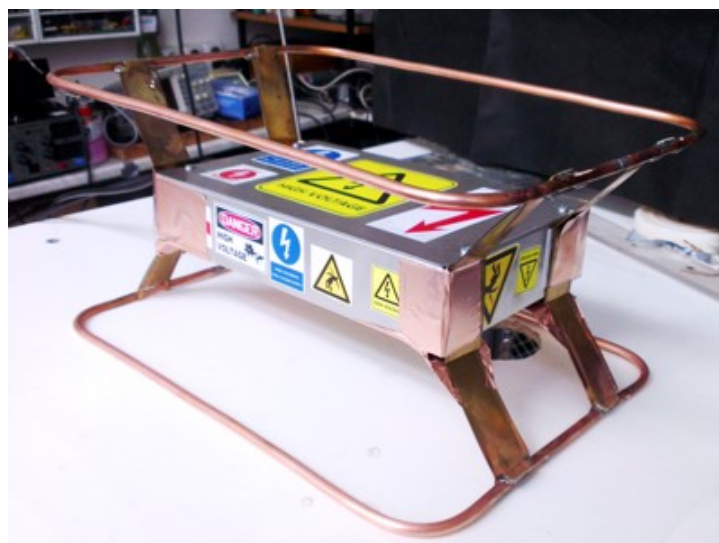
Obr. 52. Pohled na krabičku měřidla

Na hranách s malým poloměrem zakřivení vnikají od určitých napětí podmínky pro vznik koronových jevů. Tyto koronové výboje způsobují změnu proudu tekoucího elektrickým obvodem a důsledkem toho dochází ke vzniku nežádoucího parazitního signálu, ve kterém užitečný signál zcela zaniká.



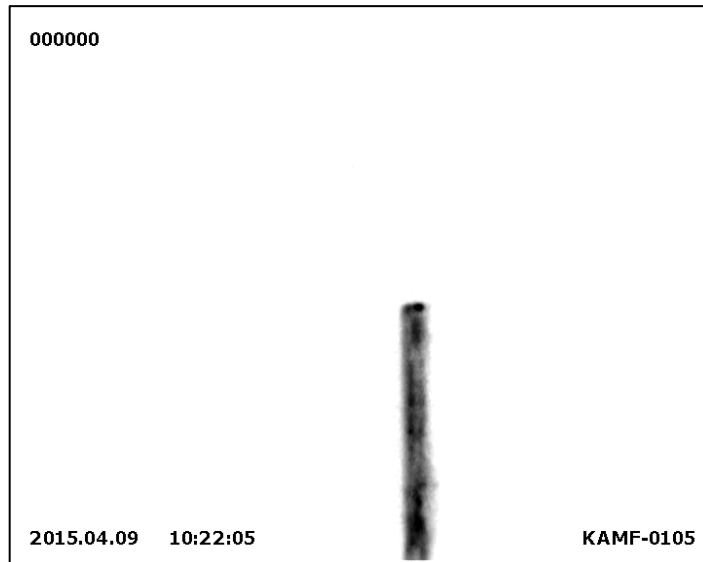
Obr. 53. Zkonstruované a zakrytované měřidlo

Při prvním reálném experimentu byly naměřeny proudové signály. Po jejich následné analýze bylo zjištěno, že rozdíl mezi průběhy proudu při procesu zvlákňování a mimo něj se příliš neliší. Příčinou byly právě zmíněné důvody, proto bylo přistoupeno k úpravě měřícího zařízení do takové podoby, kdy jsou koronové ztráty omezeny na minimum. Bylo toho dosaženo vhodnou instalací měděných trubek s dostatečným průměrem do bezprostředního okolí původní krabice měřidla. Tato úprava využívá principu „skrytí“ elektricky vodivých do oblasti určené většími rozměry krycí trubkové struktury.



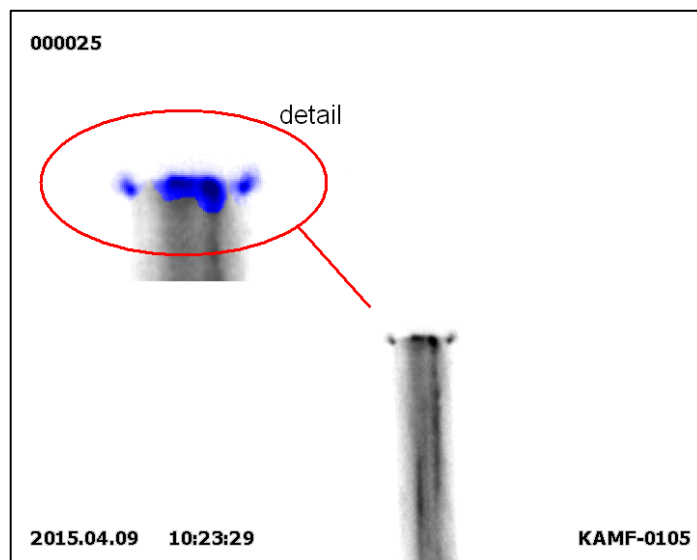
Obr. 54. Měřidlo doplněné protikoronovým opatřením

Korona, která nemusí být patrná lidským zrakem, může být detekována korokamerou, která odhalí i její počáteční stádia. Následující obrázky jsou snímky dvou situací. V obou případech se jedná o detailní záběr na zvlákňovací elektrodu, v jednom případě bez potenciálů, v druhém případě při napětí 39 kV. Pro větší přehlednost byly snímky převedeny do negativu.



Obr. 55. Detail zvlákňovací elektrody v klidu (nulové napětí), zdroj: vlastní testy s použitím korokamery [h]

Na Obr. 56 je korona patrná na horním okraji elektrody. Původní UV snímek byl pořízen v odstínech šedé (zde inverzně), detail elektrody je proveden v umělých barvách. Modré odstíny naznačují oblast výskytu a intenzitu korony.



Obr. 56. Detail zvlákňovací elektrody se zapnutým zdrojem (napětí 39 kVac), zdroj: vlastní testy s použitím korokamery [h]

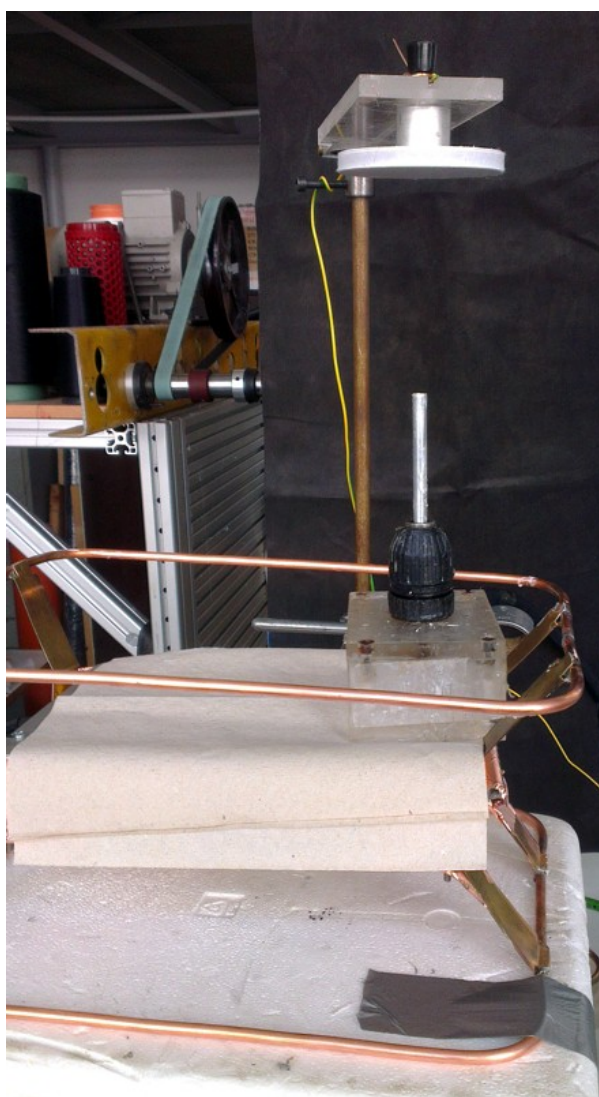
Existují speciální kamery, které jsou citlivé ve spektrální oblasti 200-400 nm, kde se korona nejvíce projevuje. Koronové jevy se téměř neprojevují zářením v tepelné oblasti. Případné tepelné IR záření bývá až sekundárním jevem. Tyto přístroje (korokamery) mívají filtry pro zajištění citlivosti jen v uvedené oblasti. Některé z nich kombinují pohled z viditelné části spektra s UV oblastí. Výsledkem pak je složený snímek, na kterém je viditelná oblast kombinovaná s případnými poruchami způsobenými korunou. Jedním z předních výrobců těchto zařízení je společnost *UViRCO Technologies* [13], která v oboru snímání korony nabízí svoje produkty z rodiny CoroCAM.

Na sestrojeném zařízení byla provedena inspekce výskytu koronových výbojů. Výsledkem jsou čtyři videosoubory prokazující, že na samotném měřidle ke koruně nedochází. Jediná oblast, kde byly tyto jevy pozorovány, je samotná zvlákňovací elektroda. Videosoubory jsou umístěny na přiloženém CD.

5 REÁLNÉ MĚŘENÍ

Zadání práce požaduje provést srovnání průběhů nově získaných s průběhy ze stejnosměrného elektrostatického zvlákňování. Plán experimentů dále předpokládá použití vodného roztoku polyvinylalkoholu a lihový roztok polyvinylbutyralu.

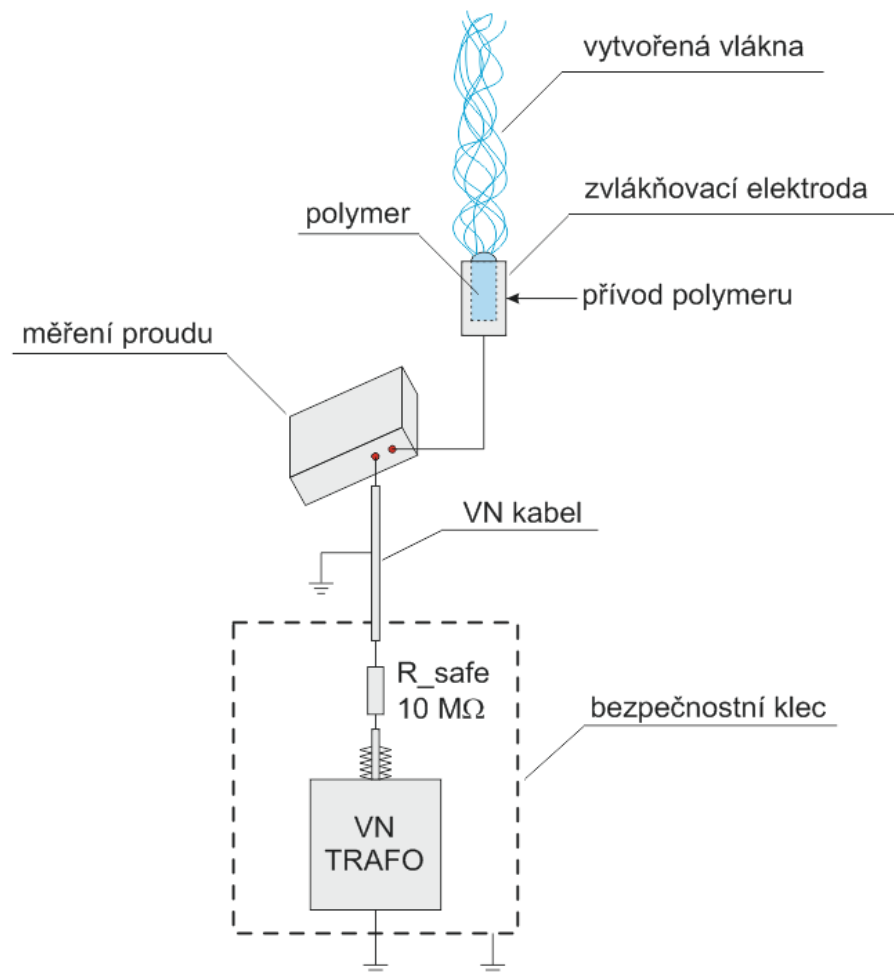
Po dokončení vývoje a konstrukce měřicího přípravku, a po odstranění problémů s koronovými výboji instalací ochranných Cu trubek, došlo při provozu experimentu k záznamu dostatečného množství průběhu proudu dle posledního 4. bodu zadání. Stalo se tak 9. dubna 2015 pod laskavým dohledem vedoucího této práce. Bylo provedeno měření proudu při střídavé i stejnosměrné metodě přípravy vláken elektrickým zvlákňováním. Naměřené průběhy byly zaznamenány.



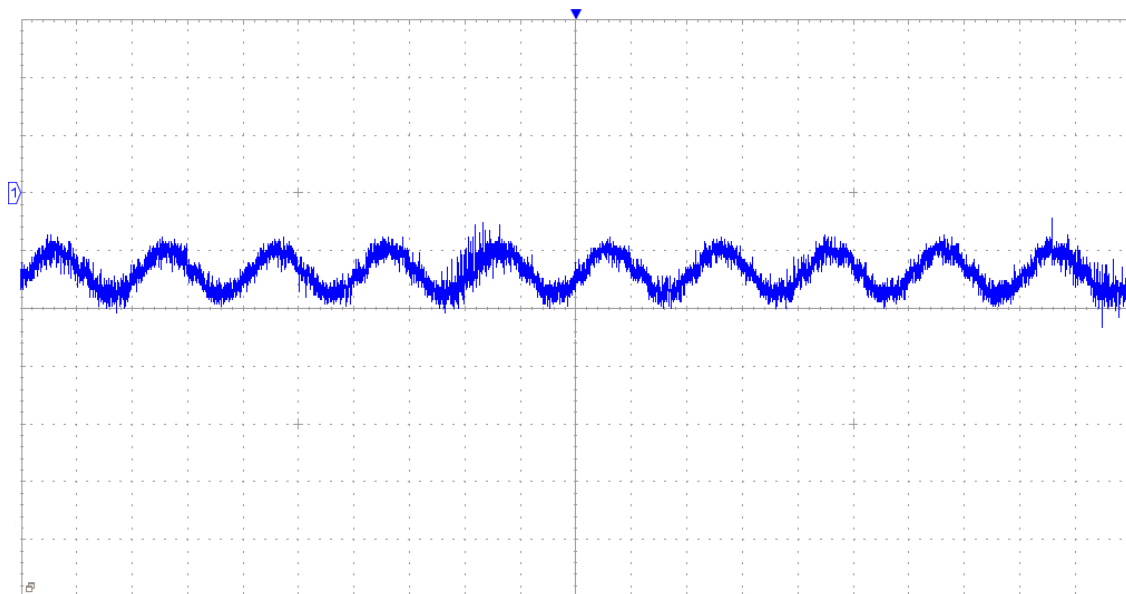
Obr. 57. Konfigurace experimentů – v obou případech byla použita stejná elektroda, kolektor (nahore) byl použit pouze pro stejnosměrné zvlákňování

5.1 Měření AC zvlákňování

Nejprve bylo provedeno měření se střídavým zdrojem. Bylo zaznamenáno „pozadí“, kdy je na snímku vyobrazen klidový stav (zdroj VN je vypnut).

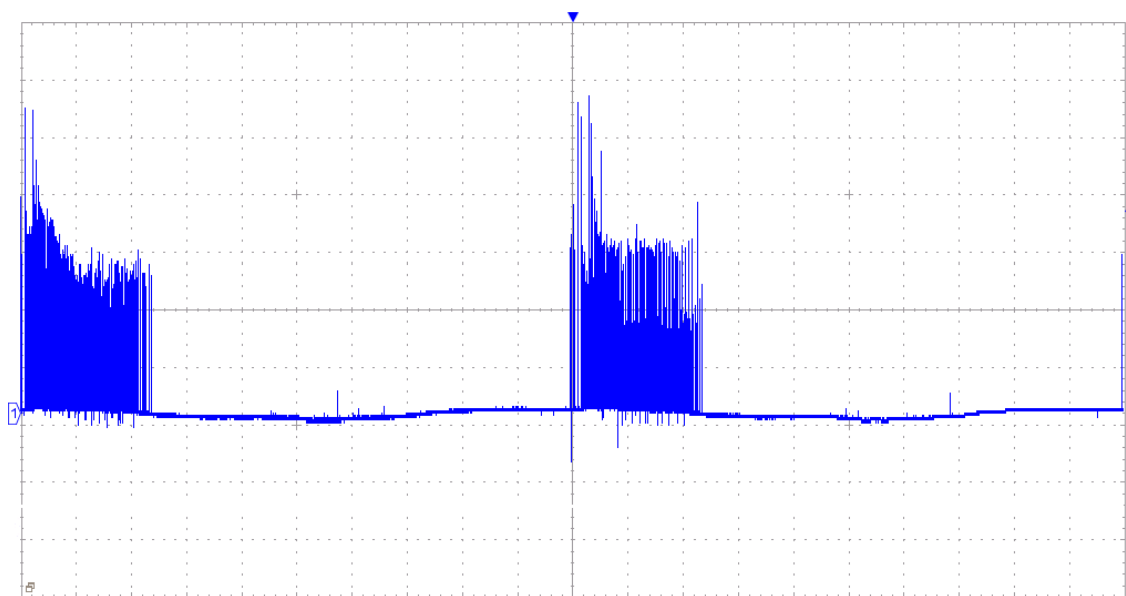


Obr. 58. Principiální blokové schéma AC experimentu (bez kolektoru)

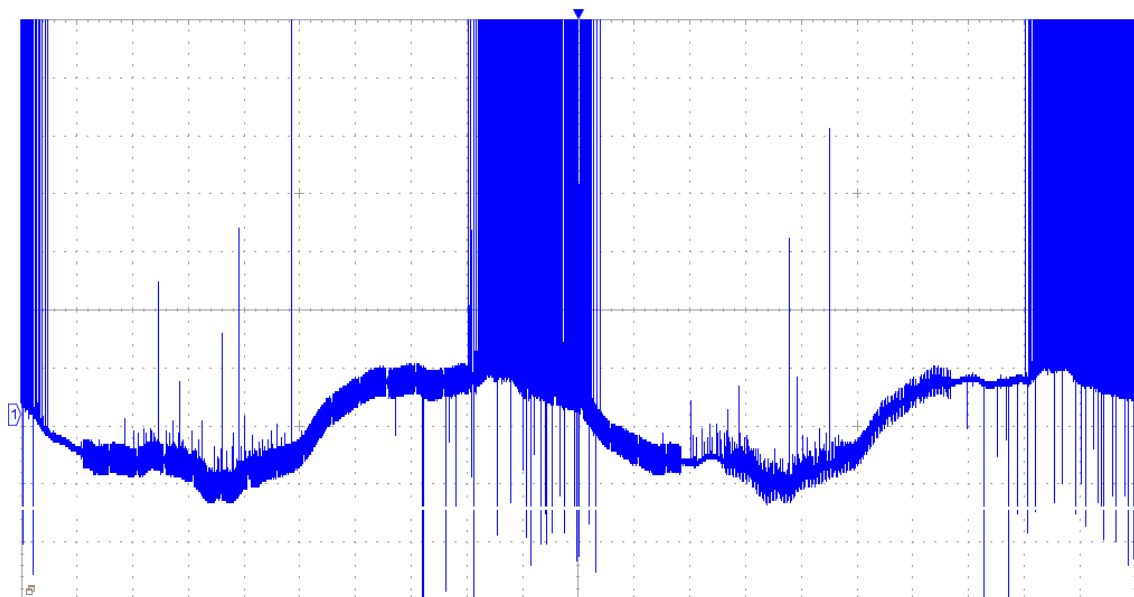


Obr. 59. Pozadí 36 kV AC bez připojené elektrody (100 μ A a 10 ms na dílek)

Tento průběh zobrazuje klidový signál, kdy je spuštěný VN napájecí zdroj na napětí 36 kV, přičemž není připojena zvláknovací elektroda. Jedná se o proud odpovídající kapacitnímu charakteru k měřidlu připojeným vodičům. Jeho hodnota je cca 100 μ A_{pp}, resp. 35 μ A_{ef}. Další záznam obsahuje stejnou konfiguraci, situace se liší jen připojením zvláknovací elektrody, napětí je opět 36 kV.

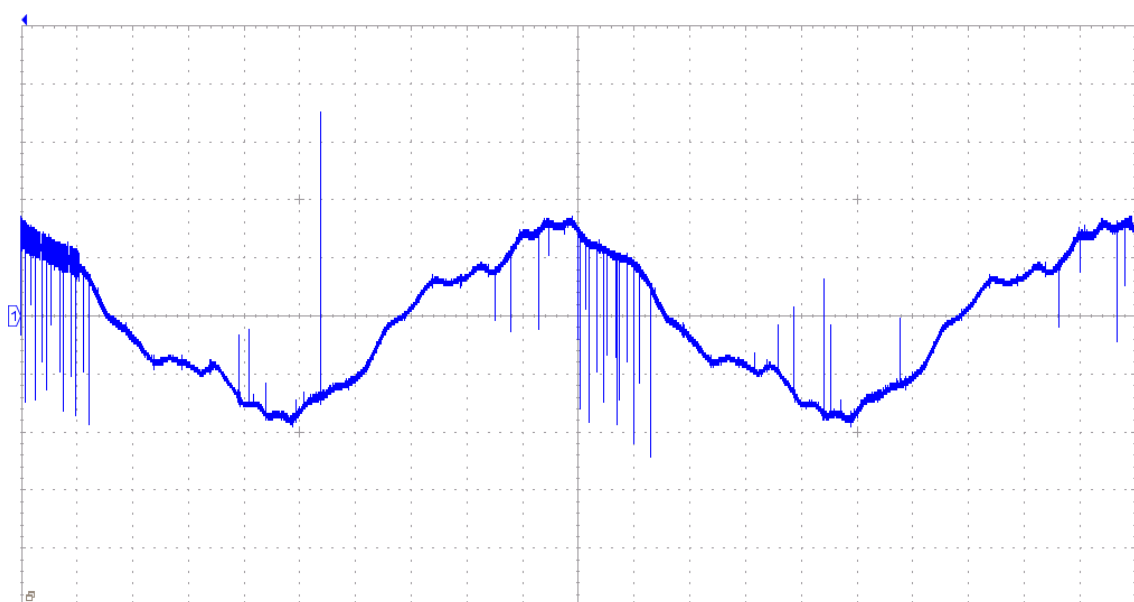


Obr. 60. Pozadí 36 kV AC s elektrodou (1 mA a 2 ms na dílek)



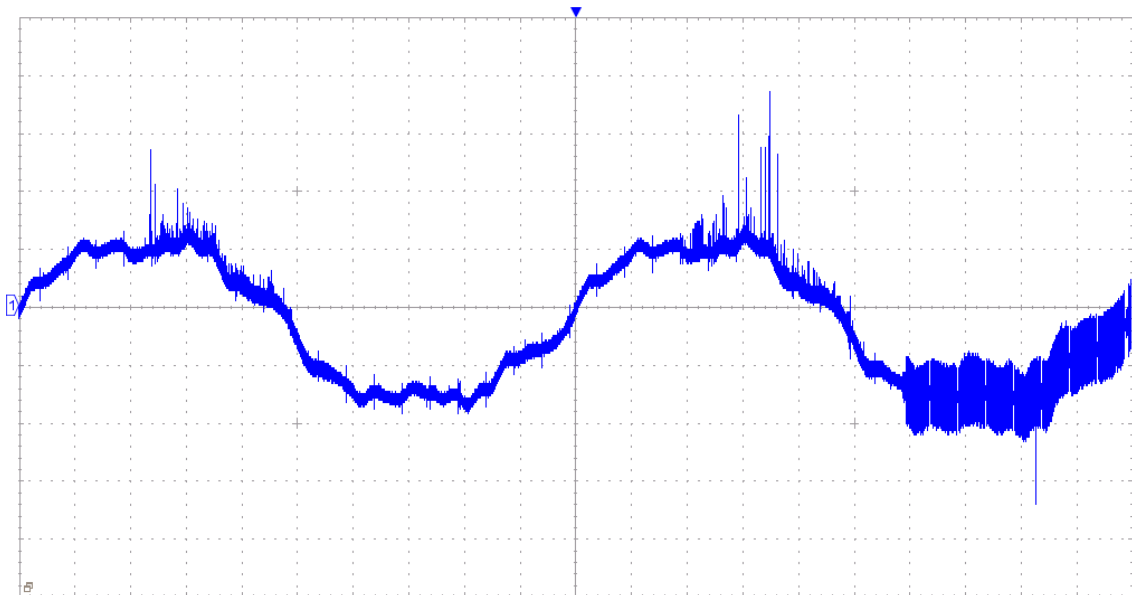
Obr. 61. Pozadí 36 kV AC e elektrodou – detail (50 μ A a 2 ms na dílek)

Stejný signál, jako v předchozím případě, vyšší rozlišení záznamu. Je zde patrný sinusový charakter odpovídající kapacitní složce vedení, impulzy pak souvisí s koronovými výboji na elektrodě. Efektivní hodnota základní sinusové složky proudu je stále cca 100 μ A_{pp}.



Obr. 62. PVA 39 kV AC (50 μ A a 2 ms na dílek)

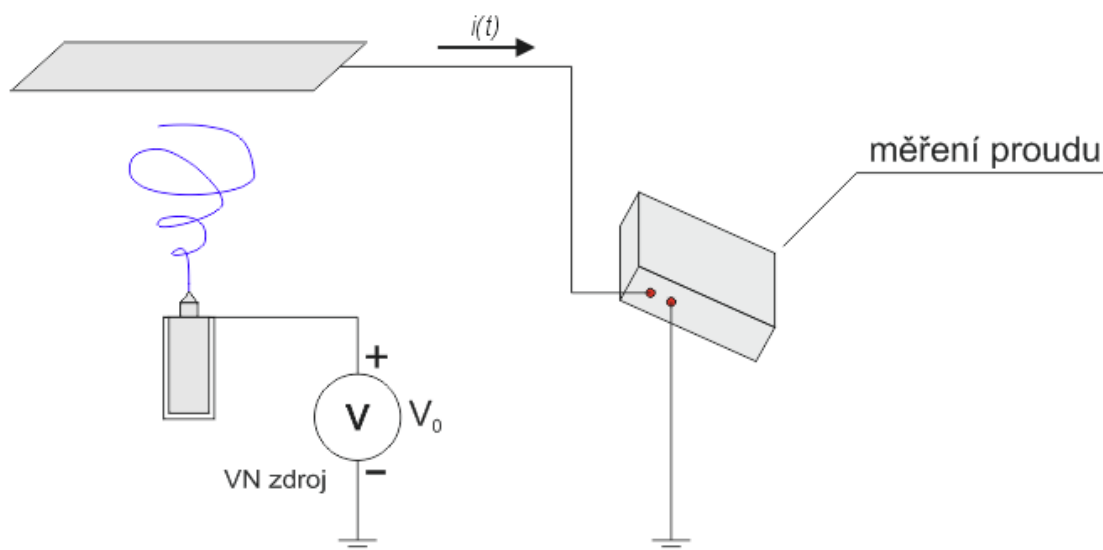
Vhodné napětí pro optimální zvlákňování PVA bylo 39 kV. Záznam je na Obr. 62. V maximech proudu jsou patrné impulzy, patrně souvisejí s procesem zvlákňování. Aby s roztokem PVB proces probíhal stejně efektivně, bylo třeba nastavit napětí 27 kV. V tomto případě jsou v oblasti kladných maxim proudu pozorovatelné špičky, ale orientované v kladném směru.



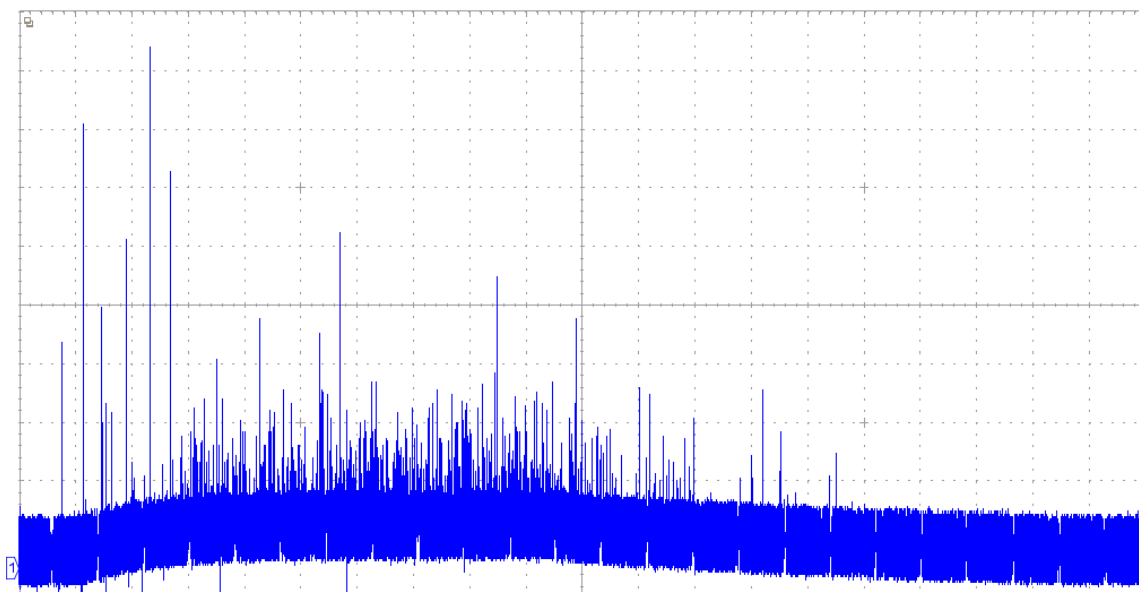
Obr. 63. PVB 27 kV AC (20 μ A a 2 ms na dílek)

5.2 Měření DC zvlákňování

Dále byly provedeny testy se stejnosměrným napájením. Zapojení bylo modifikováno o stejnosměrný regulovatelný zdroj a kolektor umístěný nad elektrodou, na kterém docházelo k zachytávání vytvořených vláken.

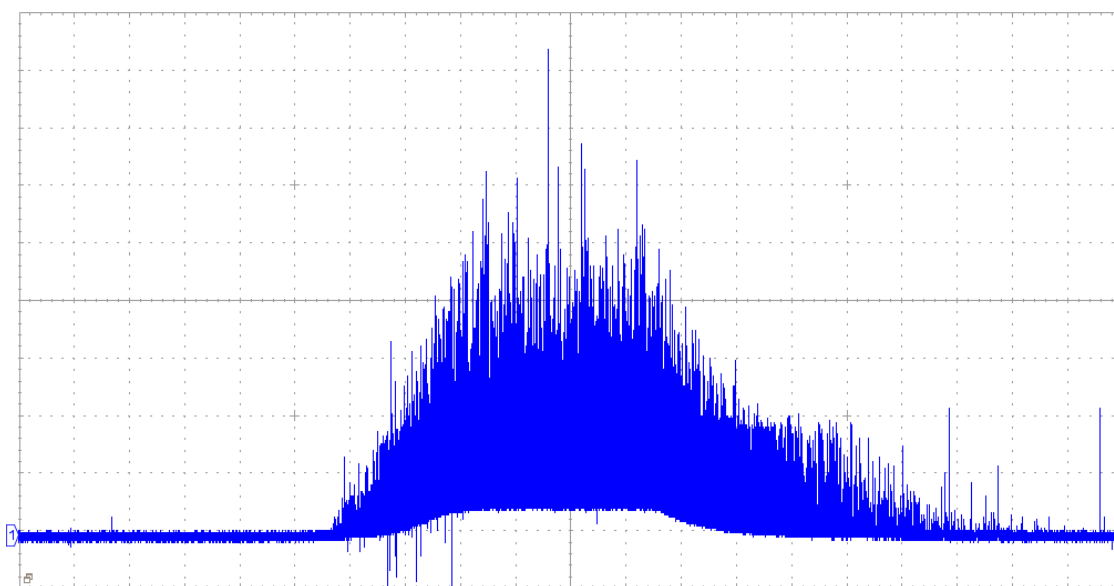


Obr. 64. Principiální blokové schéma DC experimentu (se záporným kolektorem)

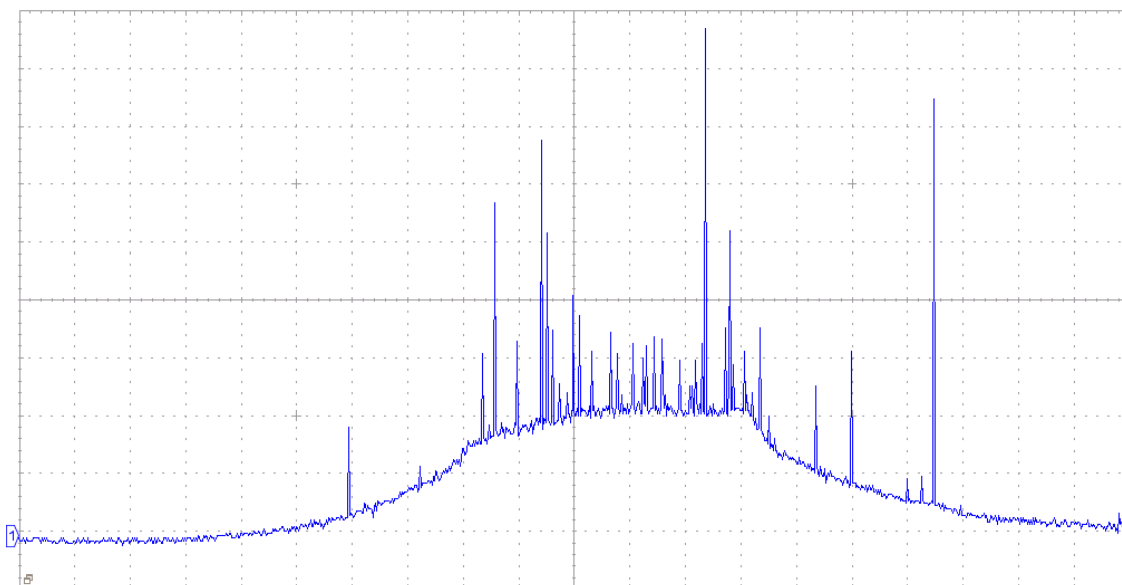


Obr. 65. Pozadí 30 kV DC s elektrodou (20 μ A a 200 ms na dílek)

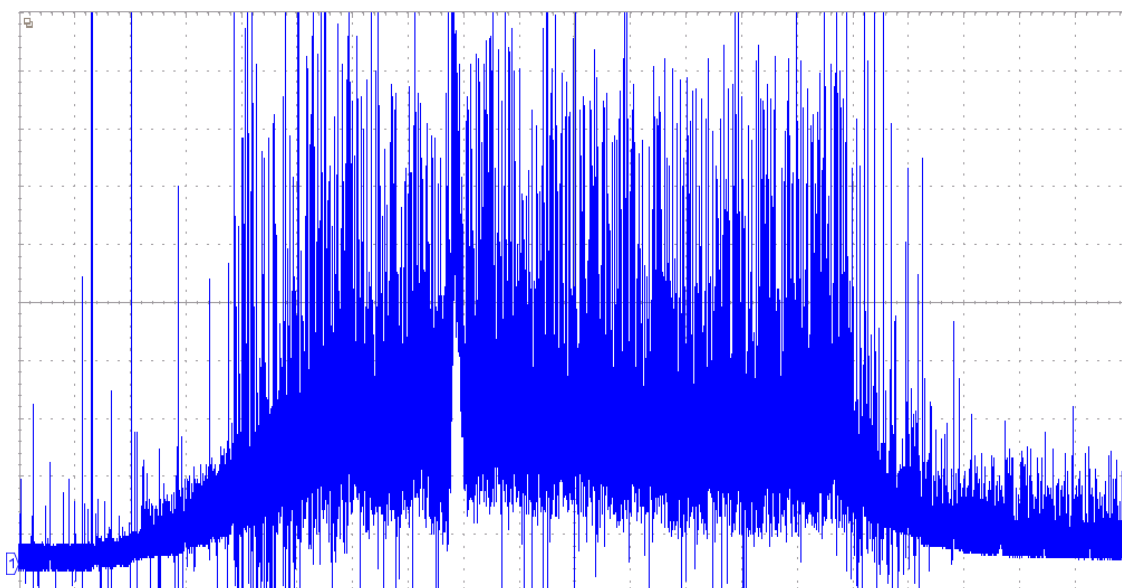
Bylo zaznamenáno „pozadí“, což byl signál, který byl změřen při zapnutí VN stejnosměrného zdroje. Již při 30 kV zde byly patrné silné koronové výboje řádu 10-100 μ A. Při napětí 48 kV je situace na pozadí podstatně zajímavější, jelikož koronové výboje odebírají značný proud, až jednotky mA. Stejná situace pozadí po vyfiltrování je na Obr. 67.



Obr. 66. Pozadí 48 kV DC s elektrodou (200 μ A a 500 ms na dílek)

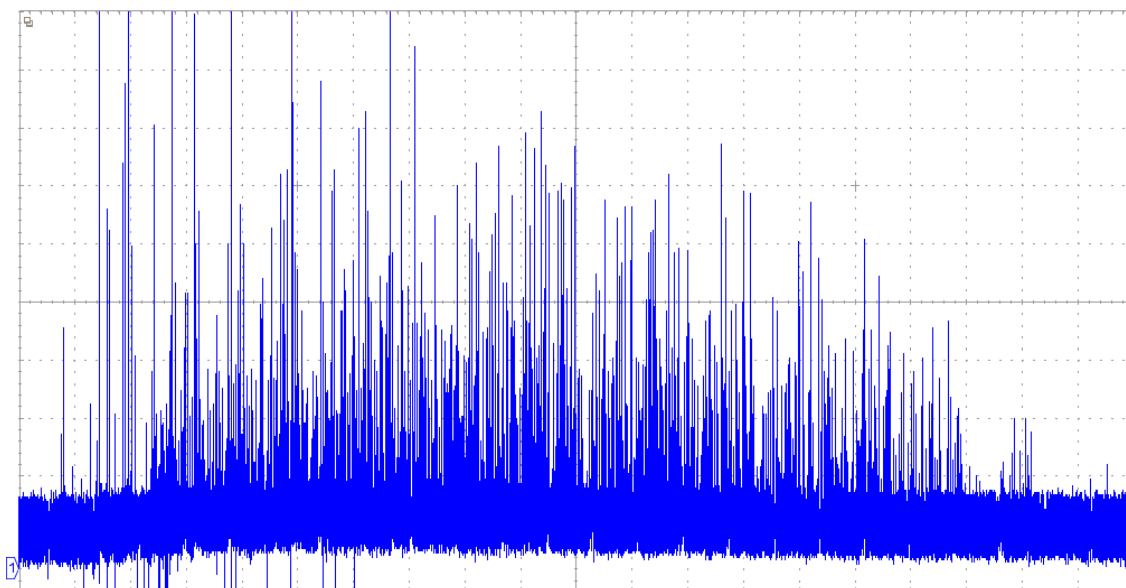


Obr. 67. Pozadí 48 kV DC s elektrodou – vyfiltrováno (50 μ A a 200 ms na dílek)



Obr. 68. DC PVA 48kV (50 μ A a 200 ms na dílek)

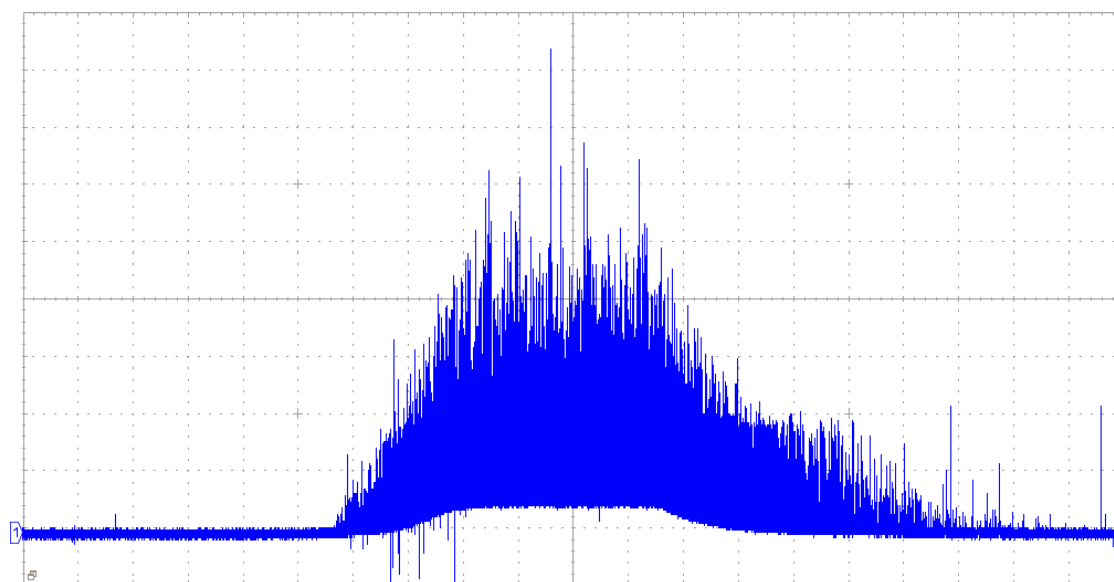
Jakmile došlo k použití PVA na potenciálu 48 kV, situace se změnila. Jsou zde patrné procesy odlišné od samotných koronových proudů. U PVB byl dostatečný potenciál pouhých 30 kV. Za těchto podmínek jsou koronové výboje méně významné, lze tedy předpokládat, že určitá část impulzů odpovídá proudu ekvivalentního přípravě vláken.



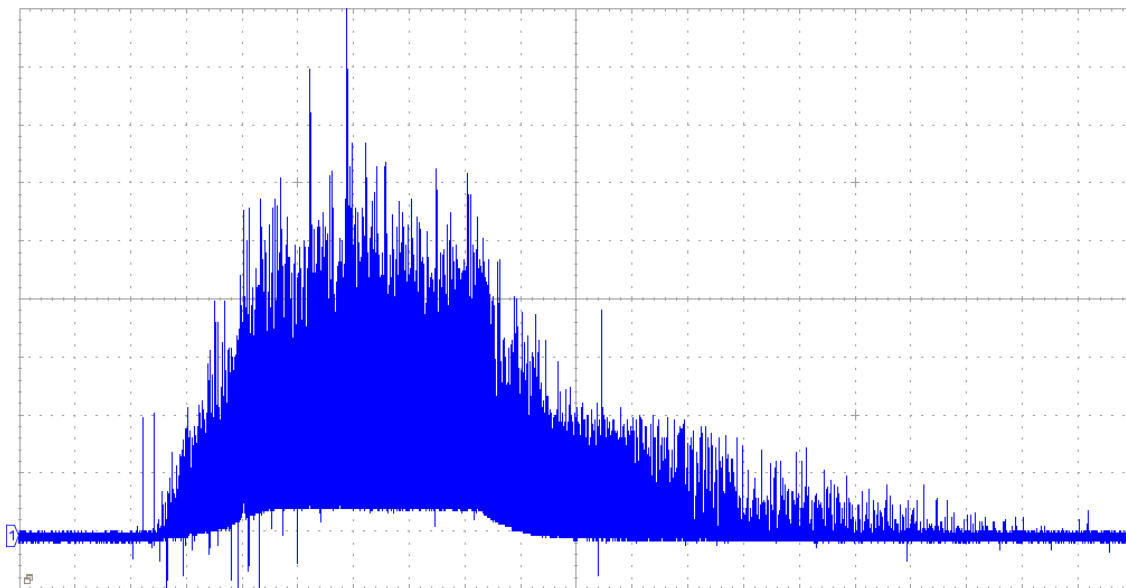
Obr. 69. DC PVB 30kV (10 μ A a 200 ms na dílek)

5.3 Analýza dat

Analýza byla provedena na dvou průbězích proudu při stejnosměrném zvlákňování, a to při probíhajícímu procesu a bez něj (pouze pozadí, bez polymeru). Oba záznamy byly pořízeny při napětí 48 kV. Signál pozadí při 48 kV patrně obsahuje pouze impulzní složky, které odpovídají koronovým výbojům.

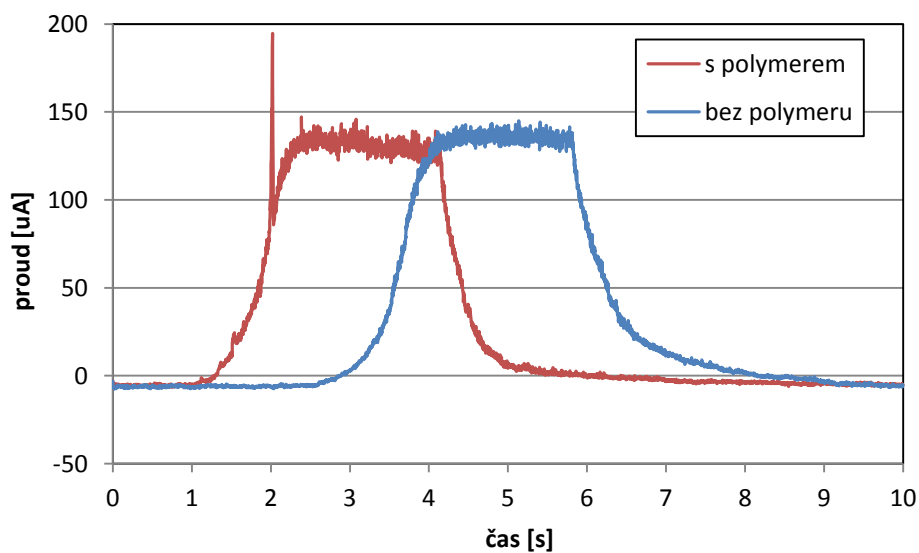


Obr. 70. 48 kV DC bez zvlákňování (200 μ A a 500 ms na dílek)



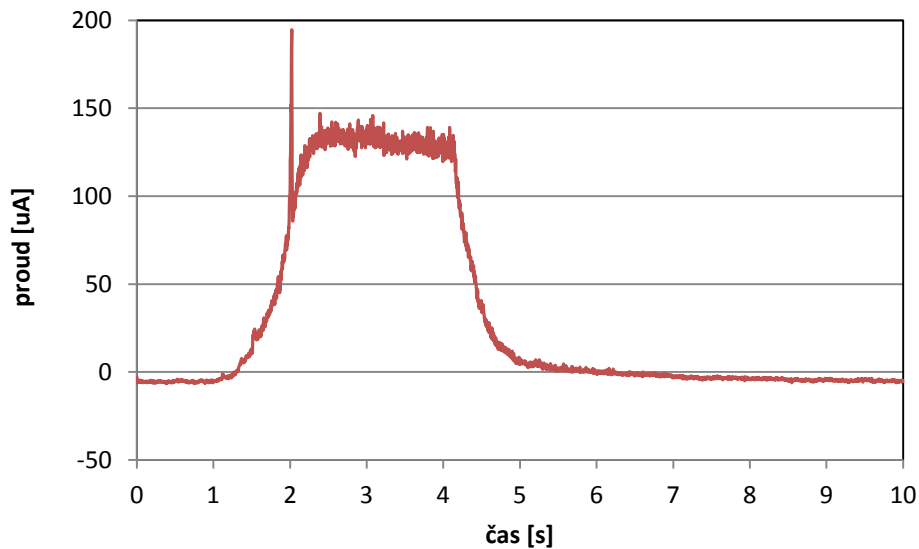
Obr. 71. 48 kV DC s polymerem (200 μA a 500 ms na dílek)

V případě nanosení PVB na elektrodu došlo v průběhu proudu jen k minimálním pozorovatelným změnám. Jelikož záznam je příliš „širokospektrální“, byly signály dále zpracovány filtrem typu Moving-Average, který průměroval 1000 vzorků. Poté je lépe odhadnutelná ustálená střední hodnota proudu.

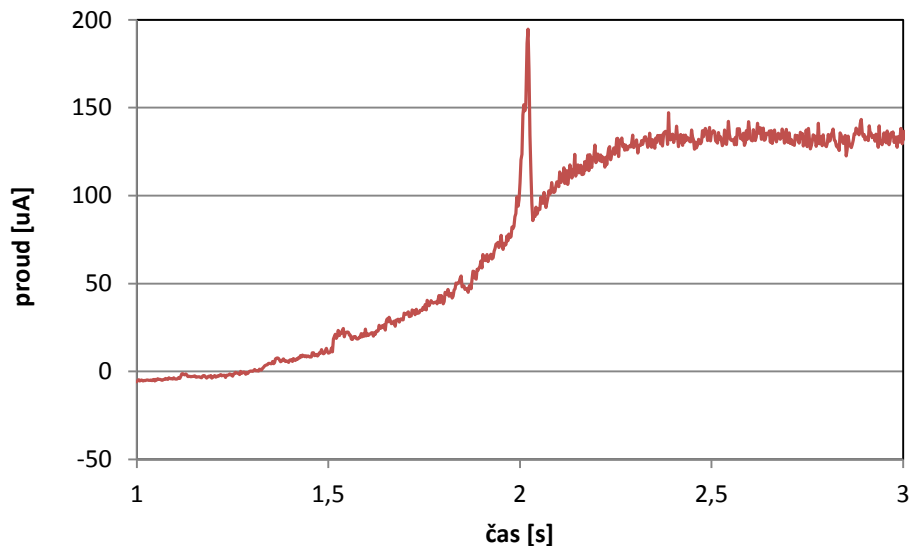


Obr. 72. Porovnání filtrovaných průběhů: a) proud se zvlákňováním s polymerem, b) bez zvlákňování (průběhy jsou pro větší přehlednost vzájemně posunuty v čase)

Střední hodnota proudu byla v obou případech prakticky stejná, a to cca $130 \mu\text{A}$. Jediný viditelný rozdíl, kterým se signály lišily, byl impulz na náběžné hraně při zapnutí napětí. Nejprve bude proveden popis následujícího grafu (Obr. 73): V čase 0 je napětí zdroje přibližně nulové. V čase 1 s byl zapnut VN zdroj nastavený na 48 kV s omezením proudu na 1 mA, napětí (a také proud exponenciálně roste). V čase 2,5 s došlo k ustálení hodnoty VN na nastavenou mez 48 kV. V čase 4,1 s došlo k vypnutí zdroje, napětí exponenciálně klesá k nule. Plný potenciál je tedy na elektrodě přítomen v čase $2,5 < t < 4,1$ [s]. Zajímavý je také okamžik $t=2$ s, kdy je v signálu při probíhajícím zvlákněním pozorovatelná charakteristická proudová špička, která je patrná až po použití výše uvedeného filtru.

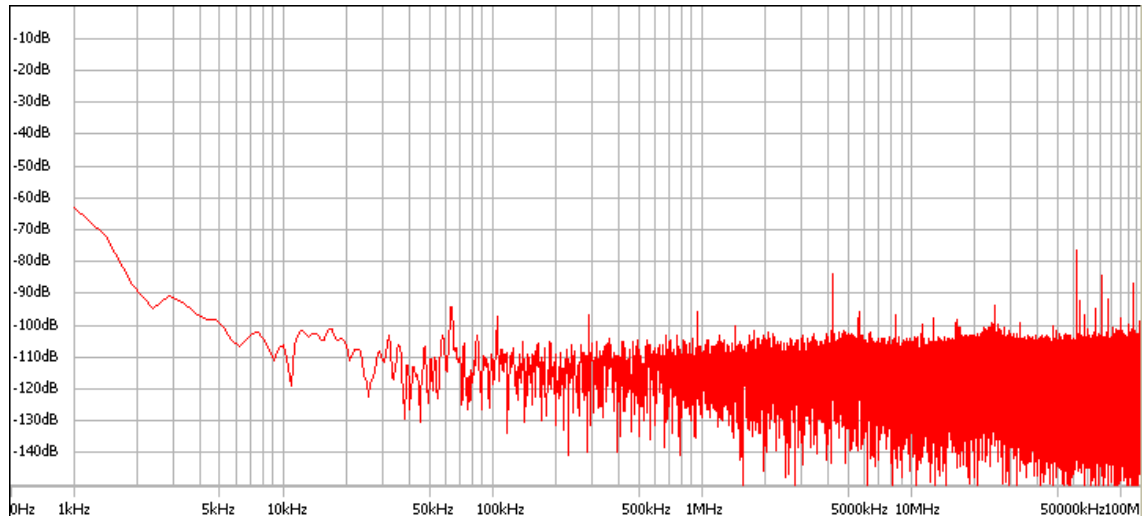


Obr. 73. Proudová špička v čase 2 s

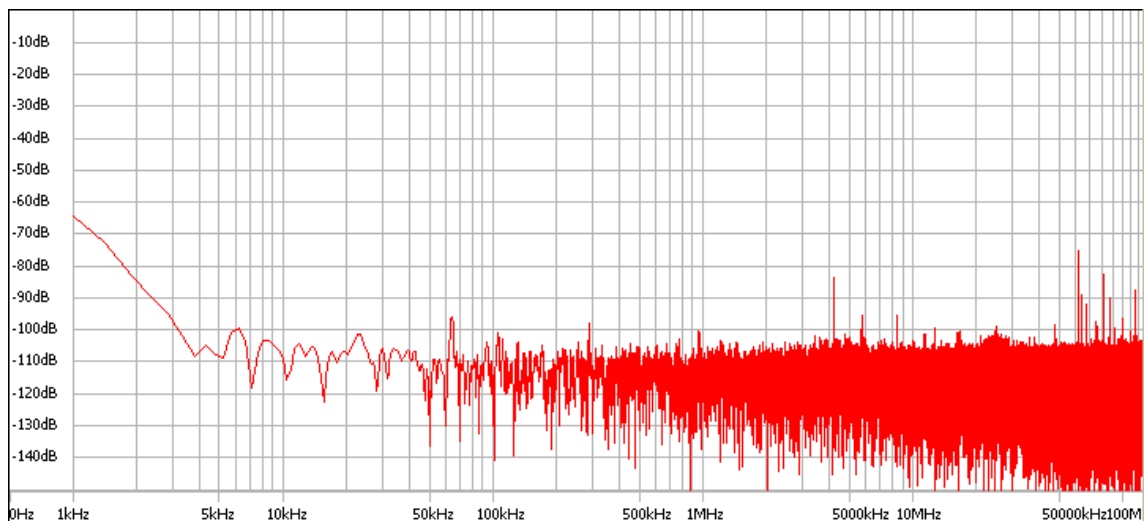


Obr. 74. Proudová špička v čase 2 s – detail. Tato proudová špička byla za stejných okolností pozorována opakovaně, zatímco bez přítomnosti roztoku polymeru se v signálu nevyskytovala.

Posledním krokem tohoto rozboru byla spektrální FFT analýza [i], jelikož otázka rozdílu mezi dvěma výše uvedenými průběhy nebyla zodpovězena. Byly použity původní signály s plnou vzorkovací rychlostí 250 MSa/s. FFT byla ve skutečnosti provedena s parametry 262 144 vzorků, od 1 kHz do 125 MHz. Výsledná spektra jsou na následujících Obr. 75 a 76.



Obr. 75. Výsledek FFT signálu proudu bez zvlákňování



Obr. 76. Výsledek FFT signálu proudu při probíhající zvlákňování

5.4 Vyhodnocení výsledků

U střídavého zvlákňování je použit síťový napájecí kmitočet 50 Hz pro provoz VN transformátoru. Tento kmitočet je v uvedených záznamech patrný, obsahuje však vyšší harmonické složky (zejm. 3. a 5.), a tak se základní průběh sinusovému tvaru jen blíží.

Neznámým provozním parametrem je fázový posun mezi napětím a proudem. Ten je způsoben použitým ochranným rezistorem 10 M Ω a kapacitami obvodových částí mezi rezistorem a zvlákňovací elektrodou. Není proto zcela jasné, zda k začátku periodického procesu destabilizace povrchu kapaliny (tvorby vláken) dochází v maximu napětí, či nikoliv. Z uvedených záznamů však lze usoudit, že se tak děje v rytmu maximální hodnoty proudu.

Na stejnosměrném zvlákňování bylo opět zaznamenáno „pozadí“, a teprve poté signály při zvlákňování. Jednotlivé použité polymerní roztoky vyžadovaly rozdílná napětí, při kterých proces optimálně probíhal. Proto je zde zobrazen průběh proudu zvlákňování PVA při 27 kV a PVB při 39 kV. Tento rozdíl má jeden nežádoucí efekt – jelikož je u PVB potřebné provozní napětí podstatně vyšší než v případě PVA, je signál podstatně více „zarušen“ nežádoucími impulzy příslušejícími koronovým výbojům. Jediným charakteristickým rysem u stejnosměrného procesu byl typický proudový impulz na náběžné hraně vysokého napětí po zapnutí zdroje, viz Obr. 74.

U vybraných signálů byla provedena frekvenční spektrální analýza Fourierovou metodou (dále jen „FFT“). Tato analýza byla zaměřena na pozorování rozdílů spekter proudových signálů „pozadí“ a signálů při zvlákňování. Výsledek je ale nepříznivý, jelikož se touto cestou nepodařilo prokázat jakýkoliv významný rozdíl. Tento fakt lze odůvodnit vysokým pozadím z koronových výbojů. FFT analýza pro AC signály byla velmi podobná jako v případě prvního měření, viz Obr. 50 a 51.

Závěrem je třeba zdůraznit, že na některých získaných průbězích nebylo možné rozpoznat, zda proces zvlákňování probíhá či nikoli. Důvod je ten, že samotné proudové impulzy odpovídající vzniku vláken zanikají v pozadí koronových jevů.

6 DALŠÍ VÝZKUM

Uvedené výsledky měření jsou silně závislé na provozních podmínkách. Vliv na tvar a velikost proudu má zejména velikost VN potenciálu, který se na zvlákňovací elektrodu aplikuje, dále typ a koncentrace polymerního roztoku, relativní vlhkost prostředí, tvar zvlákňovací elektrody a další. Zaručit konstantní podmínky v dlouhodobém měřítku je samozřejmě obtížné. Je možné relativně přesně nastavit velikost napětí, použít stejnou elektrodu. Ostatní vlivy se ale kontrolují jen obtížně, obzvláště v případě, kdy proces probíhá v běžné atmosféře.

V souvislosti s uvedenými provozními vlivy se zde otevírá celá řada možných oblastí dalšího výzkumu. Bude možné experimentovat s různými druhy polymerních roztoků, včetně sledování vlivu jejich koncentrace. V této práci byly zběžně otestovány signály elektrického proudu při použití PVA a PVB. Je ale možné, že pro střídavé elektrické zvlákňování budou vhodné i jiné roztoky.

Dalším důležitým faktorem bude výzkum optimálního napětí na elektrodě, včetně vlivu jeho tvaru, zda půjde o harmonický či „pravoúhlý“ průběh. Současné pracoviště je vybaveno transformátorem, který je napájen ze sítě a poskytuje tedy napětí o síťové frekvenci 50 Hz. Průběh napětí se blíží sinusovému, obsahuje ale řadu vyšších harmonických frekvencí a je proto dle aktuálních poměrů v elektrorozvodné síti deformován.

Jako velmi užitečnou pomůckou se v průběhu vývoje ukázalo zařízení, které umožnilo sledovat koronové výboje. Bylo totiž cílem tyto jevy co nejvíce potlačit. Korona kamera (též „korokamera“) je snímací zařízení, které je citlivé ve spektrálních UV oblastech cca 200-400 nm. S touto pomůckou bylo možné dohledat a omezit ty oblasti, kde nežádoucí koronové jevy vznikaly. Ukázalo se, že pro další výzkum je toto zařízení nezbytnou pomůckou.

Tvar zvlákňovací elektrody má vliv na gradient intenzity elektrického pole, což je jedna z nejdůležitějších podmínek vzniku vlákna z povrchu kapaliny. Bude tedy možné zkoumat vhodné geometrické uspořádání zvlákňovacích elektrod. Spolu s vlivem na tvorbu vláken může dojít k omezení koronových výbojů, které byly na válcové elektrodě o průměru 8 mm pozorovány.

Stejnosměrné zvlákňování využívá tzv. kolektor. Ten je elektricky propojen na jeden pól napájecího zdroje a tvoří tak plochu, ke které jsou vznikající vlákna přitahována, kde se koncentrují. V případě zvlákňování střídavým elektrickým proudem však není nutné kolektor vůbec použít. Je tomu tak proto, že jeho funkce je v tomto případě nahrazena samotným okolím zvlákňovací elektrody, což je jeden z důsledků použití střídavého potenciálu, kde se více uplatňuje kapacitní složka okolního prostředí. Přesto může kolektor i v tomto případě přinést určité výhody. Jeho přítomnost, resp. tvar, mohou zásadně ovlivnit sledované procesy.

Velice užitečné, a velmi náročné, by bylo změřit vývoj velikosti náboje v čase nebo se vzdáleností od zvlákňovací elektrody. Bylo by ale jen spekulací předpovídat, zda je s tímto přístrojovým vybavením možné dosáhnout takových výsledků.

Zkonstruované měřicí zařízení lze v případě potřeby dovybavit synchronizačním výstupem a rozšířit tak možnosti experimentu o časově sladěné intervaly záznamu obrazu a příslušejícího proudového signálu. Synchronizace záznamu s rychlokamerou by umožnila jednoznačně identifikovat počátek a jednotlivé fáze tvorby vláken. To může být cenná informace v případě zkoumání nejrůznějších energetických nároků pro vznik jednotlivých vláken.

Samotný proces měření samozřejmě nepovede k jednoznačným závěrům. Bude potřeba zaznamenávat a ukládat velká množství dat, připravit algoritmy pro jejich vyhodnocení, data statisticky zpracovávat, ale především – dokázat je správně interpretovat.

7 ZÁVĚR

Současné metody výroby tenkých umělých vláken využívající stejnosměrného elektrostatického zvlákňování mají rostoucí průmyslové využití. Ukazuje se ale, že použití střídavého napětí může mít příznivý vliv na efektivitu výroby takových vláken, resp. na samotnou produktivitu jejich výroby.

V této práci byl proveden rozbor problematiky a možností měření elektrického proudu během střídavého elektrostatického zvlákňování. Byl uveden princip zvlákňování z roztoku a možnost měření průběhu elektrického proudu. Bylo ukázáno, že požadované měření proudu nelze realizovat na tzv. „studeném konci“ transformátoru, protože tvar proudu se zde neshoduje s průběhem proudu zvlákňovací elektrodou. Poté byla navržena metoda měření a záznamu průběhu proudu tak, aby mohl být signál bezpečně zpracováván na pracovišti dostatečně vzdáleném od nebezpečného VN potenciálu. Dále se práce zabývá klíčovou otázkou bezpečnosti celého experimentu a předkládá možné směry řešení tohoto úkolu.

Bylo zapotřebí navrhnout takový přípravek, který obsahuje snímací rezistor, na kterém vzniká při průběhu měřeného proudu úbytek napětí, analogově-digitální převodník, bezpečné komunikační rozhraní s obsluhou a napájecí zdroj s akumulátorem. Všechny tyto části přitom musí být během provozu připojeny přímo na nebezpečný VN potenciál.

Přestože bezpečnost experimentu je na dobré úrovni, pro budoucí výzkum je vhodné doporučit přísnější provozní kritéria. Splnění základních předpisů a postupů pro práci na VN zařízení pod napětím je zde samozřejmostí. Kromě dohledu další osoby se nabízí např. možnost doplnit pracoviště varovnými vizuálními a akustickými signály, což je poměrně levná záležitost, která je navíc snadno propojitelná s existujícími obvody systému experimentu. Na VN straně je zde zajištěno omezení proudu ochranným rezistorem o hodnotě 10 M Ω , který v případě poruchy (zasažení obsluhy) omezuje maximální hodnotu proudu na jednotky mA. Bohužel se ukázalo, že zapojením ochranného rezistoru do obvodu je proces vzniku vláken ovlivněn fázovými posuny mezi napětím a proudem. Funkčně tak má ochranný rezistor nežádoucí vliv a je na zvážení, jaká jeho nejvyšší hodnota je ještě použitelná, aby neměla omezující dopad na samotnou funkci experimentu.

Postupně bylo navrženo a zavrhnuto několik možných metod, jak měření provádět. Nesnadným úkolem např. bylo vybrat vhodný komunikační kanál, kterým se bude přenášet signál elektrického proudu z potenciálu VN elektrody do bezpečné vzdálenosti, kde se nachází obsluha. Zvažovaly se zejm. nejrůznější metody rádiového bezdrátového přenosu, které se ale ukázaly jako nepoužitelné z důvodu snadného zarušení přenosu samotným zvlákňovacím procesem. Nakonec bylo zvoleno galvanicky oddělené USB rozhraní, které využívá elektricky nevodivých optických vláken. Během samotného návrhu a tvorby specifikací vlastností měřícího přípravku navíc vyvstaly určité zcela protichůdné požadavky.

Aby měřicí přípravek nenarušil proces zvlákňování, bylo by vhodné, aby se jeho rozměry limitně blížily k nule a aby byl v ideálním případě co nejdále od zvlákňovací elektrody, protože jedině tak nebude deformováno elektrické pole v okolí prostoru, kde vlákna vznikají. Tento požadavek je v rozporu s předpokladem, že k dosažení nejlepších výsledků je nutné, aby bylo měřidlo co nejbliže samotné zvlákňovací elektrodě. Konstrukce se tak stala poměrně složitým konceptem s mnoha kompromisy.

V první části práce bylo realizováno zařízení, které splňuje požadavek zadání na měření průběhu elektrického proudu kapalinovou tryskou během střídavého elektrostatického zvlákňování. Během prvních experimentů s tímto měřidlem však bylo zjištěno, že zachycené signály průběhu proudu patrně zanikají v proudových impulzech odpovídajících vzniku koronových výbojů. Tato komplikace znemožnila další seriózní práci na experimentu, a tak bylo rozhodnuto, že koronové proudy budou omezeny úpravou konstrukce experimentu, a to zvětšením všech elektricky vodivých rádiusů tak, aby jejich nejmenší poloměr křivosti byl za teoretickou hranicí odpovídající podmínkám vzniku koronových výbojů. Teprve po těchto úpravách bylo možné dokončit vlastní měření a navázat na analytickou část práce.

Nakonec byly i tyto obtíže překonány a jediné místo, kde se při závěrečném testování a měření vyskytovaly koronové výboje, byla samotná zvlákňovací elektroda. Na základě uvedených výsledků lze konstatovat, že zadání bylo splněno.

Jak naznačují výsledky analýzy naměřených signálů, ve výzkumu je třeba pokračovat. V první řadě je zapotřebí potlačit nejrůznější rušení z okolí, která se při měření vyskytovala. Dále bude potřeba odlišit nežádoucí signály od koronových výbojů vznikajících na samotné zvlákňovací elektrodě. Teprve poté bude možné započít vědecký výzkum uvedených procesů.

Autor doufá, že sestrojené měřicí zařízení, a stejně tak prvotní výsledky analýzy signálů, poslouží k dalšímu výzkumu.

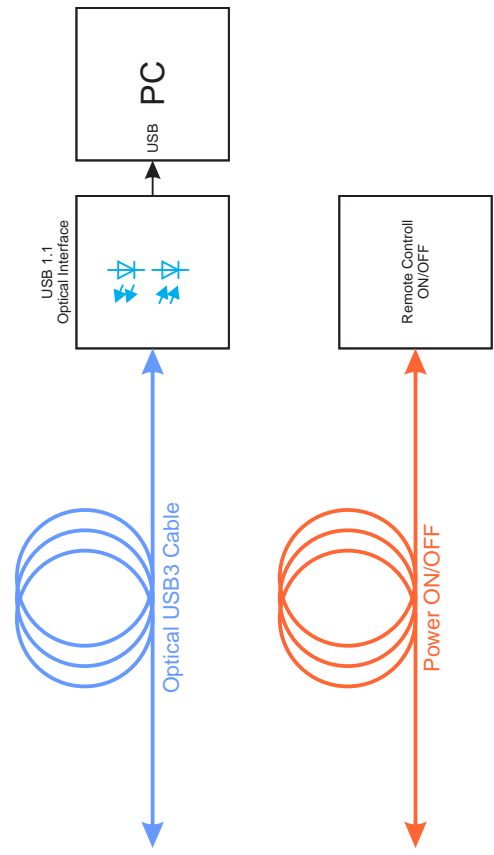
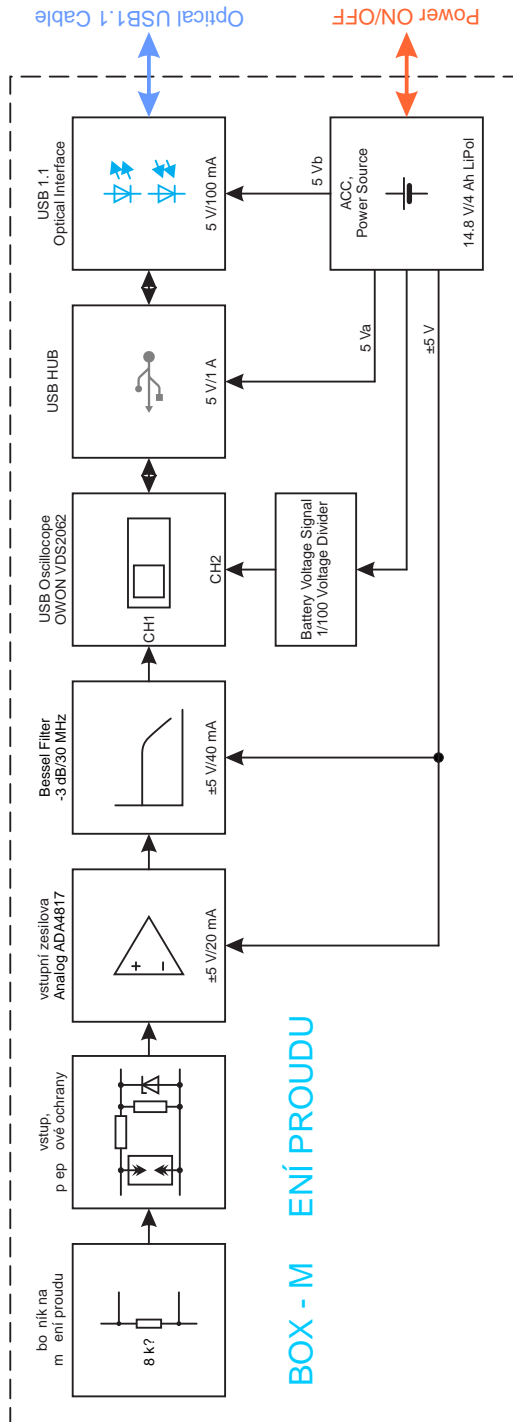
Literatura a odkazy

- [1] ZELENY, John. 1914. The Electrical Discharge from Liquid Points, and a Hydrostatic Method of Measuring the Electric Intensity at Their Surfaces. Phys. Rev., [online] 3, pp.69--91. Available at: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.3.69>.
- [2] TAYLOR, Geoffrey. Disintegration of Water Droplets in an Electric Field. 1964. Proceedings of the Royal Society A 280 (1382): 383. Bibcode: 1964RSPSA.280..383T. doi:10.1098/rspa.1964.0151.
- [3] Elmarco s.r.o., firemní prezentace. [online]. [cit. 2015-02-05]. URL: <http://www.elmarco.com>.
- [4] POKORNÝ, Pavel. Analýza procesu elektrostatického zvlákňování a možnosti jeho řízení. Autoreferát disertační práce. Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií. Technická univerzita v Liberci. [online]. [cit. 2014-05-05]. URL: <http://www.fm.tul.cz/autoreferaty>.
- [5] NOVÁK, Miroslav. Archiv zaznamenaných proudových průběhů, MTI FM TUL
- [6] KGUG36 Dvoupólové napěťové transformátory, firemní WWW prezentace ABB s.r.o. [online]. [cit. 2014-05-15] <http://www.abb.com/product/db0003db004279/c125739900636470c125718e005b894a.aspx>.
- [7] TRUHANOVÁ, Alena. Průběh elektrického proudu vláknem polymerního roztoku při elektrostatickém zvlákňování, Liberec 2008
- [8] JIRSÁK, O. RŮŽIČKOVÁ, J. LUKÁŠ, D. Production of properties of Polymeric nano-fibres, In: NANO 03
- [9] ČSN EN 50110. Obsluha a práce na elektrických zařízeních: Práce pod napětím. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [10] PLÍVA, Z., J. DRÁBKOVÁ, J. KOPRNICKÝ a L. PETRŽÍLKA. Metodika zpracování bakalářských a diplomových prací. 2. upravené vydání. Liberec: Technická univerzita v Liberci, FM, 2014. ISBN 978-80-7494-049-1. Dostupné z: [doi:10.15240/tul/002/2014-11-002](https://doi.org/10.15240/tul/002/2014-11-002).
- [11] TOSLINK *PRO SIGNAL* Connector, [online]. [cit. 2015-05-05]. URL: <http://uk.farnell.com/pro-signal/jr9907-2m-d-5mm-blk/lead-optical-2m-toslink/dp/4258459>
- [12] KONÍČEK, Václav. Elektrické stroje: Transformátory. Praha, Vyšší odborná škola elektrotechnická F. Křížáka, 2007. 23 s. [online]. [cit. 2014-05-05]. URL: <http://www.vosaspsekrizik.cz/cs/download/studium/vos/el-stroje-a-pristroje/transformatory.pdf>.
- [13] UVirCO Technologies, firemní www prezentace společnosti, [online]. [cit. 2015-05-05]. URL: <http://www.corocam.com/>.
- [14] KREBSOVÁ, Milada. Nauka o polymerech. Liberec: VŠST, 1978.
- [15] AKOPJAN, Aleksandr Arkad'jevič. Technika vysokého napětí 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1956.

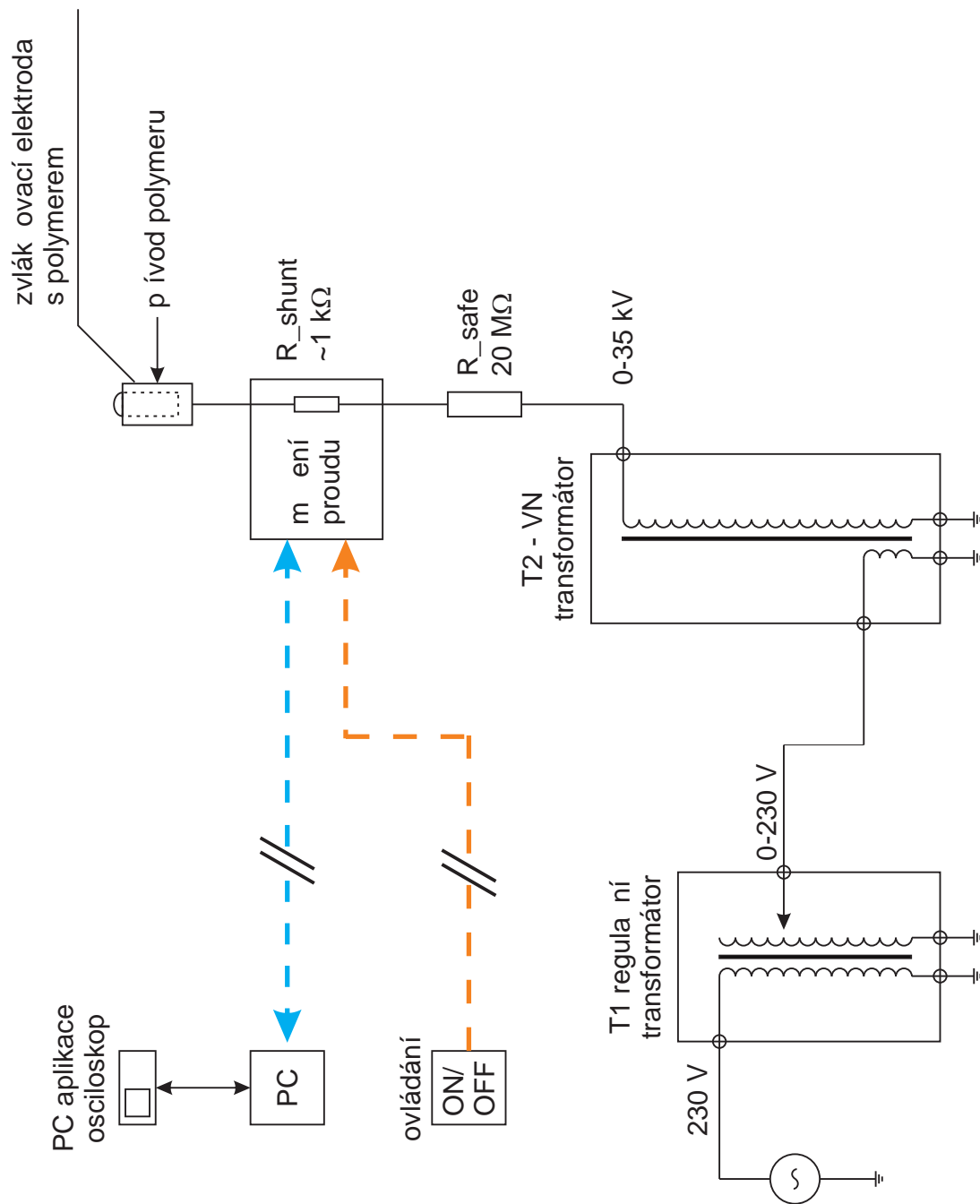
Použité vybavení

- [a] Matlab 7.12.0.365 (R2011a) Student version
- [b] Corel DRAW X5 Home & Student, verze 15.2.0.686
- [c] LTspice IV, ver. 4.20m, Linear Technology Corporation
- [d] Microsoft Office 2010 pro studenty a domácnosti, verze 14.0.6129.5000
- [e] Microsoft Windows XP Professional, verze 5.1
- [f] Altium Designer, Version 13.3.4
- [g] FEMM 4.2 – Finite Element Method Magnetics <<http://www.femm.info/>>
- [h] korona-kamera CoroCAM, UVirCO Technologies
- [i] Wavosaur, ver 1.1.0.0 <<http://www.wavosaur.com/>>

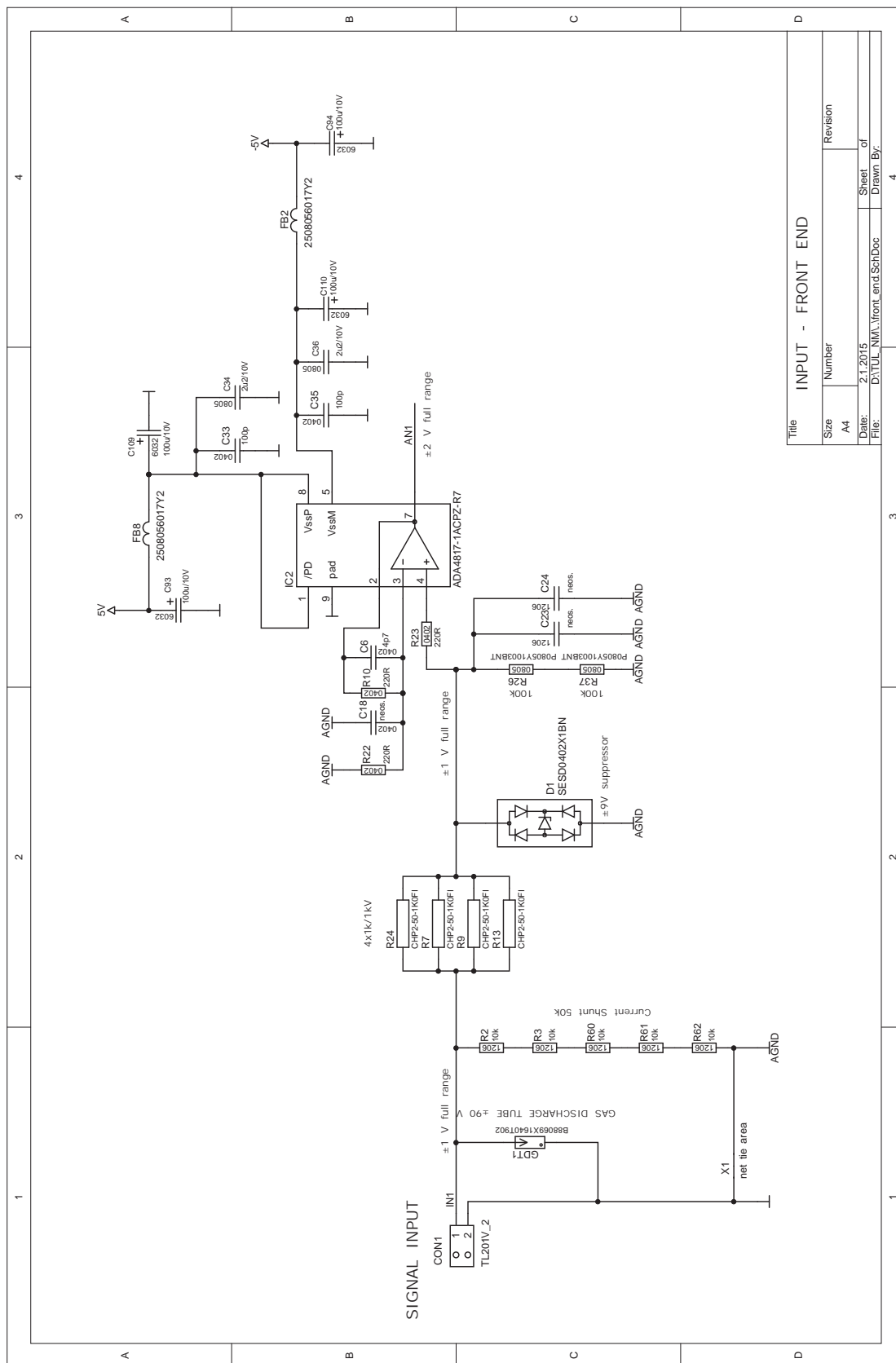
P íloha A - Blokové zapojení



P íloha B - Principiální schéma zapojení experimentu

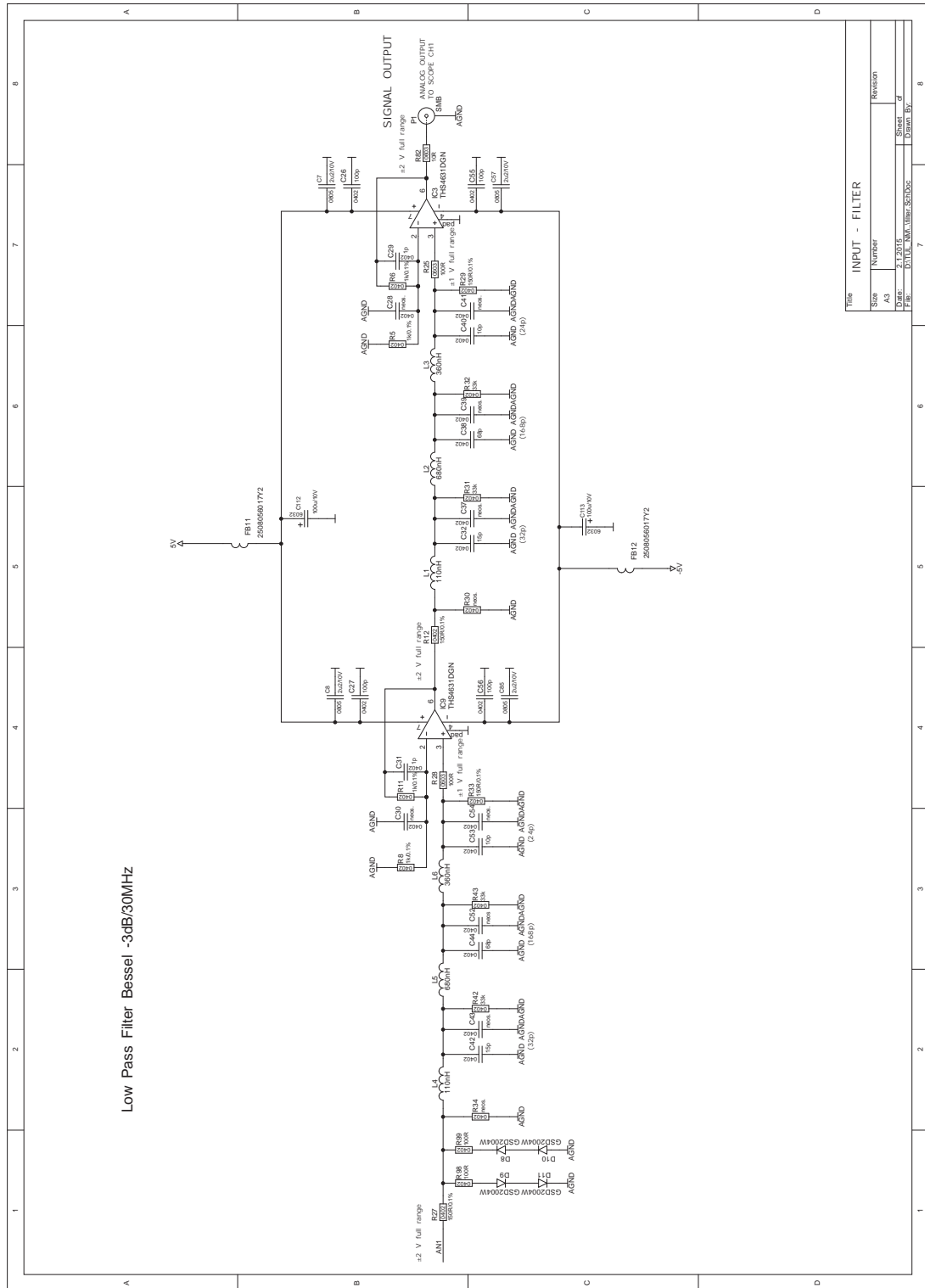


P íloha C1 - Schéma zapojení

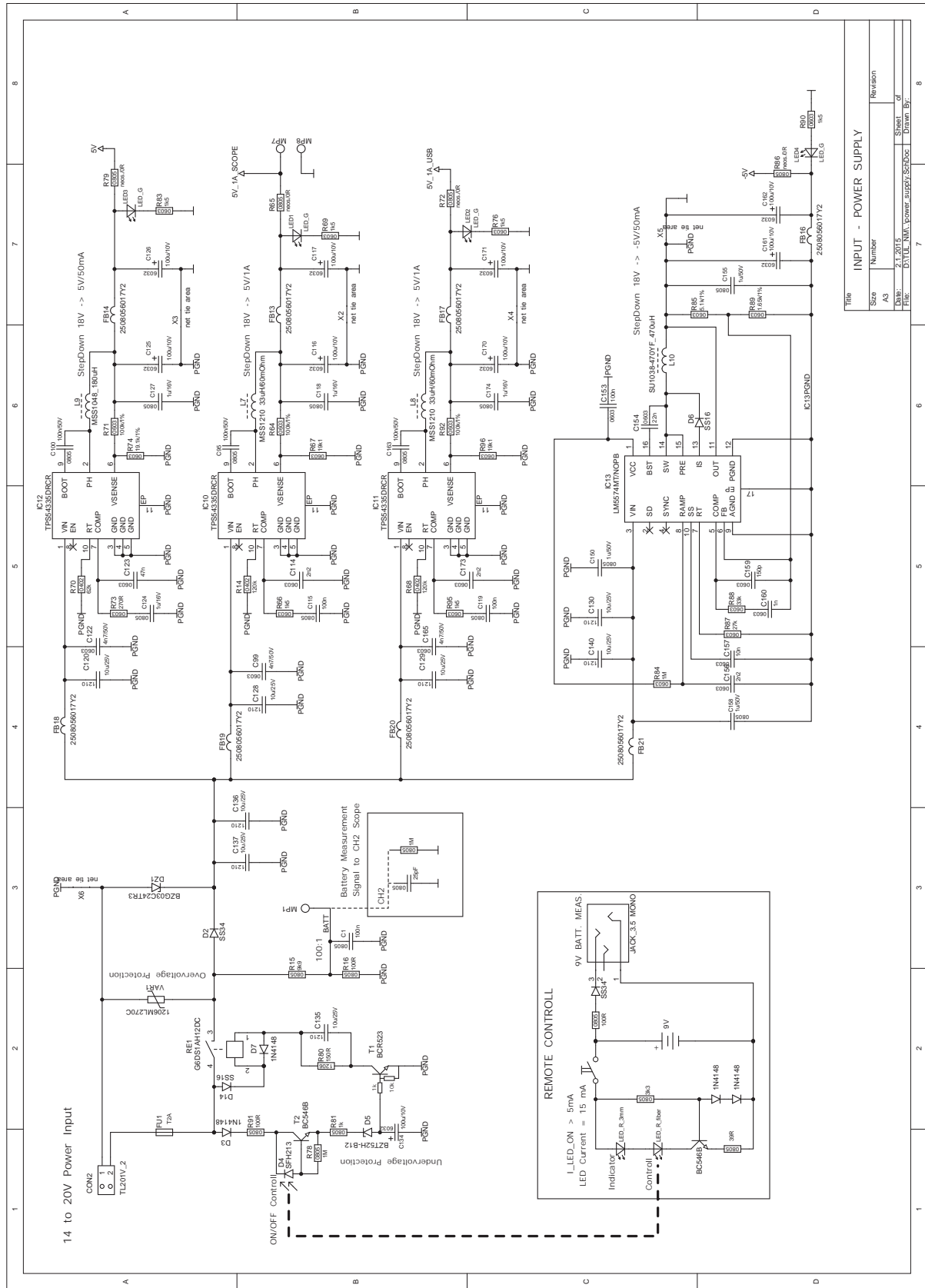


Title		INPUT - FRONT END	
Size	Number	Revision	
A4			
Date:	2.1.2015	Sheet	of
File:	D:\TUL_NM\...front_end.SchDoc	Drawn By:	

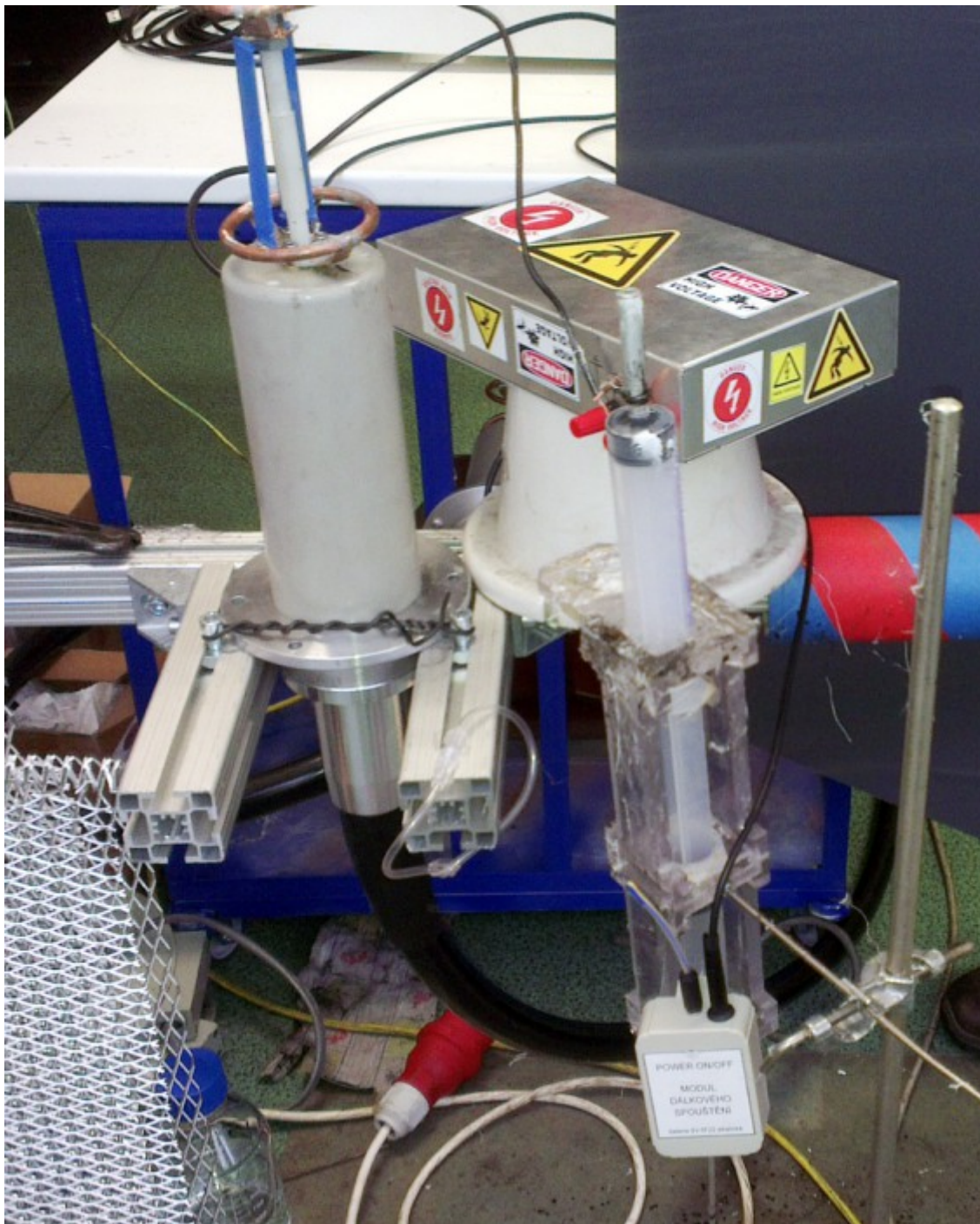
P íloha C2 - Schéma zapojení



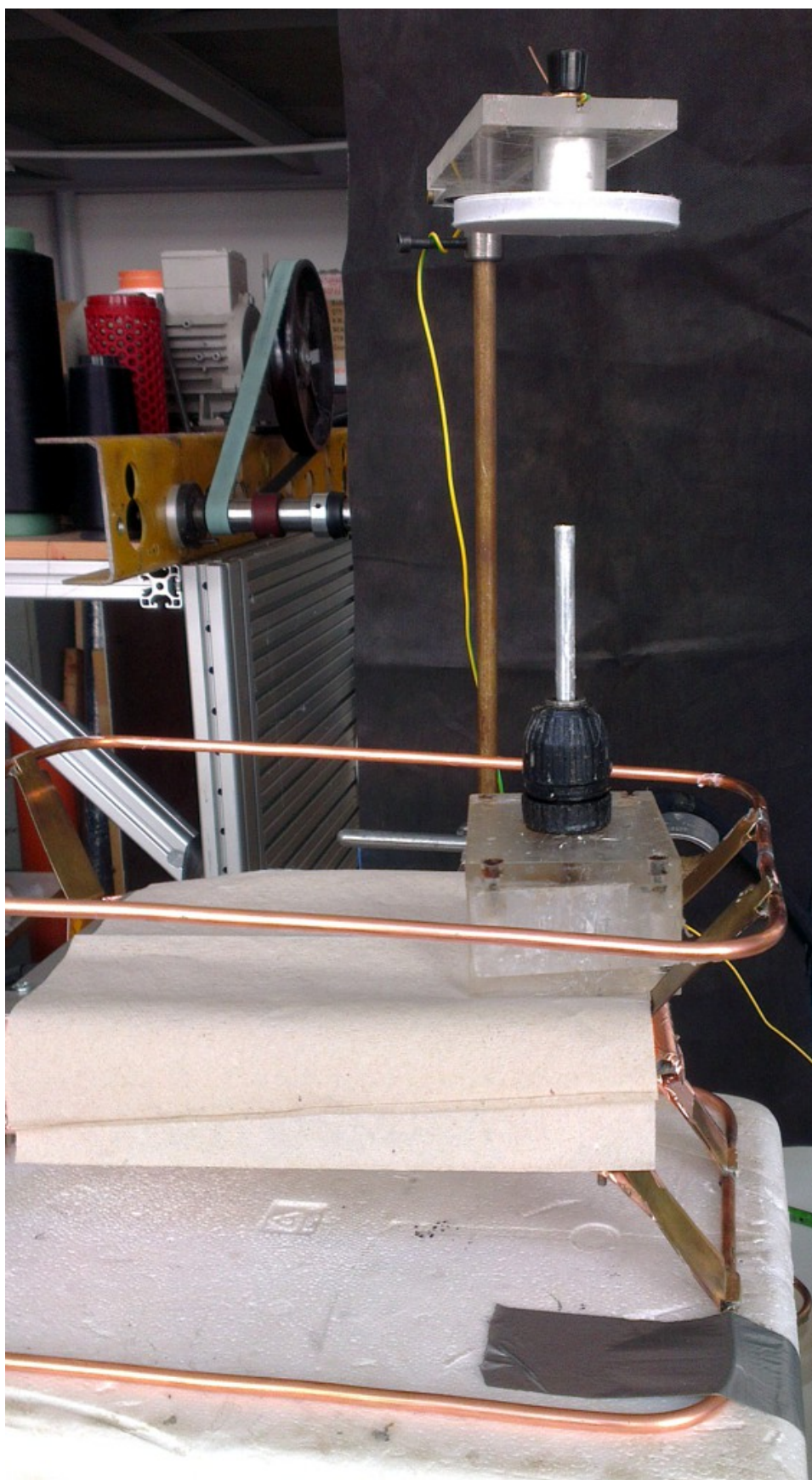
P íloha C3 - Schéma zapojení



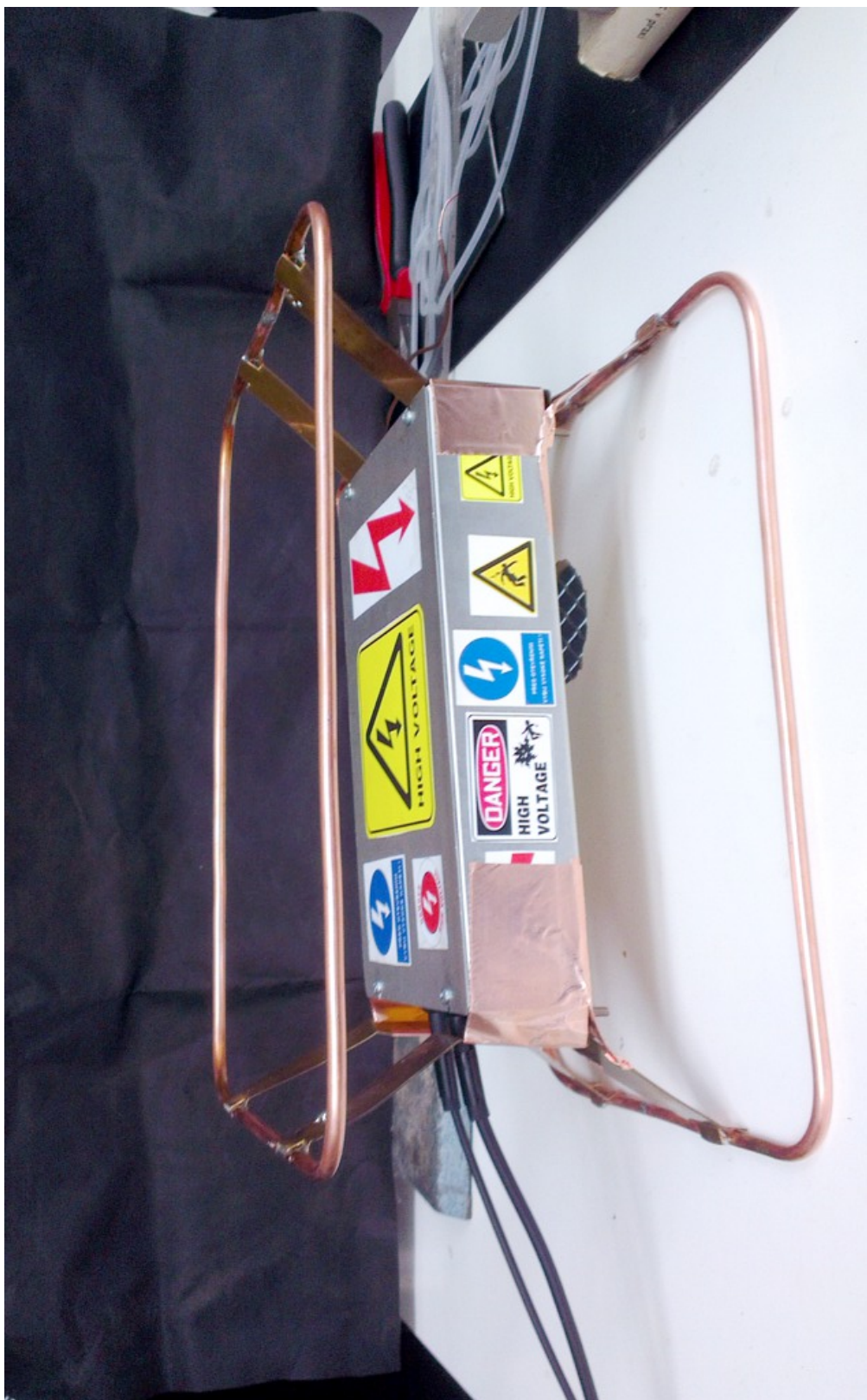
P íloha D1 - Realizované za ízení



P íloha D2 - Realizované za ízení



P íloha D3 - Realizované za ízení



P íloha E - Obsah CD

DP_Ondrich_2015

DP_Ondrich_2015\data_signaly
bin_signaly.zip 101 707 352 21.04.2015 15:31 -a--
99 323 k v 1 souborech

DP_Ondrich_2015\korokamera
korokamera.zip 84 763 077 21.04.2015 15:32 -a--
82 776 k v 1 souborech

DP_Ondrich_2015\osciloskop_instal
OWON_VDS_S2_2.0.5_Setup.zip 50 048 212 21.04.2015 15:26 -a--
48 875 k v 1 souborech

DP_Ondrich_2015\PCB_Project
PCB_Project_zaloha.zip 55 559 801 21.04.2015 15:23 -a--
54 257 k v 1 souborech

DP_Ondrich_2015\prilohy
0 k v 0 souborech

DP_Ondrich_2015\prilohy\cdr
A.cdr 1 416 730 09.05.2015 23:13 -a--
B.cdr 1 404 463 09.05.2015 23:13 -a--
C1.cdr 244 483 09.05.2015 23:35 -a--
C1_pred_opt.pdf 760 598 09.05.2015 23:35 -a--
C2.cdr 356 613 09.05.2015 23:34 -a--
C2_pred_opt.pdf 1 176 966 09.05.2015 23:35 -a--
C3.cdr 772 176 09.05.2015 23:34 -a--
C3_pred_opt.pdf 2 543 414 09.05.2015 23:36 -a--
cdr.rar 15 319 290 09.05.2015 23:39 -a--
D1.cdr 2 517 960 09.05.2015 23:17 -a--
D2.cdr 2 847 142 09.05.2015 23:14 -a--
D3.cdr 2 913 105 09.05.2015 23:14 -a--
E.cdr 1 376 626 09.05.2015 23:48 -a--
32 860 k v 13 souborech

DP_Ondrich_2015\prilohy\pdf
A.pdf 128 128 09.05.2015 23:31 -a--
B.pdf 41 131 09.05.2015 23:31 -a--
C1.pdf 211 913 09.05.2015 23:37 -a--
C2.pdf 305 723 09.05.2015 23:36 -a--
C3.pdf 641 518 09.05.2015 23:37 -a--
D1.pdf 141 018 09.05.2015 23:27 -a--
D2.pdf 169 687 09.05.2015 23:27 -a--
D3.pdf 156 171 09.05.2015 23:27 -a--
1 753 k v 8 souborech

DP_Ondrich_2015\text
DP_Ondrich_2015.docx 5 084 069 09.05.2015 23:07 -a--
DP_Ondrich_2015.pdf 14 852 740 01.05.2015 23:21 -a--
PKPTisk.pdf 49 750 15.04.2015 15:28 -a--
vskp-titulni-strana.pdf 32 720 15.04.2015 15:11 -a--
Zadani.docx 15 153 15.04.2015 14:45 -a--
zaloha.zip 19 481 946 10.05.2015 00:00 -a--
38 590 k v 6 souborech