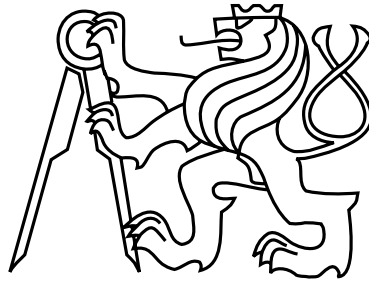


České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektrických pohonů a trakce



Diplomová práce

## **Detekce elektrického oblouku v síti nízkého napětí**

*Bc. Hugo Franěk*

Vedoucí práce: Doc. Ing. Pavel Mindl, CSc.

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony

11. května 2015

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrických pohonů a trakce

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Hugo Franěk**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony

Název tématu: **Detekce elektrického oblouku v síti nn**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte analýzu rizik vzniku elektrického oblouku v sítích nízkého napětí a možností jejich detekce a odstranění.
- 2) Zhodnoťte meze působnosti elektrických jisticích a ochranných přístrojů, používaných v rozvodech nízkého napětí z hlediska jejich možností eliminace různých druhů úniku elektrického proudu.
- 3) Proveďte analýzu funkčních možností ochranných přístrojů na detekci podélného a příčného oblouku, vznikajícího mezi pracovními vodiči rozvodu nízkého napětí.
- 4) Proveďte analýzu možných rušivých vlivů na funkci ochranných přístrojů určených k detekci podélného a příčného oblouku v sítích nn.

Seznam odborné literatury:

- [1] [http://www.solarabcs.org/about/publications/meeting\\_presentations\\_minutes/2011/02/pdfs/Arc-PV\\_Codes-Detection-mitigation.pdf](http://www.solarabcs.org/about/publications/meeting_presentations_minutes/2011/02/pdfs/Arc-PV_Codes-Detection-mitigation.pdf)
- [2] <http://ecmweb.com/content/basics-arc-fault-protection>
- [3] <http://www.pfeiffereng.com/The%20Arc%20Fault%20Circuit%20Interrupter.pdf>

Vedoucí: doc.Ing. Pavel Mindl, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

prof. Ing. Jiří Lettl, CSc.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 1. 10. 2014

# Prohlášení

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

V Praze dne 10. 5. 2015

.....

# Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi svou pomocí přispěli k úspěšnému vypracování této práce. Jmenovitě děkuji zejména vedoucímu své práce panu Doc. Ing. Pavlu Mindlovi, CSc. za odborné konzultace, cenné rady a připomínky k práci a za pomoc při realizaci praktické části práce. Dále děkuji panu Ing. Vítu Hlinovskému, CSc. za zapůjčení měřících přístrojů, panu Ing. Zdeňku Gecovi z firmy Siemens za technickou podporu při realizaci experimentů a firmě Eaton Elektrotechnika s.r.o., jmenovitě panu Ing. Pavlu Hanušovi, za dar v podobě rozvaděče a jisticích přístrojů pro laboratorní pracoviště.

# Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou elektrického oblouku v sítích nízkého napětí, zejména pak v domovních elektroinstalacích. Uvedeny jsou zde různé druhy těchto poruchových elektrických oblouků a nejčastější příčiny, při nichž vznikají. Dále jsou v práci rozebrány možnosti ochrany před účinky poruchových elektrických oblouků a to jak pomocí běžných jisticích a ochranných přístrojů, tak zejména pomocí speciálních přístrojů pro jejich detekci nazývaných v angličtině jako Arc Fault Circuit Interrupters (AFCI) nebo Arc Fault Detection Devices (AFDD). Funkce těchto přístrojů je v práci podrobně rozebrána a jsou v ní také popsány metody sloužící k ověření jejich správné činnosti. V rámci práce je sestaveno laboratorní pracoviště pro testování AFDD a je zde ověřena citlivost reakce těchto přístrojů na skutečné poruchové elektrické oblouky a jejich odolnost proti rušivým vlivům vyskytujícím se v běžných instalacích.

# Abstract

This diploma thesis deals with the problematic of electric arc in low voltage networks, especially in home wiring. The first part describes types of this electric arcs and the main reasons of their formation. There are described different methods of their detection by common circuit breakers, residual current circuit breakers and especially by Arc Fault Circuit Interrupters (AFCI) or Arc Fault Detection Devices (AFDD). The second part deals with the basic measurement methods and with assembly of laboratory workplace for AFDDs. The sensitivity of reaction of this devices for real electric arcs and their resistance for operational arcs of electric loads is measured and described.

## Klíčová slova

síť nízkého napětí, domovní elektroinstalace, poruchový elektrický oblouk, paralelní a sériový elektrický oblouk, přístroje pro detekci poruchového elektrického oblouku, AFDD, AFCI

## Keywords

low voltage network, home wiring, electric arc fault, parallel and serial arcing faults, arc fault detection devices, arc fault circuit interrupters, AFDD, AFCI

# Bibliografická citace

*FRANĚK, Hugo: Detekce elektrického oblouku v síti nízkého napětí. Diplomová práce.* Praha. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2015. 103 s.

# Obsah

Úvod	1
<b>1 Poruchový elektrický oblouk v síti nízkého napětí</b>	<b>3</b>
1.1 Příčiny vzniku poruchového elektrického oblouku	3
1.2 Druhy poruchových elektrických oblouků	6
1.2.1 Paralelní poruchový elektrický oblouk	7
1.2.1.1 Paralelní oblouk mezi fázovým a ochranným vodičem	7
1.2.1.2 Paralelní oblouk mezi fázovým a středním vodičem	7
1.2.2 Sériový poruchový elektrický oblouk	8
1.3 Vznik stabilního poruchového elektrického oblouku	8
1.3.1 Vznik oblouku přímo mezi vodivými částmi	8
1.3.2 Vznik oblouku vlivem poškozené izolace	9
1.3.3 Situace se sériovým poruchovým obloukem	10
1.3.3.1 Situace při proudech do 3 A	13
1.3.3.2 Situace při proudech v rozsahu 3 až 10 A	14
1.3.3.3 Situace při proudech nad 10 A	15
1.3.4 Situace s paralelním poruchovým obloukem	17
<b>2 Možnosti ochrany před účinky elektrického oblouku</b>	<b>19</b>
2.1 Ochrana pomocí jističů a pojistek	20



2.2	Ochrana pomocí proudových chráničů . . . . .	21
2.3	Nové možnosti ochrany . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Přístroje AFDD</b>	<b>24</b>
3.1	Přehled modelů přístrojů AFDD . . . . .	24
3.2	Princip činnosti přístrojů AFDD . . . . .	27
3.2.1	Detekce sériového poruchového oblouku . . . . .	28
3.2.2	Detekce paralelního poruchového oblouku . . . . .	30
3.2.3	Prevence před nechtěným vybavením . . . . .	31
3.2.4	Další funkce přístrojů . . . . .	34
3.3	Ověření správné funkce přístrojů AFDD . . . . .	35
3.3.1	Ověření reakce na sériový oblouk . . . . .	38
3.3.2	Ověření reakce na paralelní oblouk . . . . .	39
3.3.3	Maskovací zkoušky . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Laboratorní pracoviště pro přístroje AFDD</b>	<b>41</b>
4.1	Elektrodotový generátor elektrického oblouku . . . . .	41
4.2	Lineární jiskřiště . . . . .	43
4.3	Rozvaděč s AFDD . . . . .	43
4.4	Měřicí přístroje . . . . .	45
4.5	Celkové uspořádání pracoviště . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Měření s přístroji AFDD</b>	<b>49</b>
5.1	Měření se sériovým obloukem . . . . .	49
5.1.1	Měření s generátorem elektrického oblouku . . . . .	51
5.1.2	Měření s lineárním jiskřištěm . . . . .	53
5.2	Měření s rušivými zátěžemi . . . . .	59

Závěr	61
Literatura	64
Přílohy	67

# Seznam obrázků

1.1	Ukázky příčin vedoucích k vzniku poruchových elektrických oblouků . . . . .	4
1.2	Provrtaný kabel - ukázka jedné z možných příčin vzniku poruchového elektrického oblouku z praxe . . . . .	5
1.3	Druhy poruchových elektrických oblouků dle místa výskytu v obvodu . . . . .	6
1.4	Paralelní a sériový poruchový elektrický oblouk . . . . .	6
1.5	Fáze vzniku elektrického oblouku mezi vodivými částmi v kabelu . . . . .	9
1.6	Vznik elektrického oblouku v kabelu přes poškozenou izolaci . . . . .	10
1.7	Vznik elektrického oblouku ve vodiči se zúženým průřezem . . . . .	11
1.8	Vzorek kabelu připravený k testování . . . . .	12
1.9	Přípravek pro upevnění vzorku kabelu . . . . .	12
1.10	Data z měření na kabelu NYM-J při 2 A a 240 V . . . . .	13
1.11	Data z měření na kabelu NYM-J při 5 A a 240 V . . . . .	14
1.12	Vzplanutí kabelu NYM-J při 5 A a 240 V . . . . .	15
1.13	Data z měření na kabelu NYM-J při 32 A a 240 V . . . . .	16
1.14	Závislost energie celkové a energie oblouku na procházejícím proudu při vzplanutí kabelu a jeho hoření po dobu min. 50 ms . . . . .	16
1.15	Pravděpodobnost výskytu různě dlouho hořících plamenů v závislosti na procházejícím proudu . . . . .	17
1.16	Typický průběh proudu a napětí při poruše způsobené paralelním obloukem . . . . .	18

2.1	Ilustrační vypínací charakteristiky instalačních jističů a tavné charakteristiky válcových pojistek vel. 14 typu gG . . . . .	21
2.2	Vypínací charakteristika přístroje AFDD v porovnání s vypínací charakteristikou jističů a pojistky . . . . .	23
3.1	Ukázka kombinovaných přístrojů AFCI amerických výrobců . . . . .	25
3.2	Přístroj AFDD firmy Siemens, model 5SM6011-1 . . . . .	26
3.3	Blokový diagram přístroje Siemens 5SM6 . . . . .	27
3.4	Pohled do vnitřku přístroje Siemens 5SM6 ze strany měřících transformátorů a ze strany mikroprocesoru . . . . .	28
3.5	Princip detekce sériového poruchového oblouku . . . . .	29
3.6	Princip detekce paralelního poruchového oblouku . . . . .	30
3.7	Průběhy proudu spínaného zdroje, vrtačky a stmívače . . . . .	32
3.8	Faktory rozhodující o vybavení AFDD . . . . .	33
3.9	Vysokofrekvenční šum oblouku a na pozadí . . . . .	33
3.10	Princip autotestu přístroje Siemens 5SM6 . . . . .	34
3.11	Příprava vzorku kabelu pro testování AFDD . . . . .	36
3.12	Generátor elektrického oblouku pro testování AFDD . . . . .	37
3.13	Testování AFDD vibrační deskou s volnými svorkami . . . . .	37
3.14	Detail kabelového oka při testování AFDD vibrační deskou . . . . .	38
4.1	Generátor elektrického oblouku realizovaný pro laboratorní pracoviště AFDD	42
4.2	Detail jiskřiště generátoru elektrického oblouku realizovaného pro laboratorní pracoviště AFDD . . . . .	42
4.3	Realizované lineární jiskřiště . . . . .	43
4.4	Schéma zapojení rozvaděče pro laboratorní pracoviště AFDD . . . . .	44
4.5	Realizovaný rozvaděč pro laboratorní pracoviště AFDD . . . . .	45

4.6	Umístění cívky pro snímání magnetického pole Rohde & Schwarz HZ-10, pohled zepředu . . . . .	46
4.7	Umístění cívky pro snímání magnetického pole Rohde & Schwarz HZ-10, pohled z boku . . . . .	47
4.8	Feritový toroidní transformátor pro měření se spektrálním analyzátozem a pro měření průběhu proudu bez stejnosměrné složky . . . . .	47
4.9	Celkové uspořádání laboratorního pracoviště AFDD . . . . .	48
5.1	Oblouk hořící v elektrodozem generátoru oblouku při proudu 8 A . . . . .	52
5.2	Oblouk hořící v lineárním jiskřišti . . . . .	53
5.3	Ukázka výstupu z optické sondy OP-1 pro určení času, po který hoří oblouk v jiskřišti . . . . .	55
5.4	Některé spotřebiče použité pro zkoušku s maskovacím rušením . . . . .	56
A1	Indikátor operačních stavů přístroje Siemens 5SM6 . . . . .	P1
B1	Proud procházející obvodem se stabilně hořícím krátkým obloukem při čistě odporové zátěži 26 $\Omega$ a průběh napětí na oblouku . . . . .	P2
B2	Proud procházející obvodem se stabilně hořícím krátkým obloukem při čistě odporové zátěži 26 $\Omega$ a průběh napětí na oblouku . . . . .	P2
B3	Proudy procházející obvodem se stabilně hořícím obloukem při čistě odporové zátěži zachycené sondou Agilent a feritovým toroidním transformátorem . . . . .	P3
B4	Naměřené frekvenční spektrum odpovídající situaci z obr. B3 . . . . .	P3
C1	Naměřené spektrum při proudu 10 A a vypínacím času AFDD 720 ms . . . . .	P4
C2	Naměřené spektrum při proudu 10 A a vypínacím času AFDD 120 ms . . . . .	P4
C3	1. naměřené spektrum při proudu 5 A a oblouku v elektrodozem generátoru . . . . .	P5
C4	2. naměřené spektrum při proudu 5 A a oblouku v elektrodozem generátoru . . . . .	P5
C5	1. naměřené spektrum při proudu 5 A a oblouku v lineárním jiskřišti . . . . .	P6
C6	2. naměřené spektrum při proudu 5 A a oblouku v lineárním jiskřišti . . . . .	P6

C7	Proud procházející obvodem a průběh napětí na oblouku při zapojení spínaného zdroje (bez vybavení AFDD) . . . . .	P7
C8	Frekvenční spektrum oblouku odpovídající průběhům na obr. C7 . . . . .	P7
C9	Proud procházející obvodem a průběh napětí na oblouku při zapojení spínaného zdroje a odporu $70 \Omega$ (bez vybavení AFDD) . . . . .	P8
C10	Frekvenční spektrum oblouku odpovídající průběhům na obr. C9 . . . . .	P8
C11	Proud procházející obvodem a průběh napětí na oblouku při zapojení spínaného zdroje a odporu $26 \Omega$ (s vybavením AFDD) . . . . .	P9
C12	Frekvenční spektrum oblouku odpovídající průběhům na obr. C11 . . . . .	P9
C13	Proud procházející obvodem a průběh napětí na oblouku při zapojení fénu a odporu $70 \Omega$ (s vybavením AFDD) . . . . .	P10
C14	Frekvenční spektrum oblouku odpovídající průběhům na obr. C13 . . . . .	P10
C15	Proud procházející obvodem a průběh napětí na oblouku při zapojení vysavače Eta (bez vybavení AFDD) . . . . .	P11
C16	Frekvenční spektrum oblouku odpovídající průběhům na obr. C15 . . . . .	P11
C17	Proud procházející obvodem a průběh napětí na oblouku při zapojení vysavače Eta a odporu $70 \Omega$ (s vybavením AFDD) . . . . .	P12
C18	Frekvenční spektrum oblouku odpovídající průběhům na obr. C17 . . . . .	P12
C19	Proud procházející obvodem a průběh napětí na oblouku při zapojení vysavače AquaVac (bez vybavení AFDD) . . . . .	P13
C20	Frekvenční spektrum oblouku odpovídající průběhům na obr. C19 . . . . .	P13
C21	Proud procházející obvodem a průběh napětí na oblouku při zapojení obou vysavačů (s vybavením AFDD) . . . . .	P14
C22	Frekvenční spektrum oblouku odpovídající průběhům na obr. C21 . . . . .	P14
C23	Frekvenční spektrum šumu na pozadí, měřeno sondou Rohde & Schwarz . . . . .	P15
C24	Frekvenční spektrum oblouku při zapojení fénu a odporu $70 \Omega$ (s vybavením AFDD) . . . . .	P15

D1	Frekvenční spektrum šumu na pozadí, měřeno feritovým toroidním transformátorem . . . . .	P16
D2	Rušivé frekvenční spektrum při běhu fénu . . . . .	P16
D3	Rušivé frekvenční spektrum při běhu vysavače . . . . .	P17
D4	Rušivé frekvenční spektrum při spuštění vysavače . . . . .	P17
D5	Rušivé frekvenční spektrum při běhu spínaného zdroje Emco . . . . .	P18
D6	Rušivé frekvenční spektrum při běhu spínaného zdroje Hipro pro napájení notebooku . . . . .	P18
D7	Rušivé frekvenční spektrum při běhu vrtačky . . . . .	P19
D8	Rušivé frekvenční spektrum při běhu vrtačky s paralelním odporem $140 \Omega$ . . . . .	P19

# Seznam tabulek

3.1	Mezní hodnoty vybavení AFDD pro poruchy způsobené sériovým obloukem a pro poruchy izolace fáze proti zemi pro nízké proudy . . . . .	39
3.2	Mezní hodnoty vybavení AFDD pro poruchy způsobené paralelním obloukem a pro poruchy izolace fáze proti zemi pro vysoké proudy . . . . .	39
5.1	Naměřené časy hoření oblouku v lineárním jiskřišti do vybavení AFDD v porovnání s limitními časy určenými normou ČSN EN 62606 . . . . .	54
5.2	Přehled vybavení AFDD při měření s lineárním jiskřištěm . . . . .	56



# Seznam zkratek a symbolů

AFCI	Arc Fault Circuit Interrupter	-
AFDD	Arc Fault Detection Device	-
$I_{\Delta n}$	reziduální proud proudového chrániče	mA
LAN	Local Area Network	-
nn	nízké napětí	-
PLC	Power Line Communication	-
RSSI	Received Signal Strength Indicator	-

# Úvod

Dle každoročních statistik Hasičského záchranného sboru České republiky zaujímají požáry zapříčiněné elektrickou energií velký podíl z celkového počtu požárů. V roce 2014 byla z celkového počtu 17388 požárů v 2144 případech jako příčina uvedena technická závada, do které spadají právě i požáry elektroinstalace [1, 3]. V roce 2013 to bylo 2213 požárů způsobených technickou závadou ze 17105 všech požárů [2]. Ani v jiných letech se čísla od těchto příliš neliší. V roce 2013 přesáhly škody vzniklé požárem způsobeným technickými závadami miliardu korun, v roce 2014 to byla částka přesahující tři čtvrtě miliardy korun. Zraněny přitom byly desítky osob a v některých případech došlo i k usmrcení. Po požárech způsobených nedbalostmi dospělých (např. kouření, zakládání ohně, nesprávná obsluha topidla, ponechání tepelných spotřebičů bez dozoru apod.), byly technické závady nejčastější příčinou, kvůli které museli hasiči v ČR zasahovat. Požáry od elektroinstalace byly způsobeny opět buď nedbalostí (např. neodbornými zásahy do elektroinstalace a spotřebičů, vyřazováním jistících prvků, opravami pojistek apod.), nebo často také závadou na elektroinstalaci či nesprávně provedenou elektroinstalací. Iniciátorem vzniku požáru může být v těchto případech zkrat nebo proudové přetížení, jiskra v kombinaci s výskytem výbušných plynů, zahoření způsobené velkým přechodovým elektrickým odporem nebo velice často také elektrický oblouk. Dle [4] byl v České republice v roce 2013 elektrický oblouk třetí nejčastější příčinou požárů iniciovaných elektřinou a způsobil přes 300 požárů. Poruchový elektrický oblouk<sup>1</sup> může vzniknout např. z důvodů porušené izolace vodičů nebo při uvolnění elektrických kontaktů a to jak přímo v elektrické instalaci, tak i v připojených spotřebičích.

---

<sup>1</sup>Elektrický oblouk je dle [24] doutnavý elektrický výboj napříč izolačním médiem doprovázený obvykle částečným vypařením elektrod. Poruchovým elektrickým obloukem je pak myšlen nebezpečný neúmyslný oblouk vzniklý mezi vodiči v elektroinstalaci.

Velké riziko vzniku požárů následované úmrtím osob ať už přímo působením ohně, nebo udušením vzniklými zplodinami hrozí zejména v obytných prostorech. Je to způsobeno jak častým výskytem osob v těchto místech, které zde i nocují (v noci je riziko úmrtí při vzniku požáru nejvyšší), tak i faktem, že v domácnostech není oproti průmyslovým provozům povinně a pravidelně prováděna údržba elektroinstalace. Možností ochrany před účinky poruchových elektrických oblouků dosud kromě důsledné prevence neexistovalo mnoho. Částečným řešením je instalace proudových chráničů v rizikových obvodech, ty ale detekují elektrický oblouk jen za velmi specifických podmínek a jejich použitím nelze přítomné riziko zcela odstranit.

Řešení problému detekce poruchových elektrických oblouků a tím zvýšení ochrany objektů před požáry způsobenými poruchou v elektroinstalaci bylo nalezeno před několika lety v USA. Je jím speciální přístroj pro detekci poruchových elektrických oblouků nazývaný jako Arc Fault Detection Device (AFDD), případně v USA jako Arc Fault Circuit Interrupter (AFCI), který reaguje na specifické rušení produkované poruchovým elektrickým obloukem do sítě a obvod, ve kterém se tato porucha nachází, dokáže včas odpojit. V USA a Kanadě, kde se tyto přístroje od roku 2005 povinně instalují v novostavbách a rekonstruovaných objektech do koncových obvodů ve všech ložnicích a od roku 2008 ve všech obytných místnostech, se již jejich používání pozitivně projevilo ve statistikách tamních pojišťoven. V Evropě tyto přístroje zatím běžné nejsou, ale k dispozici jsou již první modely odpovídající novým evropským normám pro tuto problematiku a v brzké době se tak očekává jejich rychlé rozšíření, podobně jako tomu bylo v minulosti u proudových chráničů. Právě těmito přístroji a jejich funkčními možnostmi vedoucími ke zvýšení požární bezpečnosti v domovních elektroinstalacích se tato práce zabývá.

# Kapitola 1

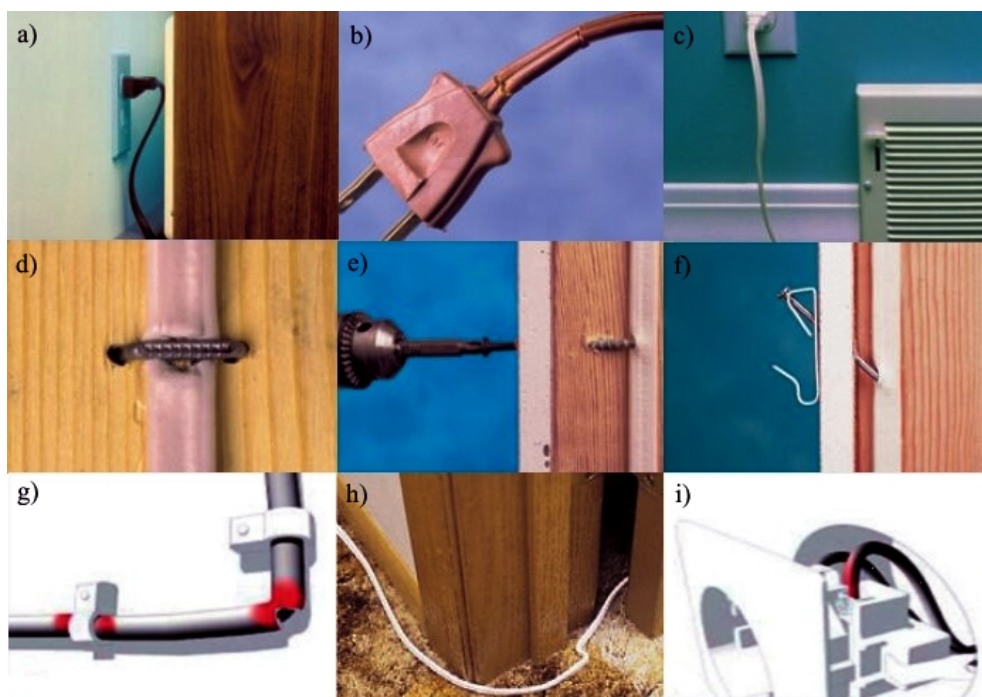
## Poruchový elektrický oblouk v síti nízkého napětí

### 1.1 Příčiny vzniku poruchového elektrického oblouku

Poruchový elektrický oblouk se v rozvodech domovní silnoproudé elektroinstalace může objevit z několika různých důvodů. Poruchová místa vedoucí k jeho iniciaci mohou vzniknout už při nedbalé realizaci elektroinstalace (nedotažením svorek, nevhodným ohybem nebo upevněním vodičů apod.), projevením skrytých závad, opotřebením, mechanickým namáháním, vibracemi nebo později z důvodu neopatrné manipulace uživatelem.

K nejčastějším příčinám vzniku poruchového elektrického oblouku patří poškození izolace kabelů (např. provrtání šroubem, proražení hřebíkem nebo upevňovací skobou), zlomený kabel z důvodu malého poloměru ohybu při instalaci (děje se tak zejména u hliníkových vodičů ve starších instalacích), ohýbané přívodní nebo prodlužovací kabely v blízkosti vidlic a konektorů, tažení kabelu otevřenými dveřmi či okny a jejich následné zavření, ulomené vidlice, vytržené nebo poškozené vedení způsobené posouváním nábytku, prodlužovací přívody zatížené nábytkem nebo schované pod kobercem. Dalším důvodem k vzniku nežádoucích elektrických oblouků mohou být uvolněné nebo špatně dotažené kontakty v rozvodných krabicích, rozvaděčích nebo zásuvkách. Obzvláště v těch starších a častým zapojováním a vypojováním vidlic opotřebovaných zásuvkách se uvolňování kontaktů děje poměrně často. Ka-

bely mohou být také degradovány působením vnějšího prostředí, např. horkem (třeba i tepelnými elektrickými spotřebiči), vlhkostí, plyny, UV zářením nebo okusováním hlodavci. Problém spočívá v tom, že většina kabelů používá izolaci vyrobenou z měkčeného PVC a ta působením UV záření a vysoké teploty postupně tvrdne, protože dochází k uvolňování změkčovadel z plastu [5]. Tím vznikají v izolaci mikrotrhlínky, kterými může do okolí unikat elektrický proud. K nežádoucímu propojení vodičů může dojít dále také kondenzováním vody nebo propojením vodivými nečistotami. Ukázky typických příčin vzniku poruchového elektrického oblouku ukazuje obr. 1.1. Nejvíce nebezpečné je, že jsou poškozená místa většinou nepatrná a při běžné kontrole nebo provozu je lze snadno přehlédnout. Proto také požáry způsobené elektrickým obloukem velice nemile překvapí vznikem a rychlostí rozvoje.



Obrázek 1.1: Ukázky příčin vedoucích k vzniku poruchových elektrických oblouků: a) skřípnutí kabelu přisunutým nábytkem, b) poškozený přívodní kabel v namáhaném místě poblíž vidlice, c) poškození kabelu tepelnými účinky, d) poškození kabelu hluboko zaraženými příchytkami, e) poškozená izolace vodiče navrtáním vrutem, f) poškozená izolace vodiče proražená hřebíkem, g) zlomení kabelu malým poloměrem ohybu, h) zavření kabelu do dveří, i) uvolněné nebo nesprávně utažené kontakty v zásuvkách; převzato z [6] a [7]

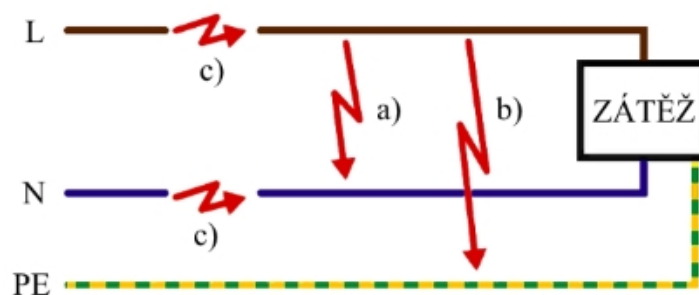
Jako příklad odebraný přímo z praxe slouží vzorek provrtaného pětižilového kabelu na obr. 1.2. Zde uživatel elektroinstalace nedbal základních pokynů a vrtal přímo v elektroinstalační zóně a zasáhl přímo střed vodiče tak, že došlo k vybavení jističe chránícího obvod. Po obnovení napájení do poškozeného místa se ale zdálo, že je vše v pořádku a jistič dále nevybavoval. Proto uživatel do vyvrtané díry vložil hmoždinku a následně pak vrut. Přes ten se začal v porušeném místě tvořit elektrický oblouk. Z obrázku je patrné jak uzavření proudové cesty přes vrut, tak i zuhelnatělá hmoždinka. Uživatel měl štěstí a po nějaké době došlo k vybavení proudového chrániče a následně pak k odhalení poškozeného místa. Pokud by ale byl vodič navrtán v jiném místě než v jeho středu, nemuselo by se tak stát a elektrický oblouk by mohl dále nekontrolovaně hořet a způsobit tak mnohem větší škody. Velké nebezpečí by pak hrozilo hlavně při instalaci vodiče v dnes velmi často využívaných dutých stěnách (sádkartonových nebo dřevotřískových příčkách s nosnou dřevěnou konstrukcí), podhledech nebo půdních vestavbách.



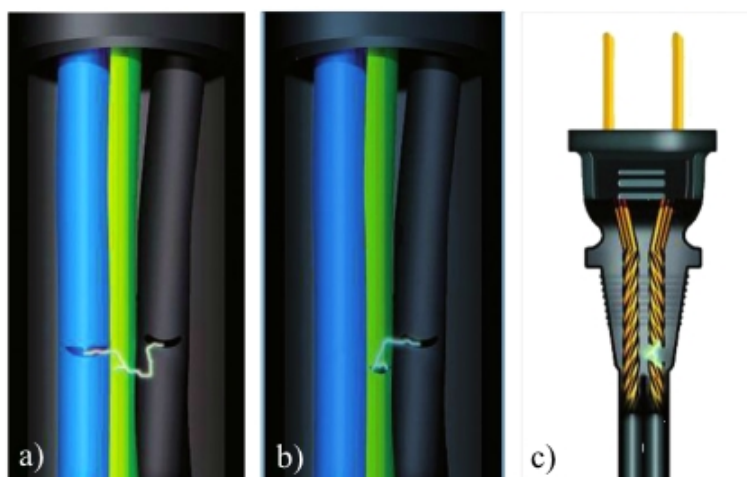
Obrázek 1.2: Provrtaný kabel - ukázka jedné z možných příčin vzniku poruchového elektrického oblouku z praxe

## 1.2 Druhy poruchových elektrických oblouků

Poruchové elektrické oblouky můžeme rozdělit podle místa jejich výskytu v obvodu na paralelní (příčné) a sériové (podélné), viz obr. 1.3 a 1.4. Vznikají odlišnými způsoby, každý z nich je charakteristický jinými vlastnostmi, a i možnostmi jejich detekce v síti se liší.



Obrázek 1.3: Druhy poruchových elektrických oblouků dle místa výskytu v obvodu, paralelní mezi pracovními vodiči (a), mezi fází a ochranným vodičem (b) a sériový (c)



Obrázek 1.4: Paralelní poruchový elektrický oblouk mezi pracovními vodiči (a), mezi fází a ochranným vodičem (b) a sériový poruchový elektrický oblouk (c), převzato z [7]

### 1.2.1 Paralelní poruchový elektrický oblouk

Paralelní poruchový elektrický oblouk se vyskytuje v obvodu paralelně mezi sousedními vodiči, buď mezi pracovními nebo mezi pracovním a ochranným. Proud tohoto oblouku je obvykle větší než pracovní proud obvodu, jelikož není omezen spotřebičem ale pouze samotným obloukem a impedancí smyčky. Tento oblouk může, ale nemusí, přejít do tvrdého zkratu, v čemž spočívá jeho zrádnost. Pokud do tvrdého zkratu přejde, vybaví jistič a obvod s poruchou odpojí. Nestane-li se tak, může mezi vodiči nepozorovatelně pozvolně hořet oblouk i dlouhou dobu a může tak způsobit požár. Paralelní poruchy mohou vzniknout např. v důsledku stárnutí izolačního materiálu vodiče nebo přítomností vodivého znečištění mezi vodiči kabelu, případně jiným vnějším vlivem. Paralelní poruchový oblouk bývá obecně delší než sériový, může hořet stabilněji a pohybovat se po vodičích k místu s menší impedancí.

#### 1.2.1.1 Paralelní oblouk mezi fázovým a ochranným vodičem

Paralelní poruchový oblouk vzniklý mezi fázovým (L) a ochranným (PE) vodičem je možno odhalit pomocí proudového chrániče instalovaného v obvodu. Oproti tomu běžná nadproudová a zkratová ochrana nemusí být schopna tento druh poruchy zaznamenat z důvodu možné vysoké impedance poruchového obvodu. Tento typ ochrany zareaguje určitě, jak již bylo uvedeno výše, v případě přechodu poruchy do tvrdého zkratu. K tomu ale nemusí dojít vůbec nebo se tak stane za dlouhou dobu, kdy už oblouk stačil předat do poškozené oblasti velké množství energie a kdy už není možné zabránit vzniku a rozšíření požáru. Před tímto druhem poruchy nás tedy běžné jističe či pojistky neochrání, ochránit před ní nás je schopen proudový chránič (více v kapitole 2).

#### 1.2.1.2 Paralelní oblouk mezi fázovým a středním vodičem

Paralelní oblouk vzniklý mezi fázovým (L) a středním (N) vodičem není oproti předchozímu případu možné zaznamenat pomocí proudového chrániče. Ten tuto poruchu považuje za běžný provozní stav, jelikož proud přicházející do obvodu fázovým vodičem se vrací středním zpět. Ochrana proti zkratu a přetížení zde bude opět, podobně jako v předchozím případě, fungovat jen omezeně. Její vybavení bude záviset na impedanci v chybovém okruhu, a tedy



i na hodnotě napětí oblouku. Záleží, zda v poruchovém obvodu vznikne zkrat a nebo bude obvodem téci zvýšený proud (nadproud) tak dlouhou dobu, že jistič či pojistka obvod odpojí a zabrání tak přísunu energie do místa poškození vodiče a případnému vzniku požáru. Vybavení jističe můžou v tomto případě ještě zhoršovat prodlužovací kabely nebo rozdvojky, které se v domácnostech běžně používají a které impedanci případného poruchového obvodu ještě zvyšují.

### **1.2.2 Sériový poruchový elektrický oblouk**

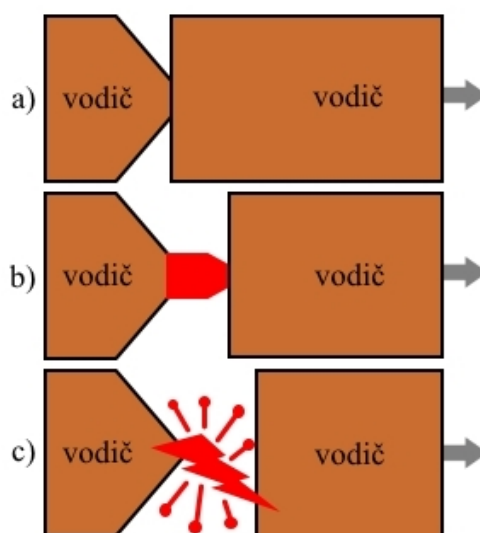
Sériový elektrický oblouk se vyskytuje v aktivním vodiči proudového obvodu v sérii se spotřebičem. Příčinou jeho vzniku může být např. špatně dotažená svorka nebo mechanicky přerušené jádro vodiče. Vyskytuje se častěji než příčný poruchový oblouk, jelikož i minimální mezera v nedokonalém spoji stačí k jeho zapálení. Vyznačuje se zejména tím, že při jeho výskytu není překročen běžný pracovní proud obvodu z důvodu konečné impedance připojeného spotřebiče. Tento druh oblouku je dokonce schopen užitečné zatížení obvodu i snižovat. Z těchto důvodů nejsou běžné nadproudové přístroje, jako je jistič nebo pojistka, schopny tuto poruchu zaznamenat a obvod rozpojit. Stejně tak není schopen tuto poruchu zaznamenat proudový chránič. Při vysokých provozních proudech a při dlouhých dobách hoření sériového elektrického oblouku se může v dotčeném místě zvyšovat teplota a tím i nebezpečí vzniku požáru. Z důvodu častého výskytu tohoto druhu oblouku v sítích nn a neschopnosti běžných ochranných přístrojů tuto poruchu zaznamenat, je tento druh poruchy pro vznik požáru nejvíce nebezpečný.

## **1.3 Vznik stabilního poruchového elektrického oblouku**

### **1.3.1 Vznik oblouku přímo mezi vodivými částmi**

V kritických místech kabelů, která jsou poškozena, mají nízkou vodivost, nebo která se nějakým způsobem pohybují (např. u pohyblivých napájecích nebo prodlužovacích kabelů), může vzniknout elektrický oblouk mezi kontakty přímým stykem kovových částí, viz obr. 1.5. Prostřednictvím dalšího pohybu způsobeného např. vibracemi nebo tepelnou roztažností se

začnou v původních kovových částech působením oblouku a následného oteplování tvořit úzká místa s redukováným průřezem. Tato místa se můžou dále zahřívát až dojde k přerušení jejich přímého kontaktu a začnou se zde vyskytovat, nejprve sporadicky, krátkodobé a nestabilní oblouky. Ty způsobí zahřátí kovových částí na ještě mnohem vyšší teploty. Okolní vzduch se začne ionizovat a pokud při průchodu proudu nulou oblouk zhasne, dojde poté mnohem lépe k jeho opětovnému zapálení. Hořící oblouk a vysoké teploty pak začnou způsobovat karbonizaci okolního izolačního materiálu. Přes zkarbonizovanou izolaci se pak mohou tvořit další elektrické oblouky, ke kterým již není nutný přímý kontakt vodivých částí, viz část 1.3.2.

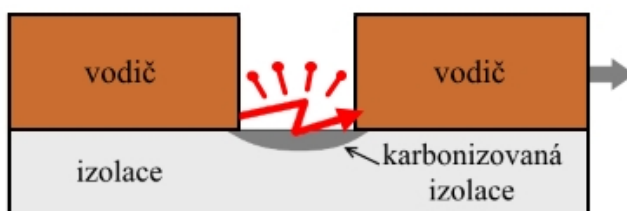


Obrázek 1.5: Fáze vzniku elektrického oblouku mezi vodivými částmi v kabelu; místo s redukováným průřezem (a), žhnutí kontaktů (b) a hoření oblouku (c)

### 1.3.2 Vznik oblouku vlivem poškozené izolace

Pokud je izolace mezi dvěma vodiči poškozena, může poruchový elektrický oblouk vzniknout též skrz vodivou cestu přes ni vytvořenou, tedy bez přímého kontaktu kovových částí vodiče, viz obr. 1.6. Materiály mezi vodiči mohou své izolační vlastnosti ztrácet v důsledku stárnutí nebo působením chemického, tepelného nebo mechanického namáhání a nežádoucí oblouk může vzniknout také na místech znečištěných či kontaminovaných kondenzovanou

vodou. I takto vzniklé nejprve drobné výboje mohou způsobit zahřátí plastů nacházejících se v okolí vodivých částí a jejich následnou karbonizaci. Působení vysokých teplot zapříčiní vypařování části izolačního materiálu, silné rozpálení poruchového místa a vznik stabilního elektrického oblouku. Ohořelá cesta mezi vodiči umožní následně nové zapálení oblouku po jeho zhasnutí při průchodu proudu nulou a další zahřívání místa vedoucí až k vzniku požáru.

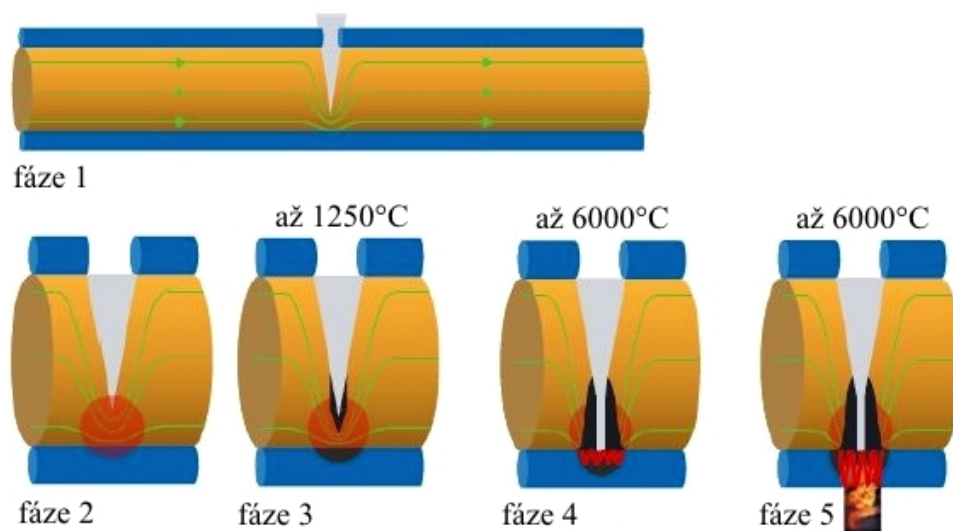


Obrázek 1.6: Vznik elektrického oblouku v kabelu přes poškozenou izolaci

Pro přiblížení této situace může sloužit příklad vzniku sériového poruchového oblouku ve vodiči se zúženým průřezem dle obr. 1.7. Tato porucha může nastat např. při poškození vodiče ohnutím s malým poloměrem ohybu a jeho následnému částečnému prasknutí. Stává se tak často u hliníkových vodičů s menším průřezem, jež se dříve často používaly a jsou v elektroinstalacích stále hojně rozšířeny. Další možností vzniku této situace může být narušení vodiče uloženého pod omítkou při jeho nechtěném navrtání a následném ponechání poškozeného místa bez cizí vodivé části (např. kdy vrut není příliš dlouhý a nedosahuje až k vodiči nebo narušená část vodiče je vyplněna hmoždinkou). V důsledku toho, že proud teče pouze zúženým místem vodiče, dochází k ohřívání celého poruchového místa včetně izolace (fáze 1 a 2). Toto zvýšení teploty způsobí oxidaci rozžhavené mědi na oxid měďnatý a karbonizaci izolace (fáze 3). S dalším zvyšováním teploty dojde v kritickém místě nejprve k tavení ale poté i k zplynování mědi a dočasně zde vznikne vzduchová mezera (fáze 4). Jelikož je poblíž poškozeného místa izolace zuhelnatělá, začnou se skrz ni tvořit nejprve sporadické elektrické oblouky, které ale brzy přejdou ve stabilní oblouk (fáze 5).

### 1.3.3 Situace se sériovým poruchovým obloukem

K testovacím pokusům, sloužícím zde jako příklad a prováděných dle [8], byl použit v Evropě nejčastěji používaný kabel typu NYM-J se třemi vodiči o průřezu  $1,5 \text{ mm}^2$ . Jedná se



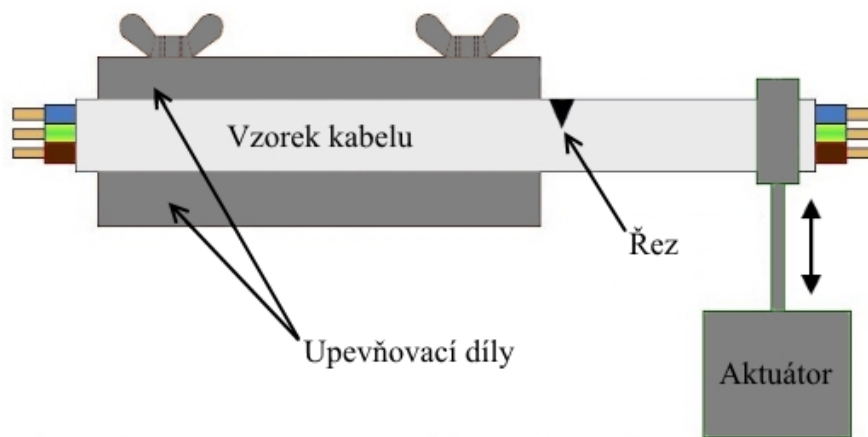
Obrázek 1.7: Vznik elektrického oblouku ve vodiči se zúženým průřezem, převzato z [7]; průchod proudu zúženým místem (1), zahřívání vodiče a izolace (2), oxidace mědi a karbonizace izolace (3), tavení a zplynování mědi, vznik vzduchové mezery a prvních sporadických oblouků (4), stabilně hořící oblouk skrz zkarbonizovanou izolaci (5)

o německou a rakouskou obdobu u nás nejčastěji používaného kabelu typu CYKY-J. Jednotlivé vodiče kabelu jsou pokryty PVC izolací, následuje výplňový gumový obal a plášť z černého nebo šedého PVC odolného vůči UV záření. Jedna žíla tohoto kabelu byla zcela přestřípnuta, ostatní byly zanechány nepoškozené, viz obr. 1.8. Část takto připraveného vzorku kabelu byla upevněna do přípravku dle obr. 1.9 tak, aby řez byl orientován nahoru. Aby bylo možno zvětšovat resp. zmenšovat mezeru mezi částmi přerušenoého vodiče, byl jeho druhý volný konec připevněn k ramenu aktuátoru. Z testovacích pokusů vyplynulo, že ke karbonizaci izolace v poruchovém místě dochází až od určité hodnoty elektrické energie a že velikost časového intervalu, který je potřebný ke stabilizaci elektrického oblouku a k vytvoření prvních plamenů, je značně závislá na velikosti zátěžového proudu.

Výsledky z pokusů provedených dle [8] zobrazují obrázky 1.10, 1.11 a 1.13. První grafy v obrázcích reprezentují nárůst energie v průběhu testovacího času. Plná křivka zobrazuje celkovou energii, která se v místě poruchy uvolní zejména ve formě tepla a záření, čárkovaná křivka zobrazuje energii samotného oblouku. Rozdíl mezi těmito energiemi je způsoben hlavně spojením kontaktů, které jsou zoxidované a je mezi nimi vysoká impedance



Obrázek 1.8: Vzorek kabelu připravený k testování, převzato z [8]

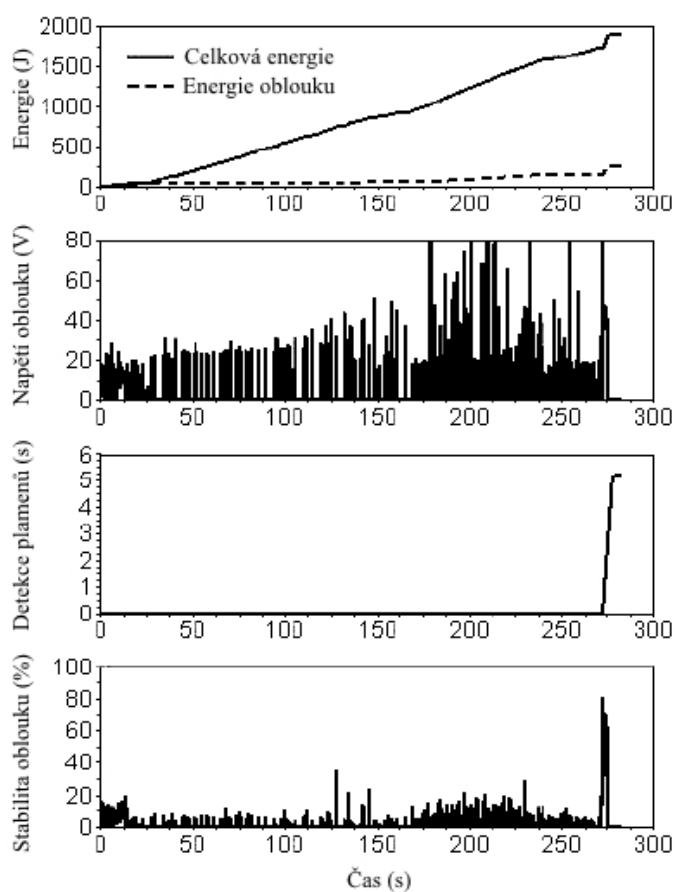


Obrázek 1.9: Přípravek pro upevnění vzorku kabelu, převzato z [8]

způsobující nárůst teploty a viditelné žhnutí, které ale neprodukuje vysokofrekvenční šum jako hořící oblouk. Nárůst energie lze rozdělit do dvou fází. První je fáze, kdy dochází ke karbonizaci izolace. V této fázi je stabilita oblouku velmi malá, není totiž možné, aby v poruchovém místě, kde není izolace karbonizovaná, stabilní oblouk vznikl. Tvoří se zde pouze drobné nestabilní oblouky v případě, že je vzdálenost mezi konci vodiče dostatečně krátká. Protože je stabilita oblouku nízká (viz spodní grafy v obrázcích), je i celková energie v poruchovém místě nízká a roste pouze pozvolna. Nestabilní oblouk v této fázi není schopen kabel zapálit, dochází jen k postupné karbonizaci izolace. Druhá fáze je fáze vzplanutí, kdy je poruchové místo již dostatečně karbonizované a stabilita oblouku se rapidně zvyšuje. Akumulovaná energie vrůstá a pokud je dostatečná, tak izolace již není schopna odolat vysoké teplotě a objeví se první plameny.

### 1.3.3.1 Situace při proudech do 3 A

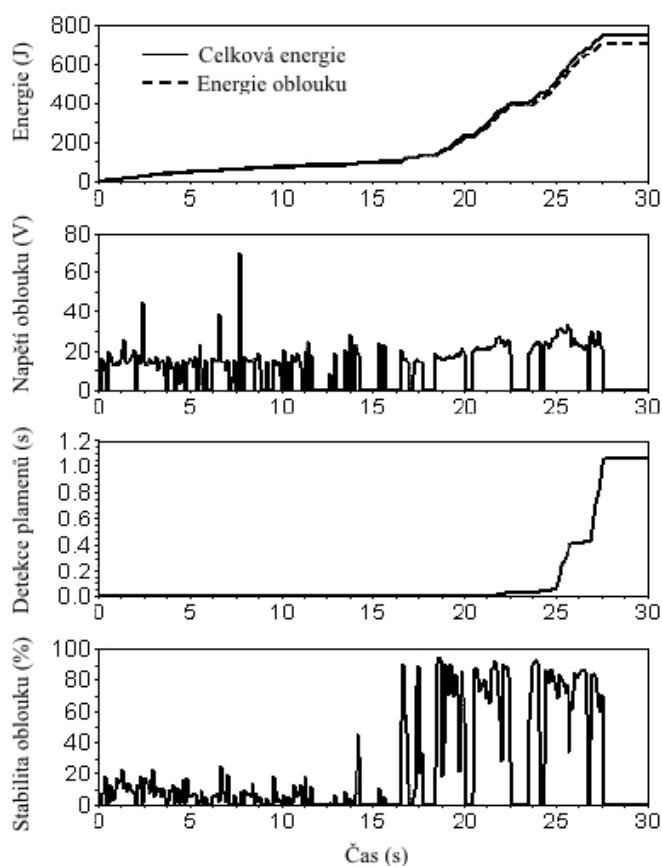
Výsledná data z měření dle [8] při napájecím napětí 240 V a proudu 2 A jsou zobrazena na obr. 1.10. Při proudech zhruba do 3 A je celková energie v poruchovém místě větší než energie oblouku. Většina celkové energie je spotřebována na žhnutí kontaktů v poškozeném místě. Vznik karbonizované cesty a stabilního oblouku je při těchto nízkých proudech poměrně obtížný. Jak je patrné z 4. grafu v obrázku 1.10, tak až za dobu několika minut izolace působením tepla a radiace ze žhnoucího místa úspěšně zuhelnatí a objeví se zde první stabilní elektrické oblouky. Při takto nízkých proudech nemá ale většinou elektrický oblouk výkon dostačující k zapálení kabelu. Větší riziko zde hrozí právě v samotném žhnutí, kdy i to samotné je schopno, bez vzniku stabilního elektrického oblouku, způsobit vzplanutí vodiče.



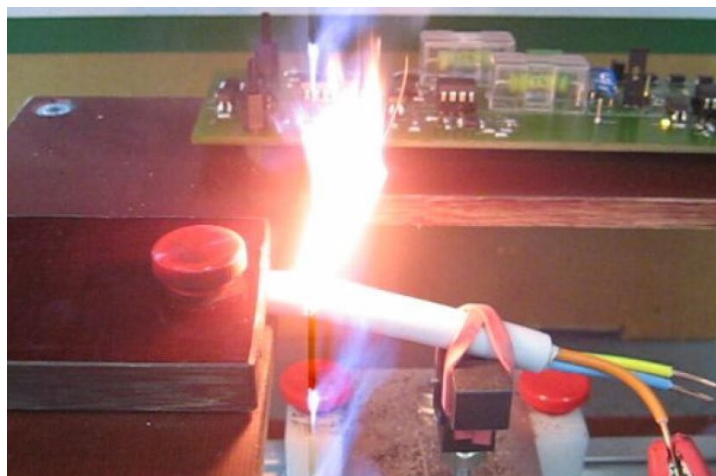
Obrázek 1.10: Data z měření na kabelu NYM-J při 2 A a 240 V, převzato z [8]

### 1.3.3.2 Situace při proudech v rozsahu 3 až 10 A

Při proudech v rozsahu asi od 3 do 10 A je již celková energie v poruchovém místě téměř shodná s energií oblouku, viz obr. 1.11 (data z měření při 5 A dle [8]). Je to způsobeno tím, že při těchto proudech převažuje hoření oblouku nad žhnutím kontaktů. Fáze karbonizace izolace trvá v tomto konkrétním případě asi 16 sekund, poté se začnou objevovat stabilní oblouky a jejich stabilita vzrůstá až k 90 % (4. graf v obr. 1.11). Po několika dalších sekundách není již izolace schopna vydržet působení vysokých teplot a vzniknou zde první plameny. Ukázka vzplanutí kabelu při uvedeném pokusu je na obr. 1.12. Ze stovek vzorků testovaných dle [8] vznikl na vzorcích při průchodu proudu o hodnotě mezi 3 a 10 A plamen až v 80 % případů. Jelikož většina elektrických spotřebičů běžně používaných v domácnosti pracuje právě v tomto rozsahu, představuje tento případ největší nebezpečí.



Obrázek 1.11: Data z měření na kabelu NYM-J při 5 A a 240 V, převzato z [8]



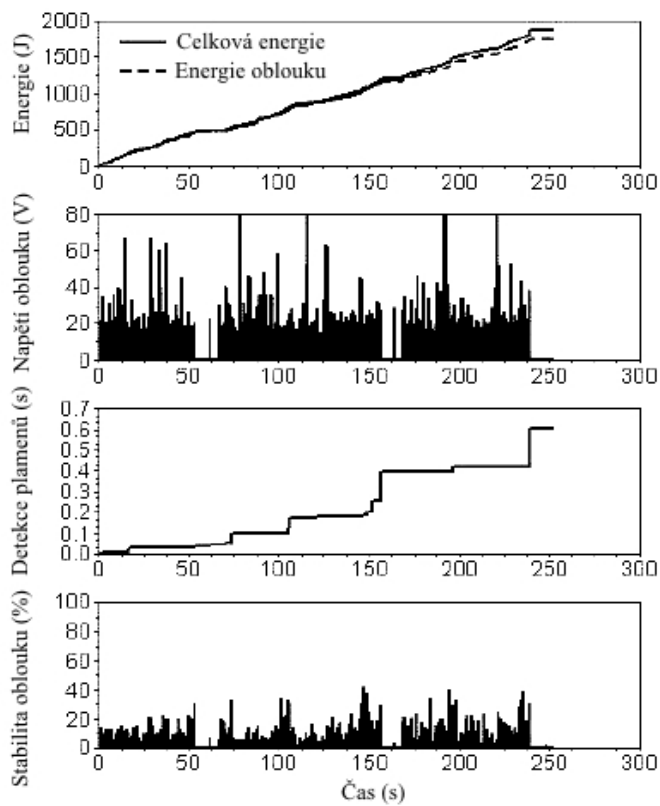
Obrázek 1.12: Vzplanutí kabelu NYM-J při 5 A a 240 V, převzato z [8]

### 1.3.3.3 Situace při proudech nad 10 A

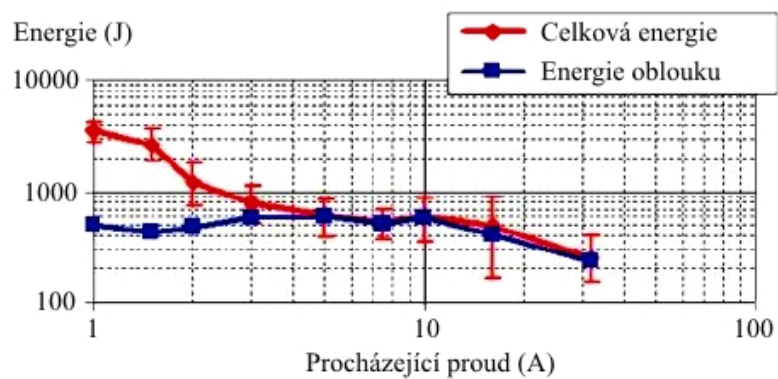
Při proudech vyšších než 10 A (obr. 1.13) je výkon poruchového oblouku již tak velký, že se plameny objevují velmi rychle a bez zuhelnatění izolace. Z důvodu zde vznikajícího vypařování zuhelnatělého materiálu se nevytváří uhlíková cesta a stabilita elektrického oblouku je proto malá. Za určitých okolností mohou také tyto poruchové oblouky s velkým výkonem oba konce měděného vodiče tavením znovu spojit dohromady a původně přerušené místo tak opravit. Stabilní poruchové oblouky jsou tedy v oblasti nad 10 A vzácné. Velké nebezpečí zde představuje výskyt krátkých prudkých plamenů.

Z testovacích pokusů uvedených výše a jejich opakování při různých hodnotách proudů vycházejí závislosti celkové energie na velikosti procházejícího proudu při napájecím napětí 240 V v okamžiku, kdy se v poruchovém místě objeví první významný plamen hořící déle než 50 ms (obr. 1.14). Na druhém obrázku 1.15 je v závislosti na procházejícím proudu zobrazeno procento výskytu plamenů v poruchovém místě trvajících 5 ms (modrá křivka), 50 ms (červená křivka) a 500 ms (zelená křivka). Právě i z těchto průběhů je zřejmé, že největší riziko vzniku dlouhotrvajících stabilních oblouků je právě v rozsahu proudů zhruba od 2 do 10 A.

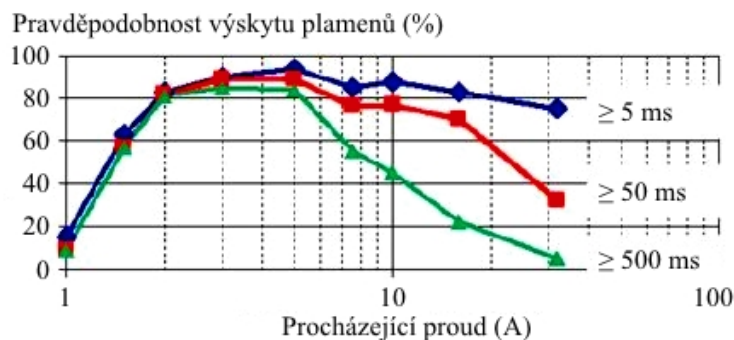




Obrázek 1.13: Data z měření na kabelu NYM-J při 32 A a 240 V, převzato z [8]



Obrázek 1.14: Závislost energie celkové a energie oblouku na procházejícím proudu při vzplnutí kabelu a jeho hoření po dobu min. 50 ms, převzato z [7]

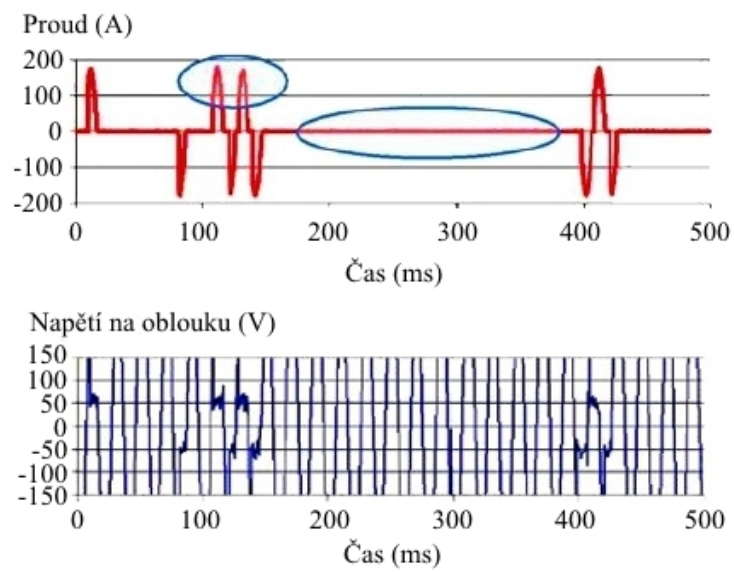


Obrázek 1.15: Pravděpodobnost výskytu různě dlouho hořících plamenů v závislosti na procházejícím proudu, převzato z [7]

### 1.3.4 Situace s paralelním poruchovým obloukem

Na obrázku 1.16 je zobrazen typický průběh proudu a napětí při poruše způsobené paralelním obloukem. V grafu jsou označena jak místa, kdy oblouk hoří, tak i mezery, kdy poruchou neteče žádný proud. To nastává v případech, kdy oblouk při průchodu proudu nulou vyhasl a nestačil se obnovit. Vysoké hodnoty proudu v poruchovém místě, které mohou dosahovat i 100 A a napětí oblouku v rozsahu kolem 60 V, dokáží vytvořit výkon oblouku v řádech jednotek kW. Vysoká intenzita výkonu může mít za následek rychlé zapálení izolačního materiálu a následné vypuknutí požáru. Aby k tomu nedošlo, je nutné poruchové místo rychle odpojit od napájení.

Zatímco pro chybové situace způsobené sériovým elektrickým obloukem doposud neexistovalo žádné zařízení, které by je umělo detekovat, tak poruchy způsobené paralelním obloukem je za určitých podmínek možno detekovat ochrannými zařízeními běžně používanými - pojistkami, jističi nebo proudovými chrániči. Podrobněji je tato problematika popsána v kapitole 2.



Obrázek 1.16: Typický průběh proudu a napětí při poruše způsobené paralelním obloukem, převzato z [7]

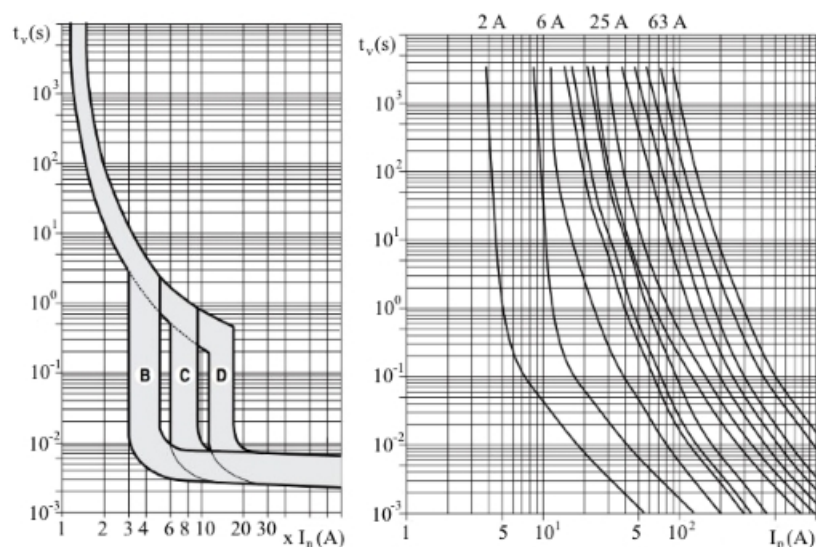
## Kapitola 2

# Možnosti ochrany před účinky elektrického oblouku

Včasnou detekcí poruchového elektrického oblouku v elektroinstalaci a rychlým odpojením obvodu s postiženým místem lze zabránit možnému rozšíření požáru. V kapitole 1 byly popsány příčiny vzniku poruchových elektrických oblouků vyskytujících se v síti nn a jejich základní druhy. Nastíněny zde byly také u jednotlivých případů možnosti jak tyto poruchy detekovat pomocí jisticích a ochranných přístrojů. Zde budou tyto možnosti shrnuty a blíže popsány. Důležitým způsobem ochrany před nebezpečím vzniklým elektrickým obloukem je kromě používání těchto přístrojů také prevence. Ta zahrnuje používání bezpečných certifikovaných spotřebičů, důsledné dodržování návodů výrobců, neprovádění neodborných zásahů v elektroinstalaci i ve spotřebičích (např. vyřazování jisticích prvků) a také odbornou údržbu (pravidelné revize včetně kontroly rizikových míst termokamerou) i laickou kontrolu elektroinstalace. Uživatel by měl kontrolovat, zda přívodní vodiče ke spotřebičům nebo prodlužovací přívody nejsou mechanicky poškozené, přiskřípnuté, schované pod kobercem nebo zatížené nábytkem a zda nejsou zásuvky zbytečně přetěžované např. velkým počtem tepelných spotřebičů připojených přes rozdvojky. Vhodné je také kontrolovat, zda se přívody a spotřebiče nezahřívají více, než je běžné nebo zda nejsou zahnědlé okraje zdírek elektrických zásuvek. Dalšími signály, že v elektroinstalaci není vše v pořádku je např. poblikávání světel nebo přerušovaný chod zařízení.

## 2.1 Ochrana pomocí jističů a pojistek

Jističe jsou elektrické přístroje určené pro samočinné vypínání nadproudů a zkratů. Obsahují kombinaci bimetalové nadproudové spouště určenou pro jištění malých přetížení a elektromagnetickou zkratovou spoušť. Tavné pojistky chrání elektrický obvod před případným nadproudem nebo zkratem tím, že v něm uměle vytvářejí nejslabší místo. Uvnitř keramického těla obsahují tenký tavný vodič tvarovaný do podoby pásku nebo tenkého drátu, který se v případě poruchy přeruší a obvod s poruchou odpojí. Vypínací charakteristika čas - proud jističů se dle výše uvedené kombinace dvou vypínacích čidel skládá ze dvou odlišných částí, tavná charakteristika čas - proud pojistek je pak tvořena z jednotlivých křivek pro různé jmenovité hodnoty (viz obr. 2.1). Mimo šedě vyznačenou oblast charakteristiky jističe nebo mimo křivky charakteristiky pojistky jsou místa, ve kterých nedojde k jejich vybavení či přetavení. Patří mezi ně i oblast vlevo od křivek, tedy oblast, kde jsou vybavovací proudy rovny nebo menší než jednonásobek jmenovitého proudu. Právě sériový poruchový elektrický oblouk je typický tím, že při jeho výskytu není jmenovitý proud obvodu překročen, jelikož je omezen připojenou zátěží (spotřebičem). Sériové poruchy tak není možné identifikovat pomocí jističů nebo pojistek, jejich charakteristiky leží pod charakteristikami těchto vypínacích zařízení. Naopak proud paralelních poruchových elektrických oblouků není impedancí spotřebičů omezen, je omezený pouze impedancí vedení a samotného poruchového místa. Proto bývá proud procházející touto poruchou větší než jmenovitý proud obvodu. Je-li impedance poruchové smyčky malá, překračují hodnoty proudu jmenovité hodnoty mnohonásobně. Pokud je impedance místa s vyskytující se paralelním obloukem velká, což bývá zejména v počátku jeho vzniku, proudy nedosahují trvale velkých hodnot a jsou pod vypínacími charakteristikami jisticích zařízení. Jističe nebo pojistky tak neumí paralelní poruchové oblouky bezpečně odstranit v okamžiku jejich vzniku. Detekovat je můžou až v případě většího rozšíření poruchy, kdy procházejí místem větší proudy nebo pokud paralelní oblouk přejde do zkratu, což už může být z hlediska rozšíření požáru pozdě. Jako bezpečná ochrana před poruchovými oblouky tedy nejsou jističe ani pojistky vhodné.



Obrázek 2.1: Ilustrační vypínací charakteristiky instalačních jističů a tavné charakteristiky válcových pojistek vel. 14 typu gG

## 2.2 Ochrana pomocí proudových chráničů

Proudové chrániče jsou založeny na funkci součtového transformátoru. V případě nerovností proudů přitékajících a odtékajících z primárního vinutí se začne indukovat proud úměrný tomuto rozdílu v sekundárním vinutí. Indukovaný proud uvede v činnost citlivé diferenciální relé, které aktivuje rozpínací mechanismus chrániče. Proudové chrániče se díky tomuto principu používají pro zvýšení ochrany osob před nebezpečným dotykem neživých částí elektrického zařízení. K tomuto účelu se obvykle používají chrániče s maximálním reziduálním proudem  $I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$ . Jelikož je proudový chránič schopen detekovat jakýkoliv únikový proud z pracovního vodiče jím procházejícího, je schopen detekovat i paralelní poruchový elektrický oblouk vzniklý mezi pracovním a ochranným vodičem v obvodu za ním zapojeném. Tyto únikové proudy, vznikající zejména v mikrotrhlkách mechanicky nebo tepelně poškozené izolace, se nazývají plazivé proudy. S tím souvisí i druhá oblast použití proudových chráničů a tou je ochrana budovy před požárem způsobeným právě těmito plazivými proudy, resp. následně vzniklými paralelními poruchovými oblouky. K tomuto účelu se instalují proudové chrániče s hodnotou reziduálního proudu maximálně do 300 mA. Tato hodnota je odvozena z výsledků mnoha měření, kterými bylo zjištěno, že pro zapálení obvyklých

hořlavých hmot (dřeva, slámy, sena apod.) postačuje průměrný ztrátový výkon o hodnotě 60 W, který odpovídá reziduálnímu proudu asi 260 mA [5]. V běžných instalacích s malými trvalými únikovými proudy je možno k výše popsaným účelům použít i citlivější chrániče, např. s  $I_{\Delta n} = 100$  mA. Dle normy ČSN 33 2130 ed. 3 je instalace takovýchto proudových chráničů povinná ve stavbách, které jsou zcela nebo i částečně zhotoveny z hořlavých materiálů (např. dřevostavby, půdní vestavby apod.). V těchto stavbách se tedy používají proudové chrániče jak pro doplňkovou ochranu osob před úrazem elektrickým proudem (chrániče s  $I_{\Delta n} = 30$  mA), tak i chrániče s  $I_{\Delta n}$  do 300 mA jako ochrana před vznikem požáru od elektroinstalace. Pro zvýšení ochrany před účinky plazivých proudů se také v rizikových elektroinstalacích doporučuje použití kabelů s kvalitnější izolací, popřípadě kabelů s uzemněným kovovým pláštěm, který uvedená rizika cíleně omezí.

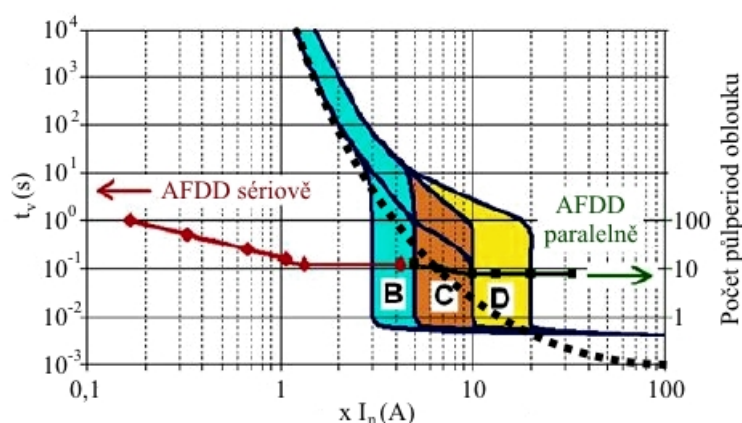
I přes výše uvedené výhody použití proudových chráničů jsou možnosti detekce poruchových elektrických oblouků pomocí nich výrazně omezeny. Proudový chránič není schopen identifikovat ani sériový oblouk, ale ani paralelní oblouk mezi pracovními vodiči. Pokud totiž oblouk hoří mezi fázovým a středním vodičem, proud procházející obloukem se vrací přes součtový transformátor a pro proudový chránič je tak vše v pořádku. Z hlediska použití chrániče ve stavbách pro ochranu před vznikem požáru je víceméně nutno spoléhat se na to, že porucha mezi dvěma vodiči s rozdílným napětím přeroste do poruchy mezi fázovým a ochranným vodičem.

## 2.3 Nové možnosti ochrany

Z důvodu výše uvedených omezených schopností běžně používaných jisticích a ochranných přístrojů identifikovat poruchový elektrický oblouk v síti, byl hledán způsob, jak vyplnit oblast, kde tato zařízení nereagují a jak vyvinout přístroj, který bude schopen identifikovat nebezpečí v podobě poruchového elektrického oblouku. Řešení bylo nalezeno před několika lety v USA, kde je výskyt požárů způsobených elektroinstalací obecně vyšší než v Evropě z důvodu existence napěťové hladiny 110 V a tedy i vyšších provozních proudů v elektroinstalacích. Jedná se o speciální přístroje pro detekci poruchového elektrického oblouku, v angličtině označované jako Arc Fault Detection Devices (AFDD), případně v USA jako

Arc Fault Circuit Interrupters (AFCI). Přístroje AFDD dokáží identifikovat všechny druhy poruchových oblouků, tedy jak paralelní, tak i sériové, a to nejen pouze v rozvodech elektroinstalace ale i v připojených spotřebičích. Pro přiblížení funkčních možností přístrojů AFDD je na obr. 2.2 zaznamenána jejich typická vypínací charakteristika ve srovnání s charakteristikou jističe a pojistky. Patrné je zejména vhodné doplnění charakteristiky v její levé části, kde jističe a pojistky nejsou schopny reagovat na nebezpečí způsobené sériovými poruchovými oblouky. Přístroje AFDD obsahují mikroprocesor, který analyzuje velikost a frekvenční spektrum proudu procházejícího do chráněného obvodu. Jsou-li splněny podmínky pro poruchový oblouk, dojde k rychlému odpojení obvodu, a tím včasnému zabránění vzniku a rozšíření požáru. Přístroje jsou naprogramovány tak, aby byly zároveň velmi citlivé na skutečné poruchové oblouky, ale zároveň dostatečně odolné proti provozním obloukům vznikajícím např. ve vysavačích, vrtačkách apod. Funkci přístrojů AFDD se podrobně věnuje kapitola 3. Dle normy ČSN 33 2000-4-42 ed. 2 Elektrické instalace nízkého napětí se použití AFDD považuje za účinné ale ne výhradní řešení ke snížení rizika požáru v koncových obvodech elektroinstalace. Jejich použití se doporučuje na začátku koncových obvodů v ložnicích, dětských pokojích a pro rozvody uvnitř hořlavých konstrukčních materiálů.

Ve vývoji jsou také přístroje pro detekci poruchových oblouků ve stejnosměrných rozvodech, které naleznou využití zejména ve fotovoltaických aplikacích, kde je riziko vzniku požárů velmi vysoké. Více o těchto typech přístrojů lze nalézt v [20].



Obrázek 2.2: Vypínací charakteristika přístroje AFDD ( $I_n = 16$  A) v porovnání s vypínací charakteristikou jističů a pojistky 16 A (čárkovaně), převzato z [7]



# Kapitola 3

## Přístroje AFDD

### 3.1 Přehled modelů přístrojů AFDD

Přístroje pro detekci poruchového oblouku se již několik let používají v USA a v Kanadě, na evropském trhu se jedná o relativní novinku a příliv nových výrobců do tohoto segmentu se očekává v blízké budoucnosti. Z toho důvodu je i počet výrobců a množství jejich výrobků mnohem větší v Americe než v Evropě. Ačkoliv jsou americké přístroje určeny pro napájecí napětí 110 V a jsou tak v našich podmínkách nepoužitelné, uvedeme pro ucelenost přehled některých tamních výrobců a jejich sortimentu.

Přístroje na americkém trhu jsou nazývány jako Arc Fault Circuit Interrupters (AFCI) a jsou koncipovány zejména jako jeden kombinovaný přístroj obsahující jak nadproudovou a zkratovou část jističe, tak část se součtovým transformátorem proudového chrániče a část s jednotkou pro detekci poruchového oblouku (tzv. Combination AFCI). Tento typ přístrojů je relativně nový i v USA, dříve zde byly používané tzv. Branch/Feeder AFCI, které byly schopny detekovat pouze paralelní poruchové oblouky (tedy oblouky charakteristické vyššími proudy od 75 A) a to jak mezi fázovým a ochranným, tak i mezi fázovým a středním vodičem. K dispozici jsou také detektory instalované přímo do koncové elektrické zásuvky, vhodné pro instalaci ve stávajících rozvodech a chránící pouze připojené spotřebiče. Výrobci AFCI jsou např. firmy Eaton, Siemens, Schneider Electric, General Electric (GE) nebo Leviton. Ukázka některých kombinovaných typů přístrojů AFCI je na obr. 3.1. Z výrobců mimo evropský trh

stojí také za zmínku čínská firma Herui ([www.afcimaster.com](http://www.afcimaster.com)), která nabízí širokou škálu přístrojů pro detekci elektrického oblouku i zařízení pro jejich testování.



Obrázek 3.1: Ukázka kombinovaných přístrojů AFCI amerických výrobců Schneider Electric, Siemens, General Electric a Eaton

Zatím jediným přístrojem pro detekci poruchového elektrického oblouku, který je reálně dostupný na evropském trhu a je určen do střídavé sítě s napětím 230 V, je výrobek firmy Siemens 5SM6 (viz obr. 3.2). V dalších kapitolách práce se bude hovořit zejména právě o něm. Byl navržen tak, aby odpovídal nové evropské normě IEC 62606 General Requirements for Arc Fault Detection Devices. Siemens 5SM6 je oproti americkým kombinovaným AFCI koncipován jako samostatná přídavná spoušť, podobná běžné napěťové nebo podpěťové vypínací spoušti. Přístroj samotný tedy nemá žádné zařízení k odpojení kontrolovaného elektrického obvodu a je nutné jej spárovat s jističem nebo proudovým chráničem, se kterým se poté funkčně doplňují. Aby spárování s různými přístroji bylo možné, je přístroj k dispozici ve dvou konstrukčních šířkách, užší umožňuje kombinaci s jednomodulovým dvoupólovým jističem, širší pak propojení s kombinovaným proudovým chráničem s nadproudovou ochranou nebo s dvoumodulovým dvoupólovým jističem. Uvedené jističe a chrániče je možné použít do jmenovitého proudu 16 A, s vyššími proudy přístroj 5SM6 neumí pracovat. Dále je také možno přístroj doplnit pomocným nebo signalizačním spínačem pro napojení na

nadřazený řídicí systém. Přístroj je určen k použití v koncových obvodech elektroinstalací v rodinných domech, bytech, kancelářských budovách, školách, domovech seniorů, nemocnicích, archivech, galeriích apod. Je možno jej použít jak v nových elektroinstalacích, tak ve stávajících, ve kterých je riziko vzniku poruchových elektrických oblouků vyšší. Podmínkou je ale přítomnost sítě TN-S, jelikož spárovaný jistící přístroj odpíná i střední vodič. V případě sítě TN-C by se tak odpínal zároveň i ochranný vodič, což je nežádoucí. Instalace do koncových obvodů se doporučuje z důvodu snadnějšího odhalení příčiny vybavování AFDD. Pokud by přístroj chránil více okruhů najednou, bylo by odstraňování poruch složitější a zároveň by tím mohlo být zvýšené i nežádoucí rušení produkované sítí, což by mohlo ovlivnit správnou činnost přístrojů.

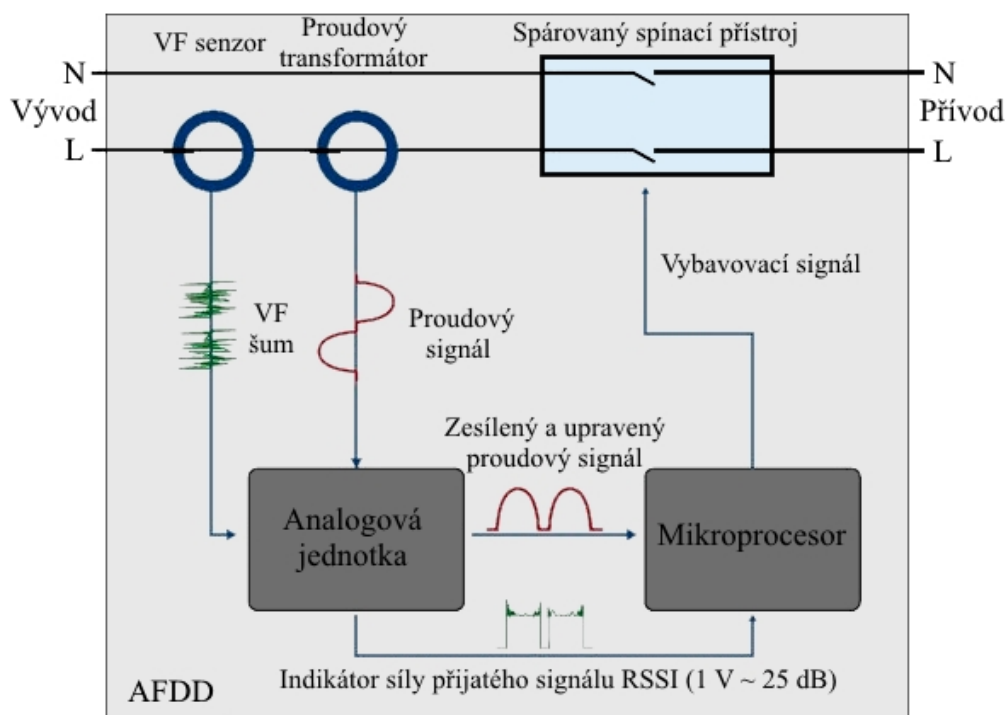
Na německé verzi webových stránek českého výrobce OEZ ([www.oezdeutschland.de](http://www.oezdeutschland.de)) lze v nabídce najít přístroj s označením AFD-16-1N. Dle jeho technické specifikace a s přihlédnutím k faktu, že firma OEZ je členem skupiny Siemens, je zřejmé, že se jedná o stejný přístroj jako Siemens 5SM6, pouze s logem OEZ. K dohledání je jeho návod k použití v českém jazyce, kde je přístroj označován jako „spoušť obloukové ochrany“ a prohlášení o shodě s ČSN EN 62606 ze září 2014 provedené Elektrotechnickým zkušebním ústavem v Praze. Uvedení přístroje na český trh bude tedy pravděpodobně v brzké době spolu s vylepšenou řadou jistících přístrojů OEZ Minia, které vycházejí z přístrojů firmy Siemens.



Obrázek 3.2: Přístroj AFDD firmy Siemens, model 5SM6011-1

## 3.2 Princip činnosti přístrojů AFDD

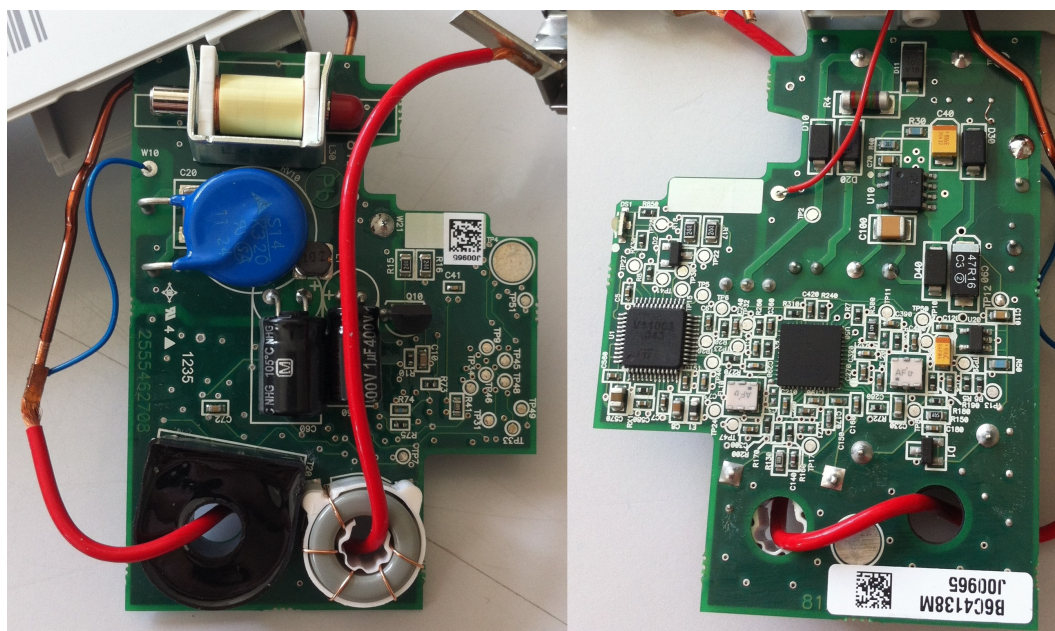
Princip činnosti bude popsán na přístroji Siemens 5SM6, jehož základní blokový diagram je zobrazen na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Blokový diagram přístroje Siemens 5SM6, převzato z [7]

Oba pracovní vodiče, fáze a nulový vodič, jsou vedeny skrz spínací mechanismus (v případě 5SM6 je to spárovaný jistič nebo chránič) a procházejí jednotkou AFDD. Fázový vodič je veden skrz dva senzory, tím prvním je proudový transformátor, sloužící pro detekci nízkých síťových frekvencí a tím druhým je senzor pro detekci vysokofrekvenčních signálů. Vysokofrekvenční sonda vyhodnocuje signály v rozsahu od 22 do 24 MHz. Výstupy z těchto senzorů jsou vedené do jednotky, která upravuje analogové signály pro zpracování mikroprocesorem. Zde je spočtena hodnota RSSI (Received Signal Strength Indication - indikace síly přijatého signálu), která reprezentuje výkon hořícího oblouku při definované frekvenci a šířce pásma. Když mikroprocesor vyhodnotí, že ve sledovaném obvodu vznikl chybový elektrický oblouk, vyšle signál vypínací cívce, která skrz mechanické spojení vybaví spárovaný vypínací

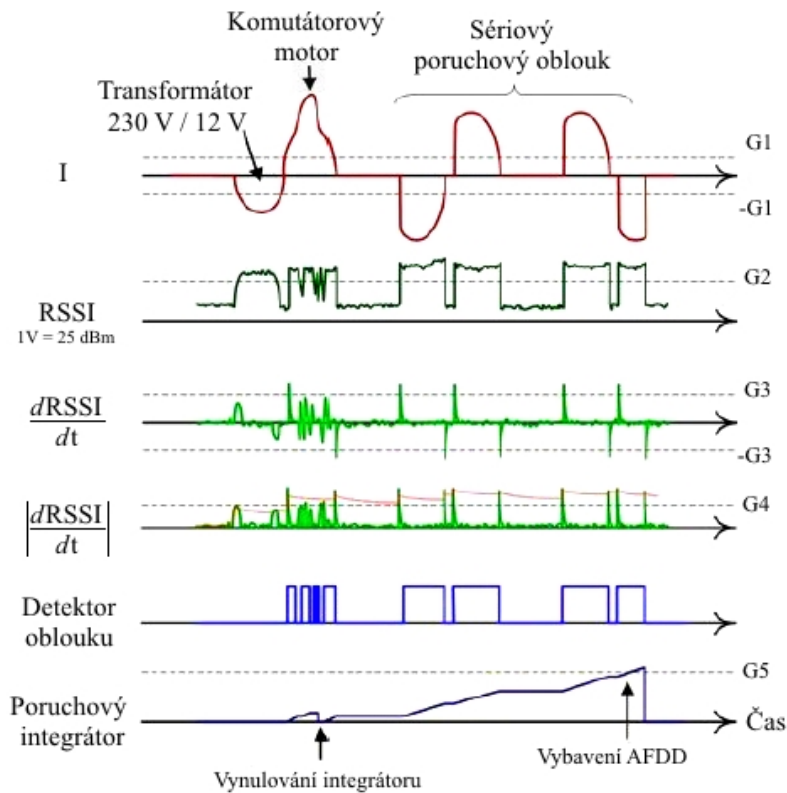
přístroj. Tím se odpojí napájení poškozeného obvodu i napájení samotného přístroje. Po opětovném obnovení napájení přístroj signalizuje pomocí LED diody příčinu jeho vybavení. Přehled operačních stavů LED indikátoru přístroje 5SM6 je v příloze A na str. P1. Sériové a paralelní poruchy mají rozdílné charakteristiky a jsou proto analyzovány, jak bude dále uvedeno, různými způsoby. Algoritmy pro detekci sériových obrouků zaujímají zhruba 80 % výpočetního výkonu mikroprocesoru, zbývajících 20 % je vyhrazeno pro detekci paralelních obrouků. Není to proto, že by pro detekci paralelního obrouku bylo třeba vynaložit menší úsilí, důvod je spíše v tom, že některé algoritmy, určené pro detekci sériového obrouku, je možno použít i pro detekci paralelního.



Obrázek 3.4: Pohled do vnitřku přístroje Siemens 5SM6 ze strany měřících transformátorů a ze strany mikroprocesoru

### 3.2.1 Detekce sériového poruchového obrouku

Princip detekce sériového poruchového obrouku je vysvětlen na obr. 3.5. Detekce je založena na vyhodnocování signálu RSSI na strmých hranách. Signál RSSI je zderivován a určena jeho absolutní hodnota. Tato zderivovaná absolutní hodnota RSSI je považována



Obrázek 3.5: Princip detekce sériového poruchového oblouku, převzato z [7]

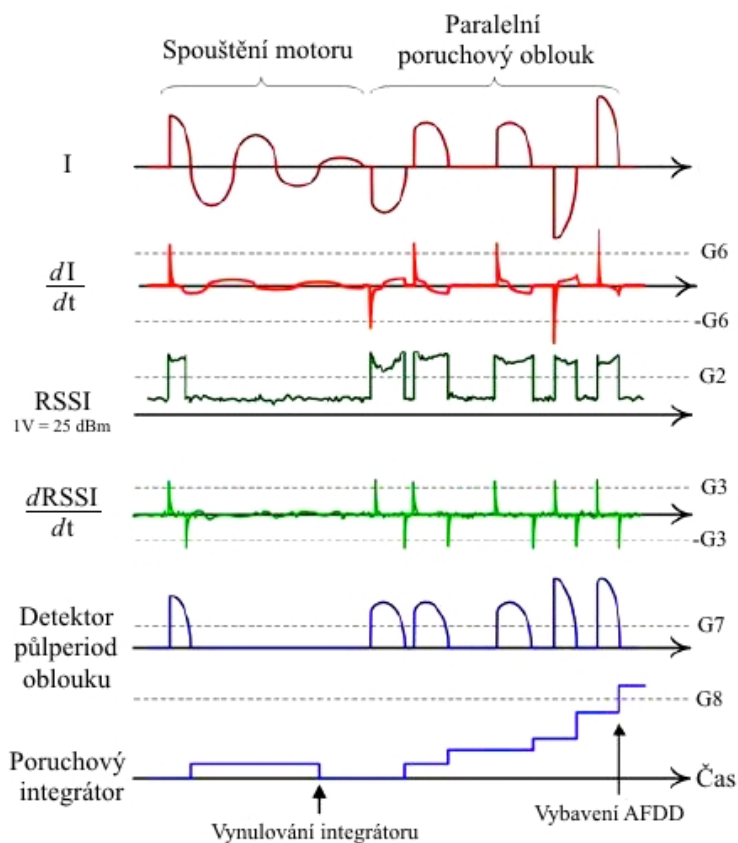
za referenční signál. Aby mikroprocesor vyhodnotil signál jako sériový oblouk a dal příkaz integrátoru k navýšení hodnoty, musí být splněny následující podmínky:

- Signál RSSI musí dosahovat alespoň prahové hodnoty G2
- Referenční signál musí být vyšší než limitní hodnota G4

Jsou-li tyto podmínky splněny, obloukový detektor zaznamená sériový oblouk a chybový integrátor se inkrementuje. Dosáhne-li chybový integrátor k hodnotě G5, vyšle mikroprocesor příkaz vypínací spoušti. Aby nedocházelo k nechtěnému vybavení, musí přístroj rozeznat rozdíly mezi skutečným poruchovým obloukem a mezi signály pocházejícími ze zátěží jako jsou např. komutátorové motorčky obsažené ve vysavačích, fénech nebo vrtačkách. I ty totiž za běžného provozu produkují velké množství vysokofrekvenčního šumu. Toho je dosaženo okamžitým vynulováním chybového integrátoru v případě, že je zaznamenána nějaká událost s průběhy pro oblouk netypickými. Ta je charakteristická například přerušovaným průběhem křivky indikátoru síly přijatého signálu.

### 3.2.2 Detekce paralelního poruchového oblouku

Postup zpracování signálů při detekci paralelního poruchového oblouku je zachycen na obr. 3.6.



Obrázek 3.6: Princip detekce paralelního poruchového oblouku, převzato z [7]

Rozdíl oproti postupu při detekci sériového oblouku je zejména v tom, že při detekci paralelního se nepočítá pouze derivace z indikátoru síly přijatého signálu ale i derivace proudu. Funkce pro detekci paralelního oblouku není aktivní, dokud hodnota derivace proudu nepřekročí hranici G6. Pokud dále platí, že signál RSSI je větší než hodnota G2, tak je proud vyhodnocen jako pocházející od paralelního oblouku a chybový integrátor je inkrementován o hodnotu úměrnou velikosti proudové půlplny. Neobjeví-li se v určitém čase v signálu další proudová půlplna, je chybový integrátor dekrementován. Pokud je v kratším časovém pásmu identifikován dostatečný počet obloukových půlpln, chybový integrátor dosáhne prahové hranice G8 a mikroprocesor aktivuje vypínací cívku.

### 3.2.3 Prevence před nechtěným vybavením

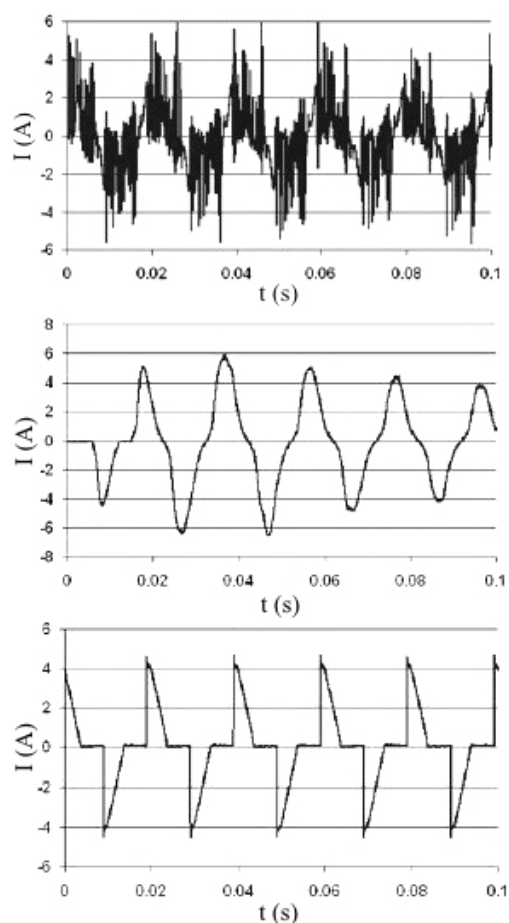
Stejně tak, jako je důležité, aby přístroj správně detekoval reálné nebezpečí v podobě sériového nebo paralelního poruchového oblouku, je důležité i to, aby přístroj nevybavoval nechtěně v případech, kdy se o reálné nebezpečí nejedná. To znamená, že musí být přístroj navržen tak, aby spolehlivě rozeznal rozdíly mezi chybami způsobenými hořícím chybovým obloukem, při kterých musí vybavit v definovaném čase, a mezi provozními oblouky způsobenými provozem běžných elektrických spotřebičů, při kterých vybavit nesmí. Jedná se o spotřebiče nebo jevy, jejichž proudové průběhy obsahují vysokofrekvenční složky, podobné více či méně poruchovému oblouku. Patří mezi ně např.:

- Spotřebiče s univerzálním komutátorovým motorkem - vrtačky, vysavače, mixéry apod.
- Spínané zdroje
- Stmívače
- Proudové vzniklé při spínání zářivek
- Oblouky vzniklé při spínání a rozepínání vypínačů
- Oblouky vzniklé mezi kontakty relé a stykačů
- Oblouky mezi kontakty konektorů či vidlic a zásuvek

Průběhy proudů některých těchto spotřebičů - spínaného zdroje, vrtačky a stmívače, jsou na obr. 3.7. Přístroj AFDD musí také umět spolehlivě identifikovat poruchový oblouk vzniklý v obvodu, ve kterém je zapojený některý z výše uvedených rušivých spotřebičů, nejenom tedy v obvodech, kde vzniká poruchový oblouk paralelně nebo sériově k odporové zátěži. Důležité je také zmínit, že přístroje AFDD jsou určeny převážně pro použití v domácnosti, ne tedy pro průmyslové prostředí, kde se nepříznivé rušení vyskytuje v mnohem větší míře.

Rozhodování o vybavení nebo nevybavení přístroje AFDD závisí na několika faktorech. Dle [7] jsou to vysokofrekvenční stabilita a výkon oblouku, hodnota proudu, délka hoření oblouku a jeho synchronizace se sítí, viz obr. 3.8. Pokud všechny tyto parametry dosahují hodnot ležících v oblasti vyznačené na obr. 3.8 červeně, přístroj událost vyhodnotí jako

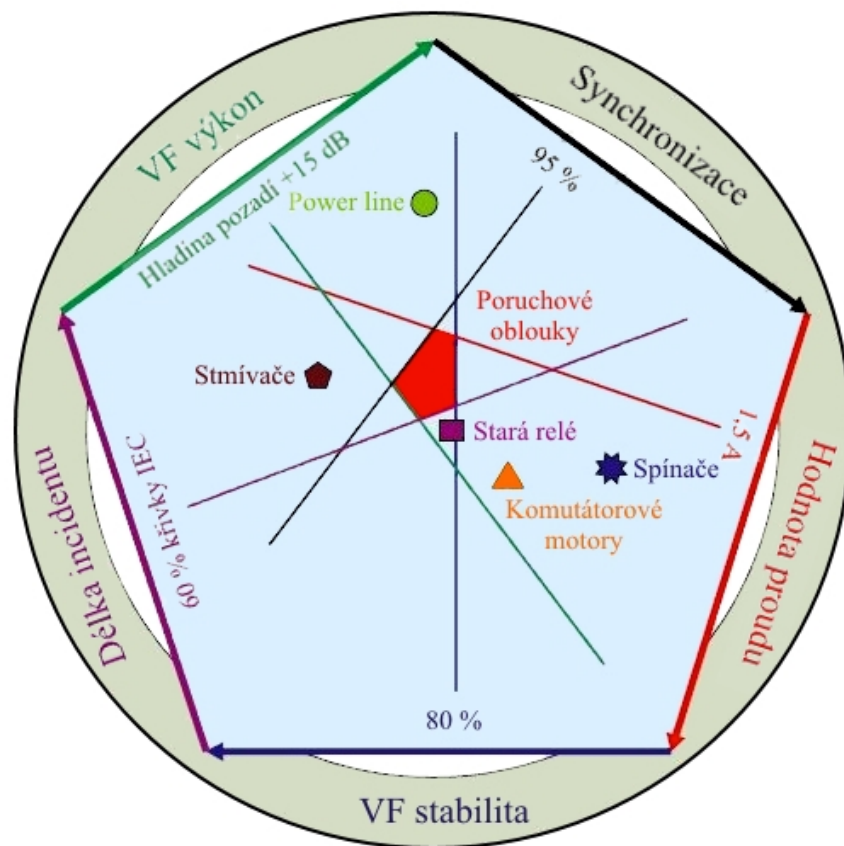




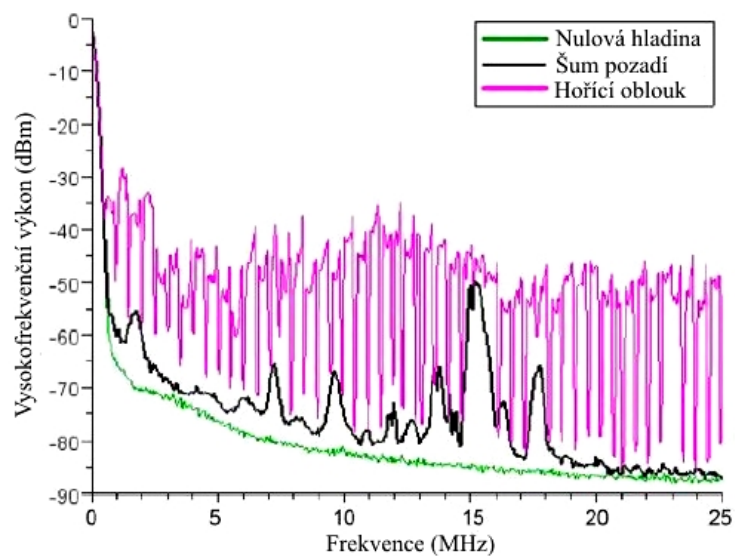
Obrázek 3.7: Průběhy proudu spínaného zdroje, vrtačky a stmívače, převzato z [7]

způsobenou poruchovým obloukem a vybaví. Pro ještě větší odolnost proti nechtěnému vybavení je nutno brát v potaz také vysokofrekvenční šum na pozadí, který produkuje samotná elektroinstalace. Z obr. 3.9 převzatého z [7] je zřejmé, že tento šum je nejvyšší mezi frekvencemi zhruba od 14 do 18 MHz<sup>1</sup>. Naopak při vyšších frekvencích nad 20 MHz šumu na pozadí ubývá a je zde tak více patrný rozdíl mezi úrovněmi šumu a oblouku. Proto také přístroje AFDD vyhodnocují frekvence v rozsahu mezi 22 a 24 MHz. Je-li základní šum na pozadí příliš vysoký i v těchto frekvencích, provoz přístroje může být omezen. Některé přístroje tuto skutečnost umějí signalizovat pomocí LED diody (více v příloze A na str. P1).

<sup>1</sup>Při měření realizovaném ve školní laboratoři nebyla zvýšená hodnota šumu mezi těmito frekvencemi zjištěna. Více o provedených měřeních je možno nalézt v kapitole 5.



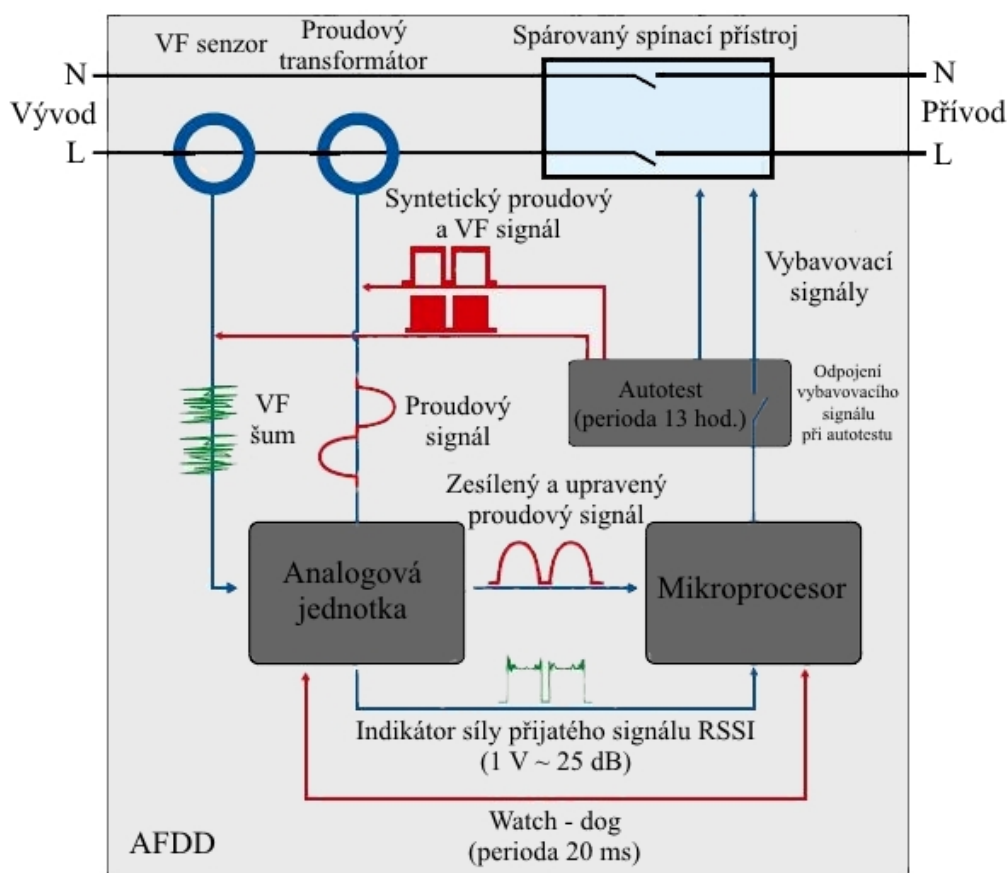
Obrázek 3.8: Faktory rozhodující o vybavení AFDD, převzato z [7]



Obrázek 3.9: Vysokofrekvenční šum oblouku a na pozadí, převzato z [7]

### 3.2.4 Další funkce přístrojů

Mezi další užitečnou vlastnost přístrojů AFDD patří interní autotest jejich správné funkce. Není tak nutné pravidelné ověřování jejich funkce uživatelem pomocí testovacího tlačítka tak, jak je tomu u běžných proudových chráničů. Funkční diagram autotestu přístroje Siemens 5SM6 je na obr. 3.10.



Obrázek 3.10: Princip autotestu přístroje Siemens 5SM6, převzato z [7]

Test se automaticky iniciuje každých 13 hodin a je kontrolován pomocí externího watch-dogu. Software v mikroprocesoru vygeneruje syntetický proudový a vysokofrekvenční signál, které jsou obdobné jako signály pocházející od závady způsobené sériovým nebo paralelním elektrickým obloukem. Tyto signály jsou přivedeny do obvodu za snímací senzory a jsou stejně jako reálné signály vyhodnoceny analogovou jednotkou a mikroprocesorem. Po dobu

autotestu se na dobu několika ms odpojí přívodní signál do vypínací spouště, aby nedošlo k nechtěnému vybavení přístroje. Po úspěšném testu se vše uvede do běžného režimu. Pokud se v reálném hlídaném obvodu v době, kdy má proběhnout autotest, objevují náznaky možné poruchy způsobené obloukem nebo pokud je proud procházející přístrojem větší než je průměrný, autotest se odloží. Pokud přístroj zjistí závadu ve své analogové elektronice nebo v detekčních algoritmech, vybaví a po znovuobnovení napájení signalizuje tuto skutečnost pomocí LED diody.

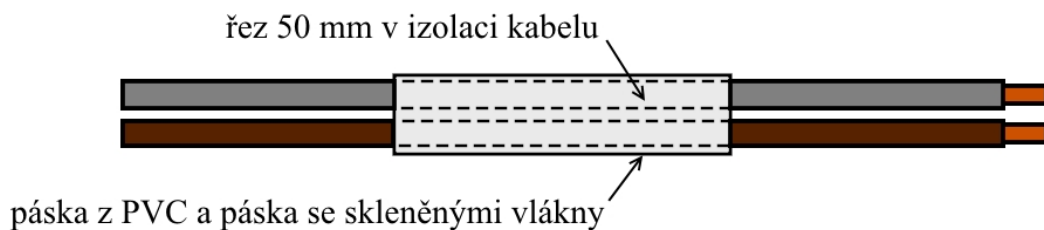
Další zajímavou funkcí, kterou přístroj Siemens 5SM6 chrání jak své interní obvody, tak i obvody zapojené v napájecí síti za ním, je jemná přepěťová ochrana. Slouží pro omezení škod způsobených přepětím např. při přerušení středního vodiče v třífázové instalaci. Pokud napětí v síti mezi fázovým a středním vodičem překročí hodnotu 275 V, přístroj AFDD vybaví spárovaný jistič nebo chránič a odpojí tak napájení. Po obnovení napájení je tato porucha opět signalizována LED diodou (více o signalizačních stavech AFDD v příloze A na str. P1).

### 3.3 Ověření správné funkce přístrojů AFDD

Základní požadavky na mechanické a elektrické vlastnosti přístrojů pro detekci poruchového elektrického oblouku vycházejí původně z americké normy UL 1699 - Arc Fault Circuit Interrupters [23]. Testovací metody z této normy byly upraveny pro evropské podmínky a napájecí napětí 230 V a jsou specifikovány v normě ČSN EN 62606 Obecné požadavky pro obloukové ochrany z července 2014 [24]. Kromě jiného je v této normě popsán obecný postup pro ověření správné činnosti přístrojů při výskytu sériového a paralelního oblouku v obvodu.

Základem pro testování je vzorek ohebného PVC kabelu připravený ze dvou vodičů o průřezu  $1,5 \text{ mm}^2$  a délce 20 cm, které mají uprostřed 5 cm proříznuté izolace. Vhodné jsou např. kabely typu AWG16, SPT2 nebo H05W-F. Tyto dva vodiče jsou přiloženy k sobě částmi s odstraněnou izolací a slepeny dvěma vrstvami elektrikářské izolační pásky také z PVC a dále překryty dvěma vrstvami pásky se skleněnými vlákny, viz obr. 3.11. Takto připravený vzorek kabelu se dle normy [24] dále exponuje připojením k napájecímu zdroji

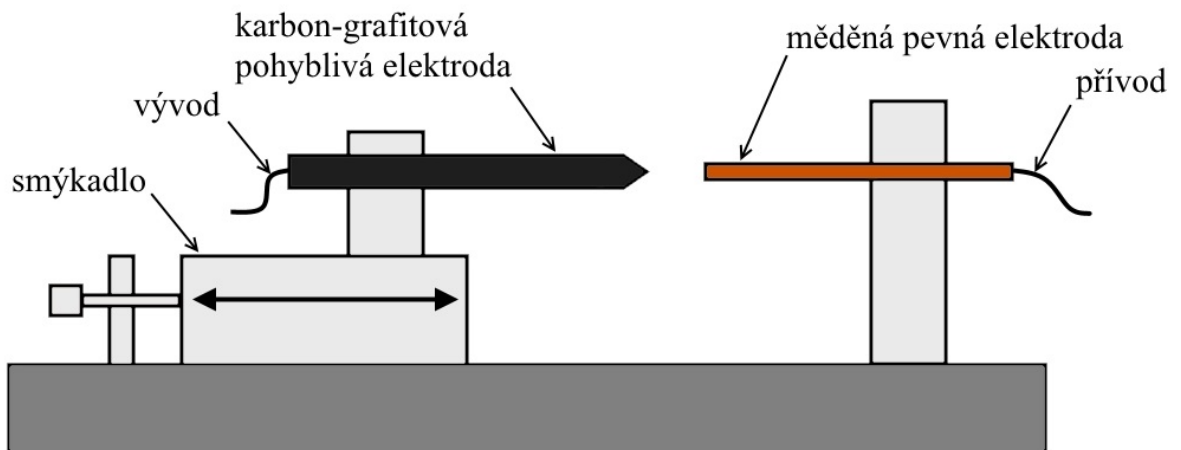
se zkratovým proudem 30 mA nebo 300 mA a s napětím o hodnotě 7 kV (resp. 2 kV pro 300mA zdroj) po dobu 10, resp. 60 s. Tento krok má za následek karbonizaci izolace, která je nutná pro vznik stabilního oblouku při síťovém napájecím napětí. Správná expozice kabelu se ověří tak, že se do obvodu se vzorkem kabelu připojí 100W žárovka, která, pokud je vše v pořádku, začne při zapojení na napájecí napětí 230 V žhnout. Rychlá karbonizace izolace je považována za simulaci pomalého karbonizačního procesu, který může v reálných podmínkách v poškozeném místě vodiče vznikat i několik let (případy vzniku sériového nebo paralelního poruchového oblouku působením nízkého napětí po dlouhou dobu jsou podrobněji popsány také v [9] a [11]). Metoda rychlé karbonizace je jednoduchá na realizaci a umožňuje vznik velmi stabilního oblouku při nízkém napájecím napětí.



Obrázek 3.11: Příprava vzorku kabelu pro testování AFDD

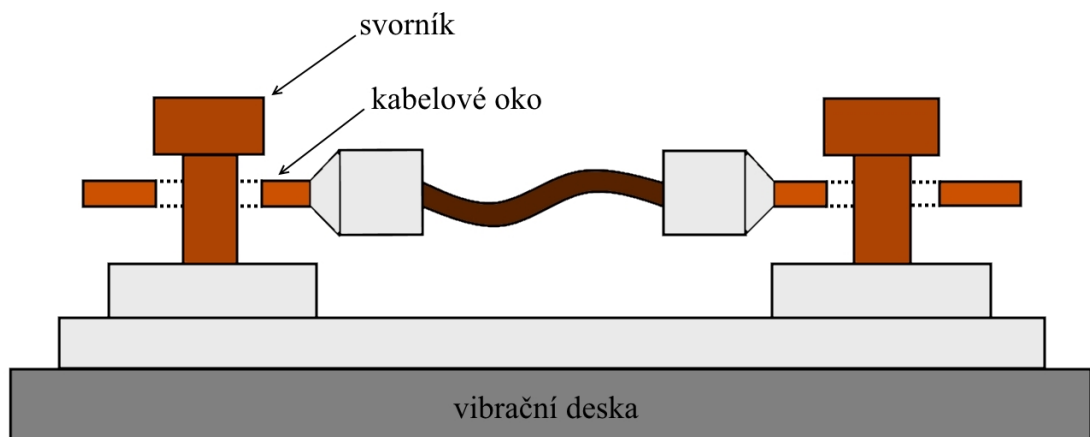
Jako alternativa ke vzorku kabelu upraveného dle postupu uvedeného výše slouží přípravek pro tvorbu oblouku (dle normy nazývaný generátor oblouku) sestavený dle obr. 3.12. Ten se skládá ze dvou elektrod, jedné vyrobené z karbon-grafitu (dle normy [24] o průměru 6 mm) a druhé z mědi, přičemž první z nich je možné pohybovat ve vodorovném směru. Prochází-li elektrodami elektrický proud, lze mezi nimi jejich postupným oddalováním vytvořit oblouk.

Norma [24] dává na výběr, jaké z dvou výše uvedených metod se při testování použije. Použije-li se přípravek pro tvorbu oblouku (generátor), je čas za který musí vybavit AFDD 2,5-krát delší než při použití karbonizovaného kabelu. Jak norma [24] uvádí, důvodem je, že energie oblouku během hoření v kabelu s karbonizovanou dráhou je v rozsahu 2,5 násobku energie oblouku vytvořené generátorem sestrojeném dle obr. 3.12.

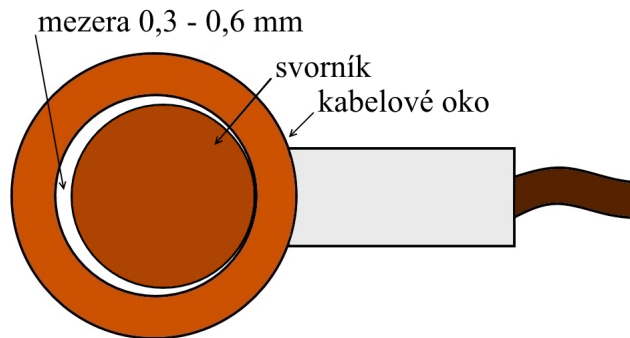


Obrázek 3.12: Generátor elektrického oblouku pro testování AFDD

V dodatku normy je uvedena také třetí možnost testování reakce AFDD na sériový poruchový oblouk a to pomocí vibrační desky, na které jsou upevněny dva svorníky volně přidržíjící kabelová oka spojená vodičem, viz obr. 3.13. Mezera mezi svorníkem a okem dle obr. 3.14 musí být 0,3 - 0,6 mm. Při rozvibrování desky s frekvencí mezi 30 a 60 Hz se pak kabelová oka volně pohybují a mezi nimi a svorníky vzniká při průchodu elektrického proudu oblouk simulující poruchy způsobené nedotaženými svorkami mezi vodiči a svorkami ve svorkovnicích.



Obrázek 3.13: Testování AFDD vibrační deskou s volnými svorkami



Obrázek 3.14: Detail kabelového oka při testování AFDD vibrační deskou

### 3.3.1 Ověření reakce na sériový oblouk

Při zkouškách reakce přístroje AFDD na sériový oblouk se do série s odporovou zátěží zapojí karbonizovaný vzorek kabelu nebo generátor oblouku a přístroj se připojí k běžnému napájecímu napětí. Zkušební obvod musí mít zanedbatelnou indukčnost. Dle normy [24] se testují varianty, když se v zapojeném obvodu náhle objeví sériový oblouk (náhlé vypnutí bypassu překlenujícího generátor oblouku nebo karbonizovaný vzorek), když se připojí zátěž se sériovým obloukem (náhlé zařazení generátoru oblouku nebo karbonizovaného vzorku kabelu do obvodu, kterým předtím neprocházela proud, napájení AFDD je ale zapojeno) a když se AFDD zapne do obvodu se sériovým obloukem (náhlé zařazení generátoru oblouku nebo karbonizovaného vzorku kabelu do obvodu zapnutím spínače před AFDD, napájení AFDD se tedy zapojí současně se zapnutím napájení poruchového obvodu). Časy vybavení AFDD nesmí být delší než je uvedeno v tabulce 3.1, pokud je k testování použit generátor oblouku, mohou být časy vybavení 2,5-krát delší. Přístroj se testuje od nejnižší hodnoty proudu uvedené v tabulce až po jeho jmenovitý proud. Proud se nastavuje v obvodu bez přítomnosti oblouku při jmenovitém napětí sníženém o 50 V (uvažuje se napětí oblouku při jeho přítomnosti). Hodnoty času vybavení mezi hodnotami proudů určenými tabulkou se určí lineární interpolací mezi hodnotami celkové doby vypínání nad a pod skutečným zkušebním proudem.

Efektivní hodnota zkušební proud (A)	2,5	5	10	16	32	63
Max. doba vybavení (s)	1	0,5	0,25	0,15	0,12	0,12

Tabulka 3.1: Mezní hodnoty vybavení AFDD pro poruchy způsobené sériovým obloukem a pro poruchy izolace fáze proti zemi pro nízké proudy

### 3.3.2 Ověření reakce na paralelní oblouk

V případě reakce přístroje AFDD na paralelní oblouk se neuvádějí maximální časy vybavení, ale počet půlperiod hoření oblouku při jmenovitém kmitočtu. Důvodem je sporadický výskyt a nestabilní chování paralelního poruchového oblouku zároveň při vysokých proudech. První varianta měření se provádí při proudech omezených na 75 a 100 A s karbonizovaným vzorkem kabelu. Proud v obvodu se nastavuje před hořením oblouku. AFDD musí odstranit poruchový oblouk, jestliže k počtu půlperiod hoření oblouku uvedeném v tabulce 3.2 dojde během 0,5 s (uvažuje se, že doba 0,5 s začíná s první půlperiodou hoření oblouku). Dle normy [24] je půlperioda hoření oblouku považována za zahrnující všechny proudové dráhy vyskytující se v době 10 ms pro přístroje pracující na 50 Hz. Pokud se ověřuje funkčnost přístroje AFDD na poruchový oblouk fáze proti zemi, musí AFDD vybavit při nižších proudech v časech určených tabulkou 3.1 a při vyšších proudech do počtu půlperiod určených tabulkou 3.2. Druhá varianta měření se nazývá zkouška řezání kabelu. Místo karbonizovaného vzorku kabelu se zde použije speciální zkušební přípravek s ocelovou čepelí, která zcela prořízne izolaci dvou do obvodu připojených vodičů, s jedním z nich musí mít pevný kontakt a s druhým bodový. AFDD musí opět vybavit jestliže k počtu půlperiod hoření oblouku dle tab. 3.2 dojde během 0,5 s.

Efektivní hodnota zkušební proud (A)	75	100	150	200	300	500
Počet půlperiod při jmenovitém kmitočtu	12	10	8	8	8	8

Tabulka 3.2: Mezní hodnoty vybavení AFDD pro poruchy způsobené paralelním obloukem a pro poruchy izolace fáze proti zemi pro vysoké proudy



### 3.3.3 Maskovací zkoušky

Zkouška maskovacího rušení se provádí z důvodu otestování přístroje AFDD na schopnost identifikovat poruchový elektrický oblouk v obvodě, ve kterém se nachází zátěž produkující vysokofrekvenční rušení, které by správnou funkci přístroje mohlo ovlivnit. AFDD musí dle [24] vybavit v mezních hodnotách stanovených v tabulkách 3.1 a 3.2 i v případě, že je jako zátěž v obvodě se zkušebním přípravkem pro simulaci oblouku (generátorem oblouku nebo karbonizovaným vzorkem vodiče) připojen jeden z těchto spotřebičů:

- Vysavač s univerzálním komutátorovým motorem, 230 V, 5-7 A
- Zdroj s elektronickým spínáním, 230 V, min. 2,5 A
- Motor s rozběhovým kondenzátorem se špičkovým zapínacím proudem  $65\text{ A} \pm 10\%$ , 230 V, 2,5 kW
- Elektronický stmívač žárovek tyristorového typu s filtrační cívkou regulující wolframové žárovky 600 W
- Dvě zářivky 40 W s přídatnou odporovou zátěží 5 A
- Halogenové žárovky 12 V napájené elektronickým transformátorem 300 W + přídatná odporová zátěž 5 A
- Elektrický ruční nástroj (např. vrtačka), min. 600 W

Se stejnými spotřebiči se také provádí zkouška s rušivými zátěžemi, kdy ve zkušebním obvodě není vyvoláván poruchový oblouk. V těchto případech se testuje odolnost AFDD vůči rušení a přístroj nesmí v žádném případě vybavit.

# Kapitola 4

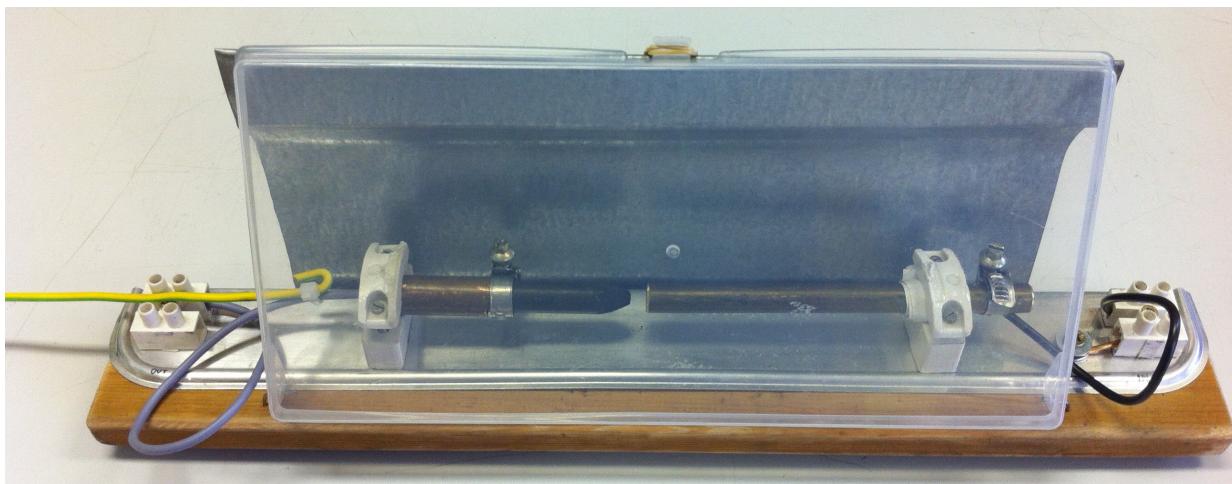
## Laboratorní pracoviště pro přístroje AFDD

Pro simulaci elektrického oblouku v síti nn, jeho bližší analýzu a pro ověření funkčních možností přístrojů pro detekci elektrického oblouku (AFDD) bylo navrženo a sestaveno experimentální pracoviště v Laboratoři elektrických přístrojů na Katedře elektrických pohonů a trakce FEL ČVUT v Praze. Pracoviště bude kromě této diplomové práce sloužit i při výuce studentům magisterského studia. Při návrhu pracoviště byly brány v úvahu požadavky uvedené v normě ČSN EN 62606 Obecné požadavky pro obloukové ochrany z července 2014 a měřicí přípravky byly sestaveny tak, aby alespoň částečně odpovídaly normovaným měřicím postupům.

### 4.1 Elektrodotový generátor elektrického oblouku

Elektrodotový generátor elektrického oblouku byl sestaven dle obrázku 3.12 na str. 37. Jedna elektroda je pevně připevněná v keramickém izolátoru a může být buď uhlíková nebo mosazná (lze je měnit). Druhá elektroda je vždy uhlíková a je možné s ní pohybovat ve vodorovném směru pomocí manipulačního táhla. Elektrody jsou zakryty průhledným krytem, který zamezuje nebezpečnému dotyku s živými částmi. Na tento kryt je poté možné umístit svářecí sklíčko pro ochranu zraku před poškozením UV zářením, případně jiný kryt pro ochranu zraku. Vývody obou elektrod jsou přivedeny na svorkovnice. Odpor uhlíkové

elektrody (od špičky elektrody ke svorce) je přibližně  $1 \Omega$  a celého jiskřiště (mezi svorkami)  $1,2 \Omega$ . Provedení realizovaného generátoru je patrné z obr. 4.1 a 4.2.



Obrázek 4.1: Generátor elektrického oblouku realizovaný pro laboratorní pracoviště AFDD



Obrázek 4.2: Detail jiskřiště generátoru elektrického oblouku realizovaného pro laboratorní pracoviště AFDD

## 4.2 Lineární jiskřiště

Pro přiblížení situace, kdy vznikne elektrický oblouk přímo v kabelu mezi vodiči s poškozenou izolací a zároveň pro přiblížení se testovací metodě s karbonizovaným vzorkem kabelu dle normy [24], popsané v sekci 3.3, byl sestaven přípravek pro simulaci elektrického oblouku v kabelu nazvaný jako lineární jiskřiště. Základem jiskřiště jsou dva měděné vodiče z kabelu CYKY-J 3 x 1,5 mm<sup>2</sup> s odstraněnou izolací v délce 5 cm a připevněné na dřevěné podložce těsně vedle sebe. Iniciace elektrického oblouku mezi vodiči je docílena buď uhlíkem v podobě prášku rozsypaného mezi vodiči nebo pomocí běžné tužky s uhlíkovou tuhou přiložené mezi vodiče. Později pak vznikají také sporadické elektrické oblouky samovolně vlivem uhlíkové cesty vzniklé přímo na dřevěné podložce předchozím tepelným působením oblouku. Realizovaný přípravek s již zkarbonizovanou cestou mezi vodiči je na obr. 4.3.

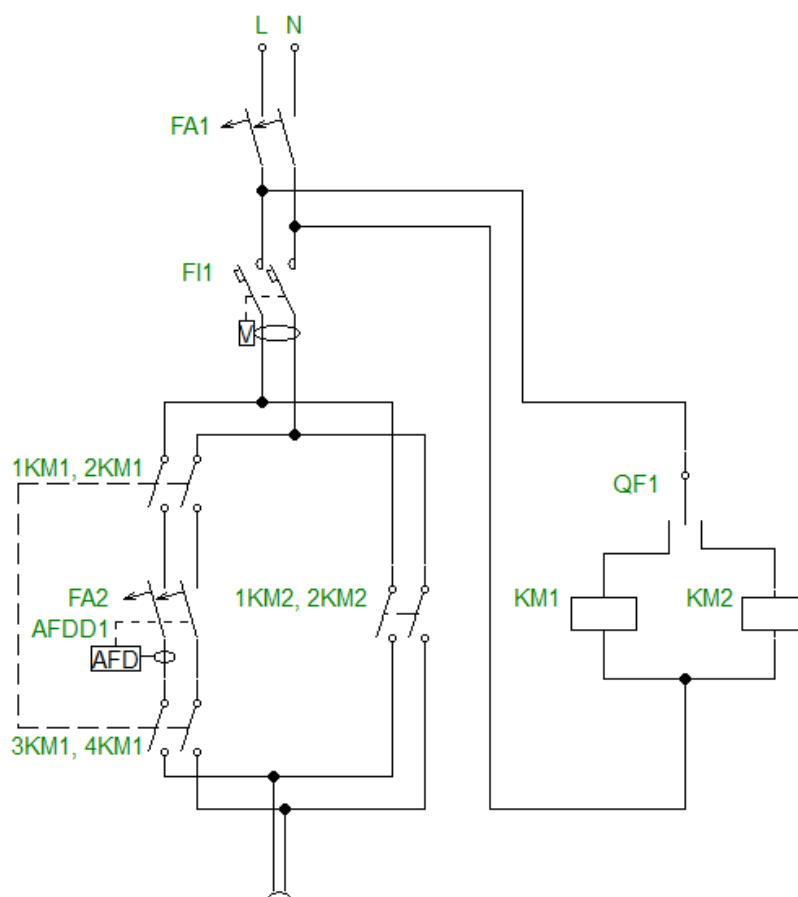


Obrázek 4.3: Realizované lineární jiskřiště

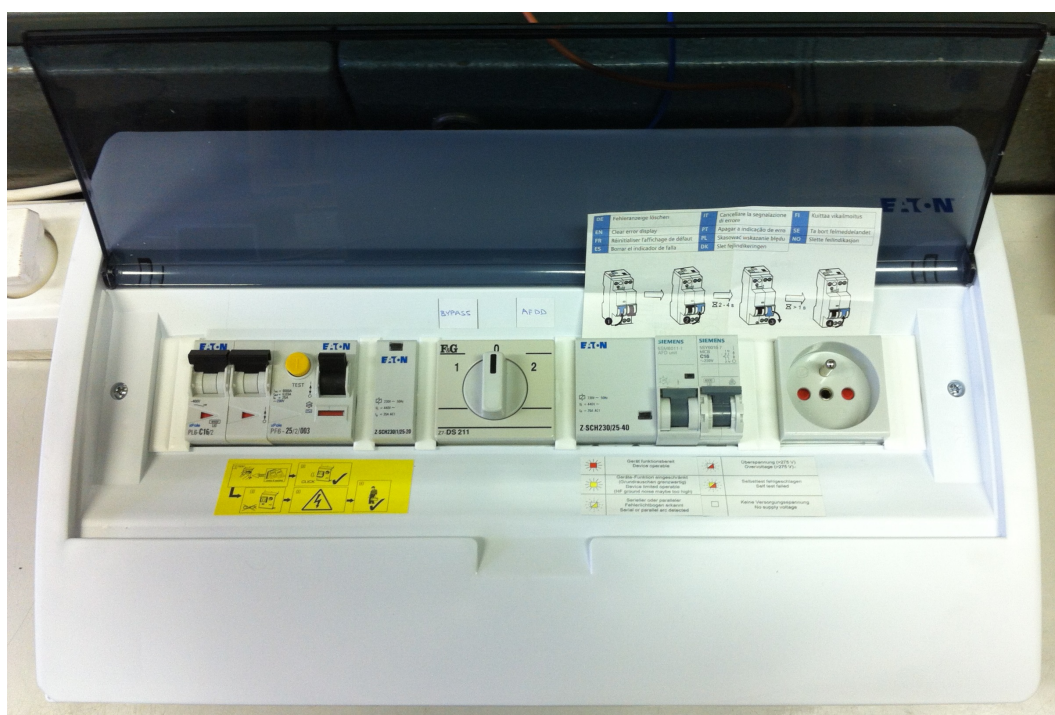
## 4.3 Rozvaděč s AFDD

Pro měřicí pracoviště byl navržen malý přenosný rozvaděč, který umožní jak měření přímo na pracovišti, tak i snadné přemístění do jiné laboratoře. V rozvaděči je instalován hlavní dvoupólový jistič (pro bezpečné odpojení fáze v případě zaměnění napájecích vodičů), proudový chránič pro zvýšení bezpečnosti obsluhy, přístroj AFDD kombinovaný s dvoupólovým

jističem, přepínač a dva stykače, umožňující zařazení nebo vyřazení AFDD z obvodu. V případě testování odvodu, kdy by bylo nežádoucí vybavení AFDD (např. při měření proudu procházejícího obvodem) je možné přepínačem bezpečně z obou stran odpojit AFDD a překlenout ho bypassem. Odpojení AFDD ze strany přívodu i vývodu je nutné pro bezpečné odpojení jeho napájení (AFDD by mohl být napájen vývodními svorkami přes bypass a mohlo by dojít k jeho poškození). Hlavní jistič a chránič není úmyslně v kombinovaném provedení v podobě jednoho přístroje, ale zvlášť jako dva přístroje, aby bylo lépe patrné, jaký přístroj v konkrétní situaci vybavil. Jako vývod z rozvaděče slouží zásuvka umístěná na DIN liště, která umožní jak zapojení testovaného spotřebiče s vidlicí, tak i běžných svorek (banánků). Schéma zapojení rozvaděče je na obr. 4.4 a fotografie realizovaného provedení na obr. 4.5.



Obrázek 4.4: Schéma zapojení rozvaděče pro laboratorní pracoviště AFDD



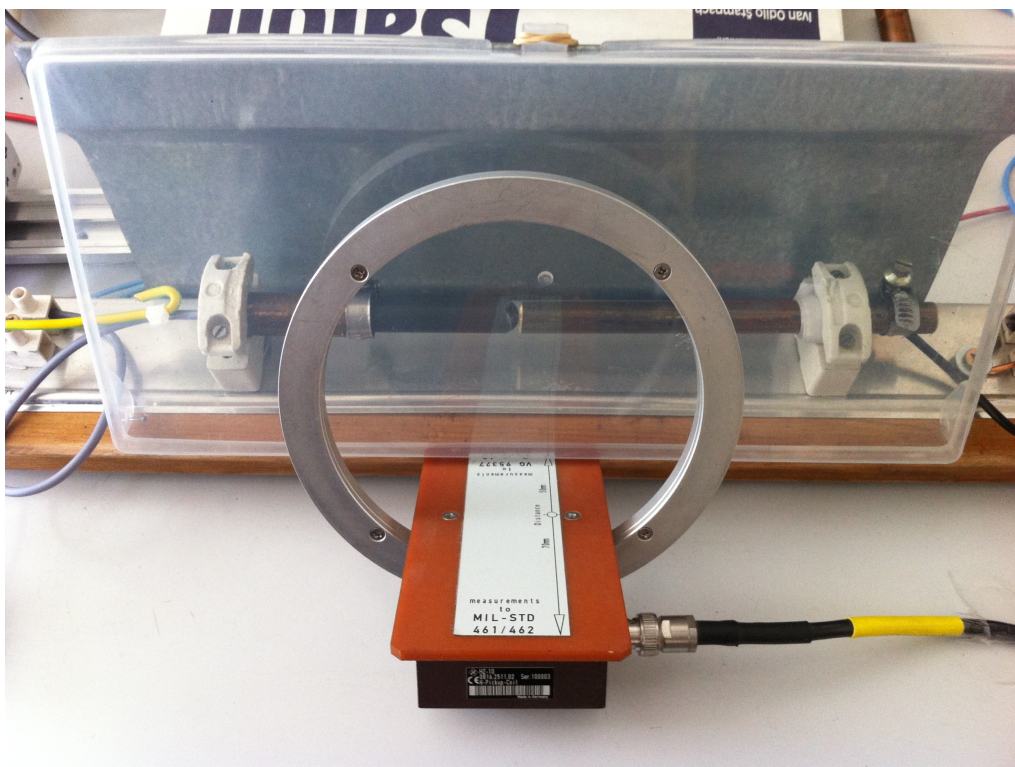
Obrázek 4.5: Realizovaný rozvaděč pro laboratorní pracoviště AFDD

## 4.4 Měřicí přístroje

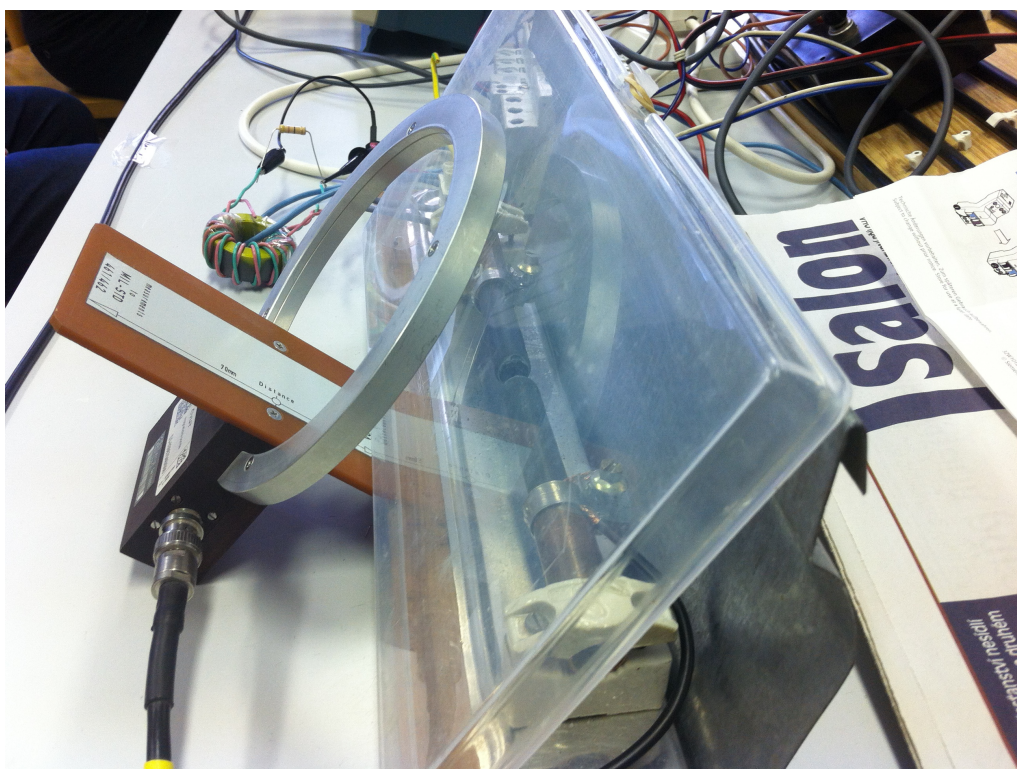
Pro měřicí pracoviště AFDD byly vybrány a použity následující měřicí přístroje:

- Spektrální analyzátor Rohde & Schwarz, typ 1093.4495.03, rozsah 9 kHz - 3 GHz, připojený k PC pro sběr a analýzu dat
- Cívka pro snímání magnetického pole Rohde & Schwarz HZ-10, kalibrovaná v rozsahu od 5 Hz do 10 MHz, připojená ke spektrálnímu analyzátoru a umístěná v blízkosti jiskřiště generátoru oblouku (obr. 4.6 a 4.7)
- Feritový toroidní transformátor se dvanácti závity (obr. 4.8) jako alternativa k výše uvedené cívce
- Dvoukanálový osciloskop Tektronix TDS 210, připojený k PC pro sběr a analýzu dat
- Proudová sonda Agilent N2783A do 30 A a 100 MHz, 0,1 V/A
- Proudová sonda Chauvin Arnoux D38N do 3600 A a 0,1 MHz, 10 mV/A

- Diferenciální napěťová sonda CalTest CT2593-1 do  $\pm 1400$  V a 25 MHz, poměr 1/200
- Běžná osciloskopická sonda 1:1
- Elektromagnetický ručkový ampérmetr s rozsahem 10, resp. 50 A
- Elektromagnetický ručkový voltmetr do 260 V
- Digitální multimetr Metex M4650CR s funkcí zapamatování maximální hodnoty procházejícího proudu (MaxHold)
- Optická sonda OP-1 (výrobek dílen FEL ČVUT) umístěná před jiskřištěm a zapojená do osciloskopu, sloužící k určení délky času, po který hoří oblouk



Obrázek 4.6: Umístění cívky pro snímání magnetického pole Rohde & Schwarz HZ-10, pohled zepředu



Obrázek 4.7: Umístění cívky pro snímání magnetického pole Rohde & Schwarz HZ-10, pohled z boku

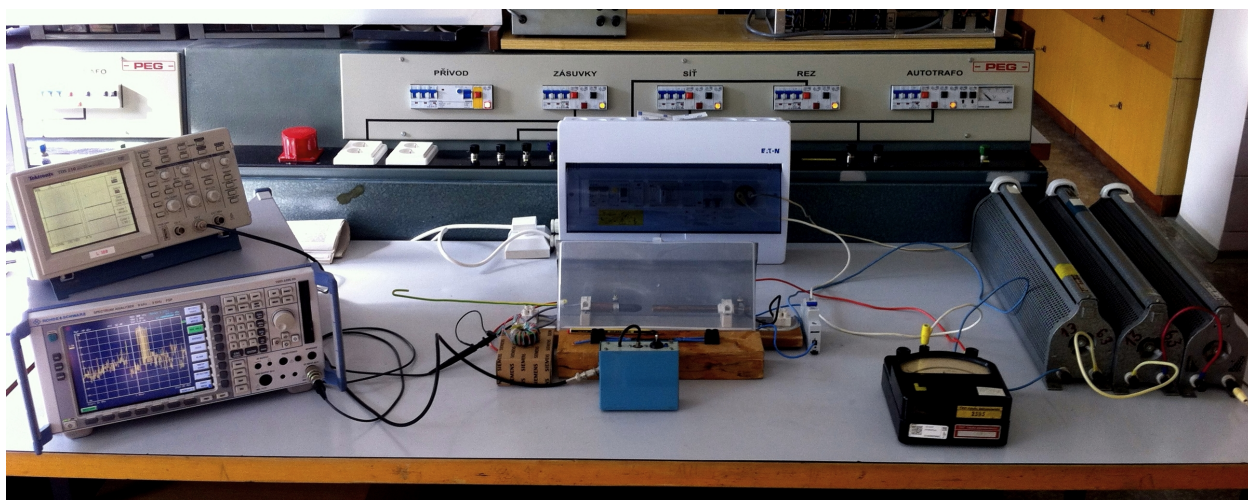


Obrázek 4.8: Feritový toroidní transformátor pro měření se spektrálním analyzátozem a pro měření průběhu proudu bez stejnosměrné složky



## 4.5 Celkové uspořádání pracoviště

Měřicí pracoviště obsahuje kromě výše uvedených měřících přístrojů a přípravků také jeden  $140\Omega$  a dva  $13\Omega$  posuvné odpory k zapojení jako zátěž. K dispozici jsou také další běžně používané domácí spotřebiče zapojitelné do zátěže, zejména ty s univerzálním komutátorovým motorkem jako je vrtačka nebo vysavač. Zapojen je také vypínač pro překlenutí generátoru oblouku nebo lineárního jiskřiště. Celkové uspořádání pracoviště (bez výpočetní techniky) je zachyceno na obr. 4.9.



Obrázek 4.9: Celkové uspořádání laboratorního pracoviště AFDD

# Kapitola 5

## Měření s přístroji AFDD

### 5.1 Měření se sériovým obloukem

Největší část pokusů realizovaných s přístroji AFDD byla prováděna se sériovým obloukem a to z důvodu, že sériový oblouk není možné identifikovat jiným běžným jistícím přístrojem. Bylo tak možné lépe ověřit samotnou reakci přístrojů AFDD bez rizika vybavení předřazených jističů nebo chráničů. Při pokusech s paralelním obloukem je hranice mezi chtěným poruchovým obloukem a nechtěným zkratem tenká a k vybavení zkratové nebo nadproudové spouště jističů by mohlo docházet často. Proto jsou v této práci za pokusy přibližující se poruše s paralelním obloukem považovány experimenty se sériovým obloukem, ale při snížené hodnotě odporové zátěže na takové minimum, aby ještě nedošlo k poškození měřicího zařízení nebo k vybavení jističů v obvodu.

Měření bylo prováděno jak se zařazeným generátorem elektrického oblouku, tak s lineárním jiskřištěm pro simulaci elektrického oblouku v kabelu. Zapojena byla odporová zátěž pro jednoduché ověření činnosti přístrojů i další zátěže pro provedení tzv. zkoušky maskovacího rušení. Spotřebiče použitelné pro tuto zkoušku jsou uvedeny v sekci 3.3.3 na str. 40. V laboratoři nebyly k dipozici spotřebiče přesně odpovídající požadavkům normy [24] a byly proto použity spotřebiče obdobné. Úmyslně byly vybrány i starší spotřebiče, u nichž je pravděpodobnost vzniku nežádoucího rušení vyšší. Konkrétně použité spotřebiče jsou uvedeny v části 5.1.2.

K dispozici byly 3 ks přístrojů Siemens 5SM6 (později pouze 2 ks, jeden přístroj zaznamenal poruchový stav a již se ho nepodařilo restartovat<sup>1</sup>). Osciloskopem byl snímán proud v obvodu zejména pomocí proudové sondy Agilent (měří do 100 MHz) a napětí oblouku pomocí sondy CalTest (o měřících přístrojích více v části 4.4), případně byl druhý kanál osciloskopu místo snímání napětí použit pro snímání proudu pomocí feritového toroidního transformátoru. Průběhy proudů sejmuté pomocí sondy Agilent a pomocí transformátoru jsou odlišné - sonda Agilent zaznamenává průběhy se stejnosměrnou složkou (jedná se o Hallovu sondu), kdežto transformátor bez stejnosměrné složky. Spektrální analyzátor byl nastaven na frekvenční rozsah od 50 kHz nebo 15 MHz do 25 či 35 MHz a referenční hodnota útlumu na -20 dBm. Připojena k němu byla buď sonda Rohde & Schwarz nebo feritový toroidní transformátor (stejný jako byl v některých případech použit pro měření proudu). Obě tyto sondy byly vždy umístěny v blízkosti jiskřiště (detail umístění je na obr. 4.6 a 4.7 v kapitole 4). Umístění bylo provedeno tímto způsobem a ne běžnějším protažením vodiče skrz sondu z důvodu vysoké citlivosti spektrálního analyzátoru a obav z poničení jeho vstupu v případě protaženého vodiče a tím vyšších indukovaných proudů. Přednost byla dávana spíše toroidnímu transformátoru před sondou Rohde & Schwarz z důvodu větší citlivosti transformátoru při vyšších frekvencích. Konkrétně použité sondy jsou vždy u každého z naměřených případů uvedeny.

---

<sup>1</sup>Přístroj, který se nepodařilo restartovat byl přiveden do poruchového stavu následovně: Jistič předřazený před AFDD byl vypnutý (čímž mělo být odpojeno napájení AFDD), jelikož byl ale AFDD překlenut bypassem, byl napájen z jeho za běžného provozu výstupních svorek. Proud do generátoru oblouku ale procházel bypassem, ne AFDD. Přesto ale AFDD zaznamenal poruchový oblouk a snažil se vybavit s ním spárovaný jistič, který ale byl ve vypnuté poloze. Při neúspěšném vybavení tohoto vypnutého jističe se AFDD vlastně nepodařilo odpojit obvod s poruchou a odpojit své vlastní napájení. Po odpojení a zapojení napájení do AFDD přes bypass blikala na přístroji LED červeno - žlutě, což značí interní poruchu přístroje. Přístroj se již nepodařilo restartováním uvést do provozního stavu. K situaci vedoucí k této poruše by za normálního zapojení v provozu nemělo dojít. Zavádějící je ale animace [19], ve které je zapojení obvodu stejné jako v zde popsaném případě. Pokud by tedy animace zobrazovala reálnou situaci, došlo by i v ní k odstavení přístroje z provozu.

### 5.1.1 Měření s generátorem elektrického oblouku

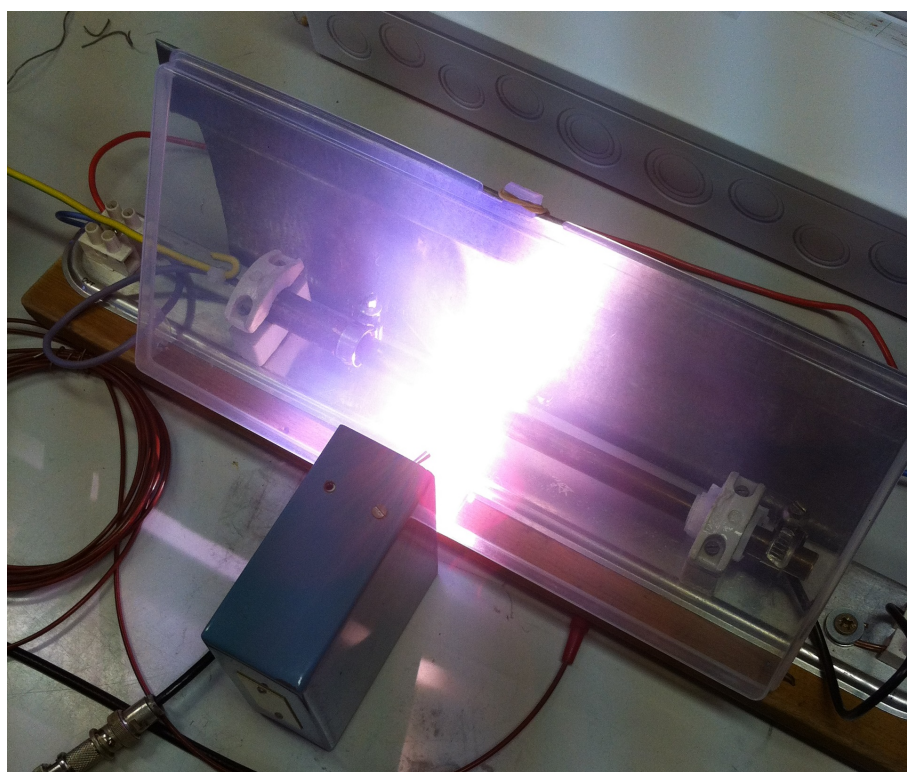
Pro první část měření byl použit elektrodový generátor elektrického oblouku popsany v části 4.1, zapojený do vývodu rozvaděče AFDD (schéma na obr. 4.4 na str. 44) v sérii s proměnnými odpory. Odpory byl při vyřazeném AFDD (a zapnutém bypassu) nastaven nebo upraven proud procházející obvodem. Prvotní úsilí bylo věnováno k dosažení vypnutí AFDD za jakékoliv situace, s jakoukoliv připojenou zátěží, abychom zjistili, zda je konkrétní přístroj vlastně funkční. Ukázalo se, že první vypnutí každého ze tří testovaných přístrojů nastalo až po několika realizovaných pokusech s obloukem a chvíli to vypadalo, že přístroj na oblouk vůbec nezareaguje. Po prvním vypnutí ale pak všechny přístroje reagovaly na oblouk obdobně a vypínaly častěji i při situacích, na které před prvním vybavením nereagovaly. Reakce AFDD na oblouk hořící v generátoru byly ale i tak málo časté.

Na obr. B1 v příloze B na str. P2 je zachycen průběh proudu procházejícího obvodem se stabilně hořícím krátkým obloukem při čistě odporové zátěži  $26 \Omega$  a průběh napětí na oblouku. Jedná se o typické průběhy při hoření oblouku, patrné je zhasnutí oblouku při průchodu proudu nulou i zapalovací špičky obloukového napětí, které značně převyšují obloukové napětí samotné. Na obr. B2 je pak obdobný průběh ale pro delší oblouk než v předchozím případě. V obou případech je pro snímání napětí použita běžná osciloskopická sonda připojená na svorky generátoru a pro snímání proudu sonda Chauvin Arnoux.

Podobná situace se stabilně hořícím obloukem a čistě odporovou zátěží byla zachycena také s prvním kanálem osciloskopu připojeným na proudovou sondou Agilent a druhým připojeným k feritovému toroidnímu transformátoru také ve funkci proudové sondy, viz obr. B3 v příloze B na str. P3. Tomuto průběhu odpovídá záznam ze spektrálního analyzátoru na obr. B4. Ačkoliv je průběh proudů opět typický pro oblouk a spektrum obsahuje vrcholy i v oblasti kolem 24 MHz, ve které má přístroj 5SM6 měřit, nedošlo v tomto případě k vybavení AFDD ani při hoření oblouku po dobu 20 vteřin.

Nutno podotknout, že ač je náš elektrodový generátor oblouku sestaven přibližně dle normy [24], tak oblouk hořící mezi jeho elektrodami (zachycený na obr. 5.1) zcela neodpovídá reálné situaci hoření poruchového oblouku v elektroinstalaci mezi dvěma vodiči nebo vodičem a svorkou ve svorkovnici. Elektrody generátoru mají několikanásobně větší průměr než běžně používané vodiče v domovní instalaci a energie oblouku je tak soustředěna do

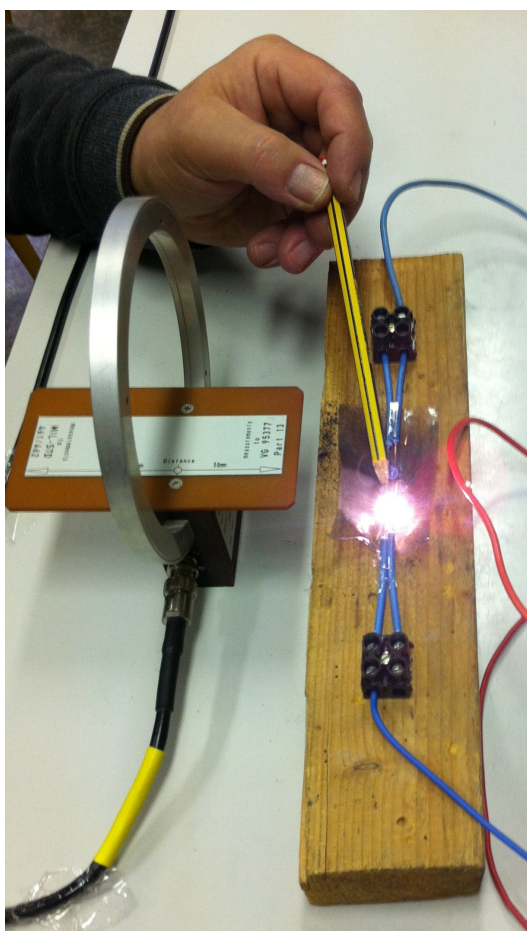
větší plochy a oblouk je masivnější. Svou roli zde také může hrát vyšší odpor uhlíkové elektrody. I z těchto důvodů uvádí norma [24], že vypínací časy přístrojů AFDD mohou být při jejich ověřování s generátorem oblouku 2,5-krát delší je uvedeno v tab. 3.1. Podle pořadí uvedení zkušebních metod v normě [24] se také předpokládá, že výrobce přístrojů AFDD zvolí k testování spíše metodu s karbonizovaným vzorkem izolace, než s generátorem oblouku (více o metodách v části 3.3). V našich laboratorních podmínkách byla ale lépe proveditelná právě metoda s generátorem oblouku a i delší požadované časy vypnutí AFDD by byly lépe měřitelné. Proto bylo plánováno provedení opakovaných měření časů vypnutí dvou modelů AFDD Siemens 5SM6 pro odporovou zátěž a hodnoty proudů dle výše zmíněné tabulky. Toto měření ale nakonec nebylo možné realizovat, protože k vypnutí AFDD při hoření oblouku v elektrodovém generátoru docházelo opravdu velmi zřídka. Jak bude dále uvedeno, k mnohem lepším výsledkům vybavování AFDD docházelo při použití lineárního jiskřiště.



Obrázek 5.1: Oblouk hořící v elektrodovém generátoru oblouku při proudu 8 A

### 5.1.2 Měření s lineárním jiskřištěm

K následujícímu měření bylo použito lineární jiskřiště, blíže popsané v části 4.2, sloužící k lepšímu přiblížení situace elektrického oblouku hořícího mezi vodiči v reálné elektroinstalaci. Zapojeno bylo stejně jako elektrodový generátor, tedy v sérii se zátěží (s proměnnými odpory, s maskovací zátěží či jejich kombinací) do rozvaděče AFDD (více v části 4.3). Oblouk v jiskřišti byl zapalován zejména umístěním tužky s uhlíkovou tuhou s nízkým odporem mezi vodiče, viz obr. 5.2.



Obrázek 5.2: Oblouk hořící v lineárním jiskřišti

Jelikož vybavování AFDD v případě oblouku hořícího v lineárním jiskřišti bylo výrazně častější než při použití generátoru oblouku (AFDD vybavoval téměř ve všech případech), bylo nejprve provedeno měření vypínacích časů plánované původně pouze při pokusech s generátorem oblouku. Ačkoliv realizované jiskřiště přesně neodpovídá metodě s karbonizo-

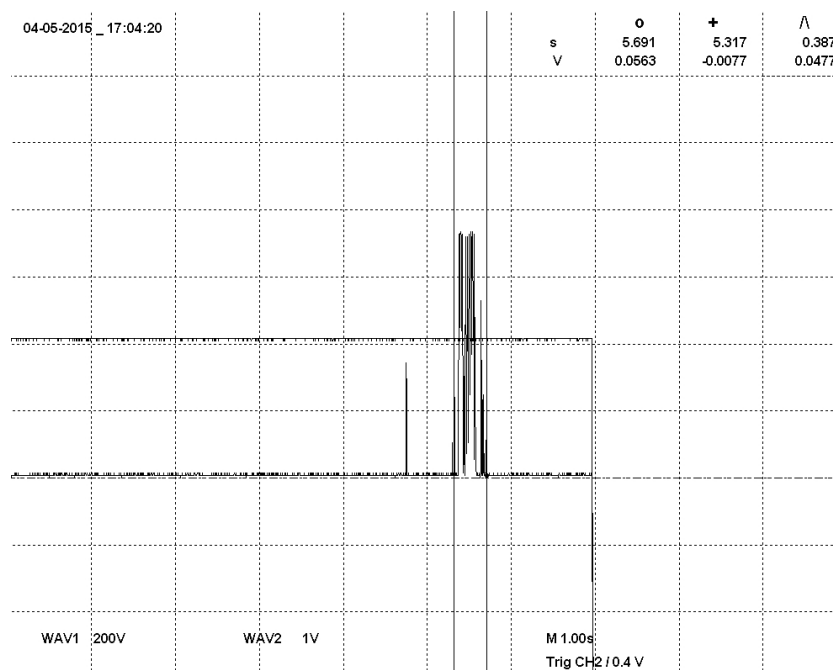
vaným vzorkem kabelu dle [24] a tužkou vytvořený oblouk v jiskřišti nemohl být vždy zcela stejný, tak přehled vypínacích časů AFDD v závislosti na výskytu oblouku při různých proudech dobře vypovídá o vlastnostech přístroje. Pro měření proudu byl použit elektromagnetický ručkový ampérmetr a proudy byly nastavovány při překlenutém jiskřišti a při síťovém napájecím napětí 230 V (což také odlišuje naše měření od měření dle normy [24], kde se proud nastavuje při síťovém napětí sníženém o 50 V). Zapojena byla čistě odporová zátěž. K určení délky hoření oblouku byla použita optická sonda OP-1 umístěná před jiskřištěm a zapojená do osciloskopu. Ukázka záznamu z této sondy je na obr. 5.3. Časy určené měřením v porovnání s časy danými normou [24] jsou uvedeny v tabulce 5.1. U obou měřených proudů jsou dva ze tří časů v limitu. V jednom případě při proudu 10 A je čas do vybavení mírně delší a v jednom případě při proudu 5 A nedošlo k vybavení AFDD ani za 5 s. Ačkoliv jsme se snažili oblouk vždy iniciovat stejným způsobem, je možné, že v tomto případě se nám to zcela nepodařilo. Rozdíly v situacích při různých vybavovacích časech je možno sledovat i ve frekvenčních spektrech. Pokud byl vybavovací čas delší, obsahoval hořící oblouk více složek ve frekvenční oblasti od 15 do 18 MHz. To je patrné z obr. C1 a C2 v příloze C na str. P4 (proud 10 A, vybavovací časy 720 a 120 ms).

I (A)	$t_{lim}$ (ms)	$t_{m1}$ (ms)	$t_{m2}$ (ms)	$t_{m3}$ (ms)
5	500	400	387	×
10	250	120	240	720

Tabulka 5.1: Naměřené časy hoření oblouku v lineárním jiskřišti do vybavení AFDD v porovnání s limitními časy určenými normou ČSN EN 62606 (× - nedošlo k vybavení AFDD)

Pro názorné porovnání případů oblouku hořícího v elektrodovém generátoru a oblouku hořícího v lineárním jiskřišti byla změřena frekvenční spektra těchto dvou situací při stejných podmínkách. V obou měřených případech byla zapojena stejná odporová zátěž a obvodem tedy procházel stejný proud (5 A). Při použití lineárního jiskřiště AFDD vybavil okamžitě, při použití generátoru oblouku k vybavení nedošlo. Změřené průběhy spekter jsou na obrázcích C3 - C6 v příloze C na str. P5 a P6 (experiment byl zopakován dvakrát pro generátor i pro jiskřiště). Spektrum oblouku hořícího v generátoru je oproti spektru oblouku hořícího v lineárním jiskřišti mnohem více zarušené a připomíná spíše spektrum některého

rušivého spotřebiče (např. možno porovnat se spektrem staré vrtačky na obr. D7 na str. P19), což může být také důvodem, proč při těchto experimentech AFDD reagoval špatně.



Obrázek 5.3: Ukázka výstupu z optické sondy OP-1 pro určení času, po který hoří oblouk v jiskřišti (zde odečten čas 387 ms)

S lineárním jiskřištěm byla dále provedena měření přibližně odpovídající zkoušce maskovacího rušení dle normy [24], tedy měření s jinými než odporovými zátěžemi. Použity k tomu byly následující spotřebiče (viz také obr. 5.4):

1. Spínaný zdroj z osobního počítače zn. Emko, model JS-200, vstup 230 V, 3 A, výstup max. 200 W, zatížený na výstupu rezistorů na cca 85 W tak, že primárním obvodem prochází proud 850 mA
2. Fén zn. Tesla, model HDT3305 s příkonem 1200 W
3. Starší vysavač zn. Eta typ 406, rok výroby 1960, příkon 300 W
4. Vysavač zn. AquaVac typ 7403B o příkonu 1000 W
5. Starší vrtačka sovětské výroby typ BZS-I s příkonem 250 W





Obrázek 5.4: Některé spotřebiče použité pro zkoušku s maskovacím rušením

V tabulce 5.2 je ke konkrétně použitému spotřebiči (pro zjednodušení jsou označeny číslem odpovídajícím číslu ve výpisu uvedenému výše) nebo odporu uvedena přibližná hodnota proudu, který obvodem procházel při překlenutém jiskřišti (tedy bez výskytu oblouku) a informace, zda došlo nebo nedošlo k vybavení AFDD. Odporů ke spotřebičům, resp. spotřebiče navzájem, jsou řazeny paralelně (paralelní zapojení lépe demonstruje situaci v běžné elektroinstalaci, kdy je např. v jedné zásuvce připojena rychlovarná konvice a v jiné vysavač).

Použitý spotřebič	①	① + 70 Ω	① + 26 Ω	②	② + 70 Ω	③	③ + 70 Ω	④	③ + ④	70 Ω	26 Ω	13 Ω
I (A)	0,85	4	10	5,2	8,5	1,3	4,6	4,3	5,6	3,1	8,5	17
Vybavení	×	×	✓	✓	✓	×	✓	×	✓	✓	✓	✓

Tabulka 5.2: Přehled vybavení AFDD při měření s lineárním jiskřištěm (① - spínaný zdroj, ② - fén, ③ - vysavač Eta, ④ - vysavač AquaVac, ✓- došlo k vybavení AFDD, × - nedošlo k vybavení AFDD)

Z tabulky je patrné, že AFDD měl problémy s vybavováním při proudech nižších než 4 A, nevybavil dokonce ani při zapojení vysavače AquaVac a proudu 4,3 A. Naopak při čistě odporové zátěži 70  $\Omega$  a proudu 3,1 A vybavil. Pokud byl ale ke stejnému 70 $\Omega$  odporu paralelně připojen spínaný zdroj, k vybavení nedošlo. Znamená to tedy, že pokud zátěž nebyla jen čistě odporová, ale byla spíše induktivního charakteru, AFDD měl s detekcí poruchového oblouku větší problémy.

K některým případům uvedeným v tabulce 5.2 jsou v příloze C na str. P7 - P14 obrázky průběhů napětí na oblouku (měřeno sondou Caltest) a proudu procházejícího obvodem (měřeno sondou Agilent), ke kterým jsou přiloženy odpovídající záznamy ze spektrálního analyzátoru (měřeno pomocí feritového toroidního transformátoru umístěného před jiskřištěm). Ve spektrech je vždy vyznačena jedna hodnota útlumu u frekvencí přibližně kolem 22 a 24 MHz, které vyhodnocuje přístroj 5SM6 a v popisu obrázku je uvedeno, zda došlo, nebo nedošlo k jeho vybavení.

Ze spekter je možno vysledovat další rozdíly mezi situacemi, kdy došlo, nebo nedošlo k vybavení AFDD. V situacích, kdy AFDD nevybavil, je patrný vždy celkový větší výskyt všech složek spektra, zejména pak ale v jeho první polovině, tedy v rozsahu od 15 do přibližně 20 MHz. Pokud totiž AFDD vybavil, tak k jeho vybavení došlo velmi rychle od vzniku oblouku, řádově asi do tří sekund. Pokud ale k jeho vybavení nedošlo v tomto krátkém čase, již k jeho vybavení nedošlo ani při hoření oblouku v délce 10 s. Vzhledem k aktivní funkci Max-Hold tak spektrální analyzátor v případech bez vybavení AFDD zaznamenal více hodnot, které produkoval déle hořící oblouk. Na záznamech tedy vidíme spektrum krátce hořícího oblouku, na které už přístroj AFDD zareaguje nebo spektrum déle hořícího oblouku, na jehož složky AFDD nereaguje. Vyšší výskyt frekvencí ve zmíněném rozsahu také ale může souviset s typem připojené zátěže. Vyšší rušení oblouk produkuje, pokud je zátěž induktivního charakteru a pokud proud procházející obvodem je nižší. Pokud je připojen paralelní odpor a procházející proud vzroste, dochází k většímu útlumu rušivých frekvencí a spektrum pak obsahuje méně složek. Nevybavení AFDD tak může tímto ovlivňovat právě i spektrum oblouku. Pokud jsou frekvence obsaženy ve větší míře a ve větší části spektra, může AFDD vyhodnotit situaci jako provozní oblouk běžně se vyskytující v některém z rušivých spotřebičů. Naopak k vybavení AFDD postačuje pouze nevelké zvýšení hladiny spektra oproti běžnému pozadí

a nedochází k němu při výskytu velkých prudkých vrcholů u některých frekvencí, které mohou právě správnou funkci AFDD spíše zhoršovat. Dobře patrné je to při porovnání záznamu šumu na pozadí bez výskytu oblouku (obr. C23 v příloze C na str. P15) a záznamu spektra při hoření oblouku a zapojení fénu a odporu  $70 \Omega$  v případě, kdy došlo k velmi rychlému vybavení AFDD (obr. C24). Na záznamu při vybavení nejsou u frekvencí nad 20 MHz žádné velké vrcholy, patrné je pouze celkové zvýšení hladiny o asi 5 dBm. Oba tyto průběhy jsou změřeny méně citlivou sondou Rohde & Schwarz, což vysvětluje rozdíly mezi předchozím měřením stejné situace při použití feritového transformátoru (obr. C14).

Podobných pokusů, jaké jsou uvedeny a popsány výše, byly provedeny desítky. K vybavení AFDD při použití lineárního jiskřiště došlo při proudech vyšších než 4,5 A téměř ve všech případech. Čím vyšší proud obvodem procházel, tím rychleji přístroj reagoval a nebyla nutná ani příliš velká stabilita hořícího oblouku. Z toho se dá také předpokládat, že i reakce přístrojů na paralelní oblouk, ač nebyla přímo měřena, by byla bezproblémová. Při nižších proudech záleželo na charakteru připojené zátěže. Pokud byl k maskovací zátěži paralelně připojený odpor, neprodukoval hořící oblouk tak vysoké rušení v celém měřeném frekvenčním spektru a AFDD reagoval lépe. U většiny spotřebičů, které se ke zkoušce s maskovacími zátěžemi používají dle normy [24], je uvedena minimální hodnota proudu 5 A, případně se rušivé zátěže doplňují přídatným odporem. Navíc pokud by byl k měření použit místo lineárního jiskřiště správně připravený karbonizovaný vzorek vodiče, situace by odpovídala ještě více reálnému poruchovému oblouku. Vodiče by byly blíže u sebe a navíc by byly pokryty zuhelnatělým izolačním materiálem, přes který by se oblouk lépe inicioval. Ze zjištěných poznatků se dá tedy předpokládat, že reakce AFDD by při těchto podmínkách byla ještě lepší.

Další odlišné testování AFDD bylo provedeno se svorkovnicí a zásuvkou s úmyslně nedotaženými svorkami a připojenou odporovou zátěží (přímotopem s příkonem 2 kW). Ukázalo se, že na tyto poruchy není AFDD schopen dobře reagovat, protože povolené svorky sice žhnou, ale poruchový oblouk mezi nimi vzniká sporadicky. A z principu funkce přístroje AFDD nelze poruchu, která neprodukuje vysokofrekvenční rušení, detekovat. Nemožnost detekce žhnoucích spojů lze tedy částečně považovat za nevýhodu přístrojů AFDD.

## 5.2 Měření s rušivými zátěžemi

Měření s rušivými zátěžemi se provádí pro ověření odolnosti přístroje AFDD proti vysokofrekvenčnímu rušení, které produkují spotřebiče běžně se vyskytující v domácnostech. Pokud jsou tyto spotřebiče zapojeny v obvodu za AFDD, ale nevyskytuje se zde poruchový elektrický oblouk, přístroj nesmí v žádném případě vybavit (je nežádoucí, aby docházelo k vypínání obvodu např. pokaždé, když budeme vysávat). Jedná se tedy o opačné měření, než měření s maskovacími zátěžemi. Do obvodu se připojují stejné zátěže (viz část 3.3.3) a sleduje se, zda jejich provoz nezpůsobí falešné vybavení AFDD. K našim měřením byly použity stejné spotřebiče jako při pokusech s lineárním jiskřištěm (část 5.1.2), tedy spínaný zdroj, fén, vysavač a vrtačka. Jak již bylo uvedeno dříve, přístroj Siemens 5SM6 je určený k instalaci do koncových obvodů v rodinných domech, bytech nebo kancelářských budovách, není tedy určen pro použití v průmyslovém prostředí. Proto ani nebyla testována součinnost přístrojů AFDD s rušivými spotřebiči používanými v průmyslu, např. s frekvenčními měniči.

Při měření byl ke spektrálnímu analyzátoru zapojen feritový toroidní transformátor (viz obr. 4.8 na str. 47), kterým byl provlečen fázový vodič vedoucí k zátěži. Každý z rušivých spotřebičů byl v běhu po dobu 10 vteřin (dle normy [24] je dostačujících 5 vteřin), poté bylo sejmuto zaznamenané frekvenční spektrum. Jednotlivá naměřená spektra jsou na obrázcích v příloze D (str. P16 - P19). Nejintenzivnější rušení ze všech testovaných spotřebičů produkovala stará vrtačka s univerzálním komutátorovým motorkem a s pravděpodobně již dosti opotřebovanými uhlíky (obr. D7). Jelikož odebírala tato vrtačka proud asi 400 mA, byla otestována i varianta s paralelně připojeným odporem 140  $\Omega$  (obr. D8). Kromě spínaného zdroje Emco použitého i v předchozích měřeních bylo sejmuto i rušivé spektrum spínaného zdroje Hipro A0653R3B určeného pro napájení notebooku (obr. D6). Experimenty byly prováděny i s přechodnými ději při spínání a vypínání spotřebičů (např. spouštění vysavače na obr. D4), které jsou také požadovány normou [24] (vždy 5 zapnutí a 5 vypnutí pro každý spotřebič). Několikrát byla také otestována odolnost AFDD proti oblouku vzniklém při vytržení vidlice spotřebičů ze síťové zásuvky.

Ani v jednom z předchozích uvedených případů nedošlo k nežádoucímu vybavení přístroje AFDD. Spotřebiče buď příliš silné rušení neprodukovaly, nebo, pokud bylo rušení silné, bylo zároveň i periodické. Tak tomu bylo i při pokusech s vrtačkou. Ta produkovala velmi

silné rušení, jehož spektrum je ale při srovnání se spektry poruchových oblouků hořících v lineárním jiskřišti, kdy docházelo k rychlému vybavení AFDD, dosti odlišné. Zároveň jiskření komutátoru vrtačky bylo pravidelné a proud odebíraný vrtačkou nízký. Je tak v pořádku, že přístroj AFDD nevybavil. Ačkoliv tedy reakce AFDD na poruchové oblouky iniciované v našich laboratorních přípravcích nebyla zcela stoprocentní, tak jejich odolnost vůči možným rušivým vlivům je velmi vysoká, dle našich pokusů stoprocentní. Vhodným doplněním této vysoké odolnosti přístroje AFDD proti rušení je také jeho funkce signalizace příliš vysokého základního vysokofrekvenčního šumu pomocí indikační LED diody. V případě, že by tedy byla správná detekce poruchových oblouků vysokofrekvenčním šumem omezena, uživatel se o tom včas dozví (viz přehled indikačních stavů na obr. A1 na str. P1 v příloze A). Při našich experimentech nebyl tento signalizační stav zaznamenán, je tedy pravděpodobné, že k tomu bude docházet jen ve výjimečných případech, např. právě při nevhodné instalaci přístroje v průmyslovém prostředí. Zajímavým experimentem, který nebyl v rámci této práce proveden, by bylo otestování funkčnosti přístroje AFDD v elektroinstalaci, ve které se využívá vysokofrekvenčního přenosu dat PLC (Power Line Communication). Právě totiž často používaný typ PLC nazývaný HomePlug, sloužící pro vytvoření místní sítě LAN pomocí stávajících rozvodů nn, pracuje dle [10] na frekvencích asi mezi 2 a 25 MHz, ve kterých jsou přístroje AFDD citlivé. Skutečnou odolnost přístrojů AFDD proti rušení vyskytujícímu se v domovních rozvodech nn a stejně tak i jejich citlivost na odhalování nebezpečí způsobeného reálnými poruchovými oblouky, ukáže nejlépe až jejich rozšíření a dlouhodobé testování v reálných elektroinstalacích. Zajímavé bude také v budoucnu, až budou k dispozici nové modely AFDD od různých výrobců, porovnávání jejich reakcí.

# Závěr

Cílem této diplomové práce byla analýza rizik vzniku poruchového elektrického oblouku v sítích nízkého napětí, jejich možných druhů a vlivů na vznik požáru v domovních elektroinstalacích. Popsány v ní byly možné způsoby detekce těchto poruchových oblouků pomocí běžně používaných přístrojů a také pomocí speciálních přístrojů AFDD. Funkce těchto přístrojů byla v práci rozebrána a v experimentální části ověřena.

Výskyt požárů způsobených poruchami v elektrické instalaci je stále vysoký nejen u nás, ale i v zahraničí, což dokazují čísla dostupná ve statistikách různých institucí. K jejich mírnému snižování vede jak důkladnější protipožární prevence (lepší výběr kabelů, způsobů jejich uložení apod.), tak i cílevědomější používání proudových chráničů, sloužících jako ochrana před únikovými proudy. Možných rizik je ale zejména ve starších instalacích stále mnoho a současné způsoby sloužící k jejich včasnému odhalení jsou omezené.

Nový způsob detekce poruchových elektrických oblouků pomocí přístrojů AFDD velice vhodně a účinně doplňuje v současnosti používané jisticí a ochranné přístroje a reaguje na poruchy, které tyto běžné přístroje nejsou schopny zaznamenat. Důkazem toho jsou zkušenosti z USA, kde se podobné typy přístrojů začaly instalovat již před několika lety a úspěšně zde pomáhají zvyšovat požární bezpečnost nejen obytných prostor. Rozšíření těchto přístrojů v Evropě se očekává v blízké době, příslušné normy týkající se této oblasti jsou již v platnosti i v České republice. Nyní se čeká jen na to, jak rychle budou schopni výrobci AFCI upravit své přístroje dostupné v USA na varianty určené pro napájecí síť používanou v Evropě a odpovídající místním normám (výrobci AFCI v USA působí často i u nás, např. Eaton nebo Schneider Electric). S více dostupnými modely by se i s velkou pravděpodobností snížila cena těchto přístrojů, která je zatím ve srovnání s ostatními instalačními přístroji poměrně vysoká. První přístroj AFDD dostupný na evropském trhu - Siemens 5SM6 - lze v současné

době v ČR pořídit za částku kolem 3000,- Kč, nutné je jej ale navíc propojit s dvoupólovým jednomodulovým jističem Siemens, který stojí přibližně 1000,- Kč. Při doporučení výrobce instalovat tyto přístroje do jednotlivých koncových obvodů se tak celková cena rozvaděče výrazně prodraží a nelze tedy zatím ani očekávat jejich rychlé rozšíření např. do malých domovních rozvaděčů, kde je většinou snaha náklady na elektroinstalaci co nejvíce snižovat. Jinak tomu může být v komerčních prostorách, kde se pohybuje vyšší počet osob nebo kde hrozí nenahraditelné škody na majetku, např. v nemocnicích, muzeích či knihovnách a kde by náklady na přístroje AFDD ve srovnání s celkovými náklady na stavbu nebyly tak vysoké. Pro porovnání v USA začíná cena kombinovaných přístrojů AFCI (jednopolový jistič 20 A, proudový chránič a AFDD v jednom) v přepočtu už na částce 900,- Kč. Taková cena je již přijatelná i pro instalaci AFDD v domovních rozvaděcích.

Při testování přístroje Siemens 5SM6 ve školní laboratoři se ukázalo, že je opravdu velmi citlivě naprogramován a je schopen detekovat jen elektrické oblouky blížící se svými proudovými průběhy a spektry skutečným poruchovým obloukům. Na masivní oblouky hořící v elektrodoovém generátoru reagoval AFDD špatně, ale na kratší oblouky vznikající mezi instalačními vodiči byla jeho reakce velmi dobrá. Jeho vybavování bylo omezeno dolní hranicí proudu kolem 3 a 4 A, kde vzniklé oblouky nebyly příliš stabilní a přístroj na ně nereagoval. Při vyšších proudech mezi 4 a 10 A, kdy je riziko vzniku požáru od elektrického oblouku nejvyšší, byla ale jeho reakce rychlá a odpovídala časům určeným normou. Zkouška s rušivými zátěžemi byla stoprocentně úspěšná a přístroj AFDD ani jednou nezareagoval na provozní elektrické oblouky, vznikající v běžných domácích spotřebičích. Provedená měření tedy funkci přístroje úspěšně ověřila. Jak ale budou přístroje fungovat v reálných situacích a elektroinstalacích a po několika letech v provozu, ukáže až čas. Z těchto důvodů byl pouze jeden ze zakoupených přístrojů 5SM6 ponechán v laboratorním rozvaděči, druhý bude instalován v reálném domovním rozvaděči a jeho provoz bude nadále monitorován.

Mezi výhody přístrojů AFDD patří dále kromě detekce poruchových oblouků i jejich snadná instalace jak do nových, tak do stávajících rozvaděčů. U přístroje 5SM6 je zde omezení na použití v síti TN-S a pouze na jednofázové koncové obvody. Z principu funkce přístrojů ale nebude složité rozšířit existující modely na třífázové, nebo vhodné k instalaci do sítí TN-C ve starších rozvodech s vyšším rizikem vzniku poruchových oblouků. I dle [24] se chystá

rozšíření normy na takovéto přístroje. Hlavní nevýhoda AFDD je, že neposkytuje ochranu proti žhnoucím spojům s vysokou impedancí (bez hořícího oblouku), které mohou být také příčinou vzniku požárů od elektroinstalace.

Přístroje AFDD jsou rozhodně správným směrem ke zvýšení ochrany před nebezpečnými poruchovými elektrickými oblouky. S očekávaným příchodem nových výrobců, modelů, zlepšováním detekčních algoritmů a snižováním jejich ceny se jistě brzy stanou neodmyslitelnou součástí všech nízkonapěťových rozvaděčů.



# Literatura

- [1] **Statistická ročenka Hasičského záchranného sboru ČR pro rok 2014 [online].**  
Hasičský záchranný sbor České republiky, 2014. Dostupné z:  
<http://www.hzscr.cz/soubor/rocenka2014-pdf.aspx>
- [2] **Statistická ročenka Hasičského záchranného sboru ČR pro rok 2013 [online].**  
Hasičský záchranný sbor České republiky, 2013. Dostupné z:  
<http://www.hzscr.cz/soubor/rocenka-2013-pdf.aspx>
- [3] *CIESLAR, Stanislav*: **Nesprávně provedená elektroinstalace stojí za velkou částí požárů [online].** ElektriKa.cz, 2011. Dostupné z:  
<http://elektriKa.cz/data/clanky/nespravne-provedena-elektroinstalace-stoji-za-velkou-casti-pozaru>
- [4] **Nová technika umožňuje snížit riziko požárů způsobených poruchami v elektroinstalaci [online].** Tisková zpráva Siemens ČR, 2014. Dostupné z:  
[http://www.siemens.cz/press/cz/nove/press\\_releases-nova\\_technika\\_umožnuje\\_snizit\\_riziko.html](http://www.siemens.cz/press/cz/nove/press_releases-nova_technika_umožnuje_snizit_riziko.html)
- [5] *ŠTĚPÁN, František*: **Použití proudových chráničů v prostředí se zvýšeným nebezpečím požáru [online].** Časopis Elektroinstalatér, 2008. Dostupné z:  
<http://www.tzb-info.cz/5370-pouziti-proudovych-chranicu-v-prostredise-zvysenym-nebezpecim-pozaru>
- [6] **Using Advanced Technology to Reduce Electrical Fires [online].**  
National Electrical Manufacturers Association. Dostupné z:  
<http://www.afcisafety.org/files/AFCI8pager.pdf>

- [7] **Siemens 5SM6 AFD Unit, Technology Primer [online]**.  
Siemens AG, 2012. Dostupné z:  
[https://www.low-medium-voltage.siemens.pl/docs/docs\\_lmv/04\\_ds\\_Technologyprimer5SM6AFDD\\_EN\\_3002.pdf](https://www.low-medium-voltage.siemens.pl/docs/docs_lmv/04_ds_Technologyprimer5SM6AFDD_EN_3002.pdf)
- [8] *MARTEL, J.-M., ANHEUSER M., BERGER F.*: **A study of arcing fault in the low-voltage electrical installation**. Holm. IEEE 56th Holm Conference on Electrical Contacts, 2010. 11 s. ISBN 978-1-4244-8174-3.
- [9] *BABRAUKAS, Vytenis*: **How do electrical wiring faults lead to structure ignitions [online]**. London. Fire science and technology Inc., 2001. 13 s. Dostupné z:  
<https://doctorfire.com/ElectricalFires.pdf>
- [10] *JUKL, Tomáš*: **Studium vysokofrekvenčních přenosových vlastností rozvodů nízkého napětí. Diplomová práce**. Praha. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2010.
- [11] **Investigations on Branch/Feeder AFCI [online]**. Underwriters Laboratories Inc., 2001. 25 s. Dostupné z:  
<http://www.eaton.com/ecm/groups/public/@pub/@electrical/documents/content/1030709213042.pdf>
- [12] **Nema Recommendation of AFCI/Home Electrical Product Compatibility**  
The National Electrical Manufacturers Association, 2012. 4 s.
- [13] *CHI-JUI, Wu, YU-WEI Liu*: **Smart detection technology of serial arc fault on low-voltage indoor power lines**. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014. 8 s. ISSN 0142-0615.
- [14] *LEZAMA, J., SCHWEITZER, P., WEBER, S., TISSERAND, E., JOYEUX, P.*: **Modeling of a Domestic Electrical Installation to Arc Fault Detection**. Holm. IEEE 58th Holm Conference on Electrical Contacts, 2012. 7 s. ISBN 978-1-4673-0778-9.
- [15] *GREGORY, George D., WONG, Kon, DVORAK, Robert F.*: **More About Arc-Fault Circuit Interrupters**. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004. 6 s.

- [16] *RESTREPO, Carlos: Arc Fault Detection and Discrimination Methods.*  
Holm. IEEE 53th Holm Conference on Electrical Contacts, 2007. 8 s.
- [17] *ANDREA, Johnatan, SCHWEITZER, Patrick, TISSERAND, Etienne, ROTH, Patrice, WEBER, Serge: Calibrated AC and DC Arcing Fault Generator.*  
Lien. Laboratoire d'Instrumentation Electronique de Nancy, 2010. 6 s.
- [18] *VOŽENÍLEK, Petr, NOVOTNÝ, Vladimír, MINDL, Pavel: Elektromechanické měniče.* Praha. Vydavatelství ČVUT, 2005. 219 s. ISBN 80-01-03137-3.
- [19] **Animace pro demonstraci funkce přístroje Siemens 5SM6 [online].**  
Siemens AG. Dostupné z URL:  
[https://www.lowvoltage.siemens.com/wcms/brandschutzschalter/html5\\_Version/index.html](https://www.lowvoltage.siemens.com/wcms/brandschutzschalter/html5_Version/index.html)
- [20] *BOWER Ward, KUSZMAUL Scott, JOHNSON Jay, STRAUCH Jason: Codes and Standards for PV Arc-Fault Detection & Mitigation [online].* Dostupné z URL:  
[http://www.solarabcs.org/about/publications/meeting\\_presentations\\_minutes/2011/02/pdfs/Arc-PV\\_Codes-Detection-mitigation.pdf](http://www.solarabcs.org/about/publications/meeting_presentations_minutes/2011/02/pdfs/Arc-PV_Codes-Detection-mitigation.pdf)
- [21] **Přehled typů přístrojů pro detekci poruchového elektrického oblouku [online].** EC&M, 2002. Dostupné z URL:  
<http://ecmweb.com/content/basics-arc-fault-protection>
- [22] *PFEIFFER John: The Arc Fault Circuit Interrupter [online].* Dostupné z URL:  
<http://www.pfeiffereng.com/The%20Arc%20Fault%20Circuit%20Interrupter.pdf>
- [23] UL 1699. **Arc Fault Circuit Interrupters.** 2007. ISBN 0-7629-1164-6.
- [24] ČSN EN 62606 (354196). **Obecné požadavky pro obloukové ochrany.** 2014.
- [25] ČSN 33 2000-4-42 ed. 2 (332000). **Elektrické instalace nízkého napětí - Část 4-42: Bezpečnost - Ochrana před účinky tepla.** 2012.

# Přílohy

## Příloha A

Indikátor operačních stavů přístroje Siemens 5SM6 (str. [P1](#))

## Příloha B

Sejmuté průběhy z měření s elektrodovým generátorem oblouku (str. [P2](#) - [P3](#))

## Příloha C

Sejmuté průběhy z měření s lineárním jiskřištěm (str. [P4](#) - [P15](#))






## Příloha D

Sejmuté průběhy z měření s rušivými zátěžemi (str. [P16](#) - [P19](#))

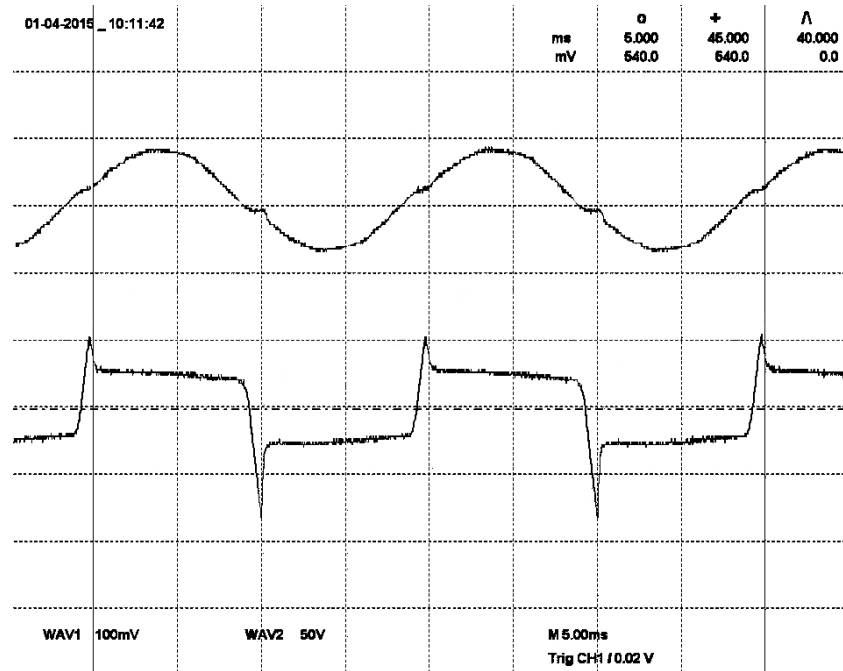
## Přiložené CD

CD obsahuje:

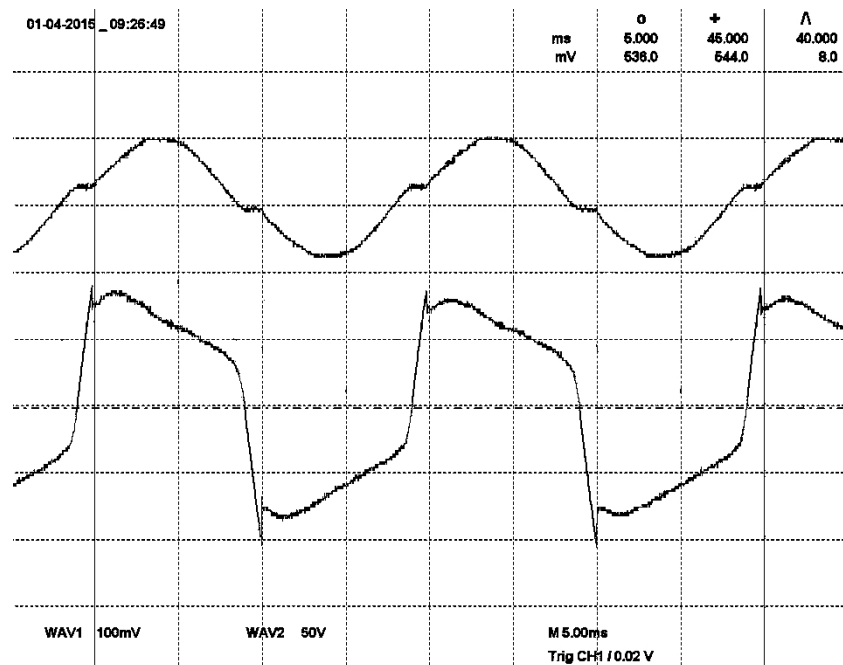
- Diplomovou práci ve formátu pdf (dp\_hugo\_franek.pdf)

Symbol	Meaning	Check / Cause	Measure(s)
	Serial arcing	<p>a)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Smell test: "Smell of plastic"?</li> <li>- Is discolored plastic visible (socket outlet, switch, load)?</li> </ul> <p>b) Switch on the AFD unit again. If tripping is repeated within a short time</p>	<p>a) Disconnect the faulty load from the network → Replace or have repaired</p> <p>b) Disconnect and switch off all the devices (lights) and switch on the AFD unit again → Tripping occurs again: Notify an electrician → No tripping: Switch on and plug in the loads one after the other until tripping occurs → Check whether the device is faulty (notify an electrician if necessary)</p>
	Parallel arcing	<p>c) Switch on the AFD unit again → No repeat tripping within a short time: Does a load have a faulty switch or a damaged cable, or is discoloration visible on / in the wall (maybe in the neighboring room)?</p>	<p>c) Actuate the suspicious switch and wait for the reaction of the AFD unit → Have it repaired by an electrician if necessary.</p> <p>If the cable is faulty → Have it repaired by an electrician.</p> <p>In case of discoloration: Notify an electrician</p> <p>If procedure a) to c) brings no results, it is recommendable to have an electrician check the insulation resistance of the system / loads.</p>
	Overvoltage > 275 V	There was prolonged overvoltage between L and N.	If the fault reoccurs even after switching on the AFD unit once again, you should ask the power supply company whether it knows of any faults in the infeed. If no fault is known, arrange for an electrician to check the system.
	AFD unit not ready	AFD unit has an internal fault.	Call an electrician to test / replace the AFD unit.
	No voltage supply	<p>a) Check whether the general voltage supply is active or</p> <p>b) whether an upstream protective device has interrupted the supply.</p>	<p>a) Wait until the general voltage supply is active again</p> <p>b) Check the cause of the shutdown (notify an electrician if necessary) and switch on the protective device again after the cause is eliminated.</p>

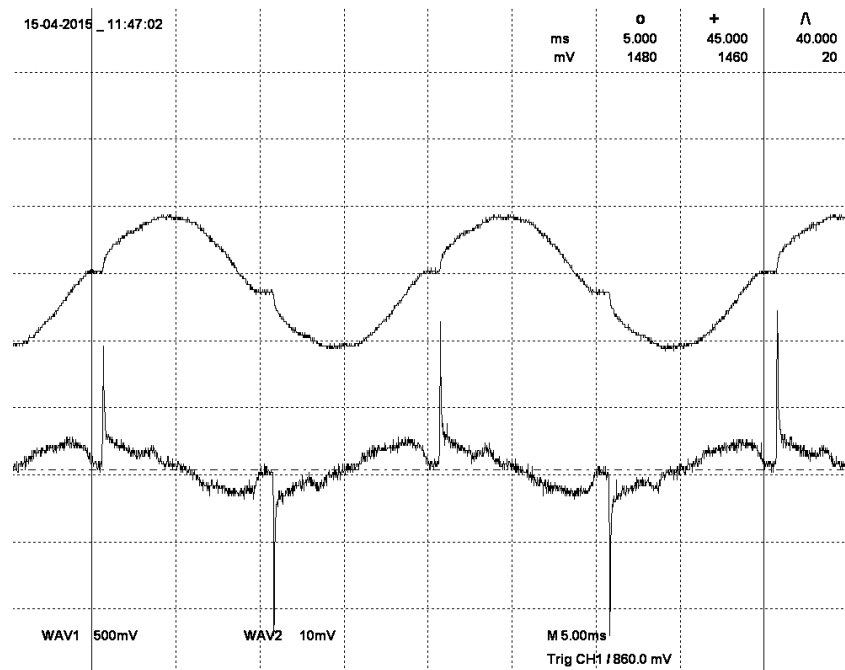
Obrázek A1: Indikátor operačních stavů přístroje Siemens 5SM6 (trvale svítící červená znamená, že je přístroj v provozu, trvale svítící žlutá může znamenat také omezení správné funkce přístroje z důvodu příliš vysokého základního VF šumu), převzato z [7]



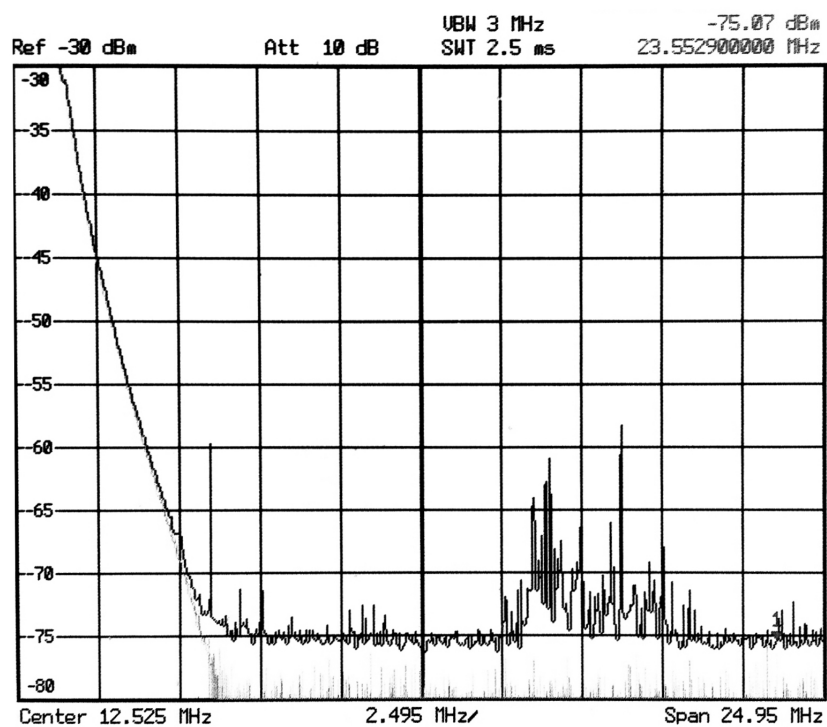
Obrázek B1: Proud procházející obvodem se stabilně hořícím krátkým obloukem při čistě odporové zátěži  $26 \Omega$  a průběh napětí na oblouku



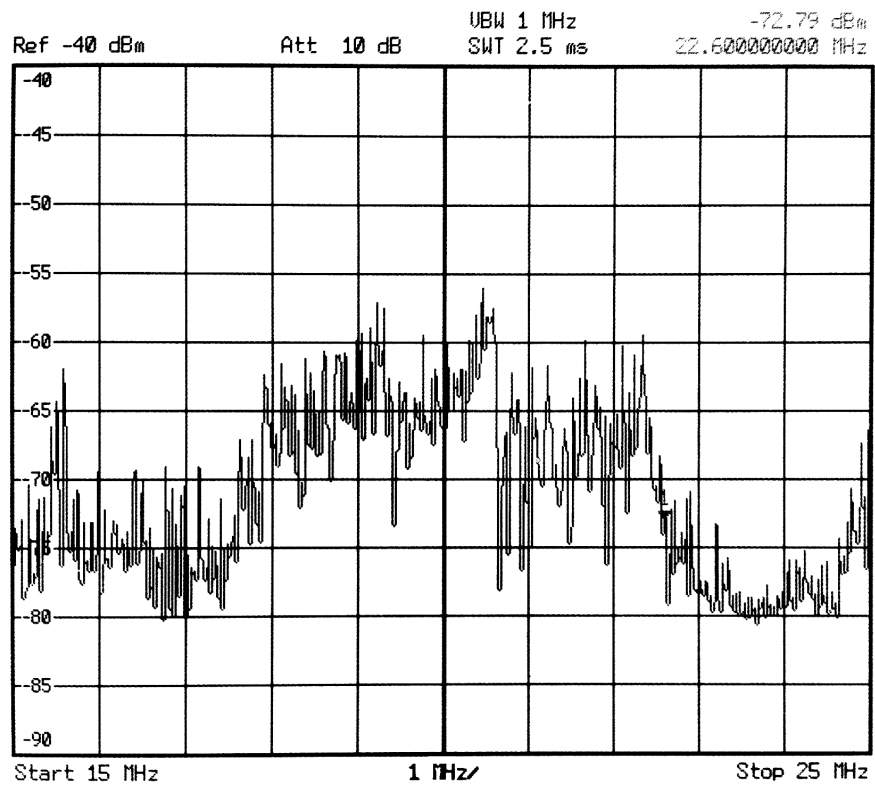
Obrázek B2: Proud procházející obvodem se stabilně hořícím dlouhým obloukem při čistě odporové zátěži  $26 \Omega$  a průběh napětí na oblouku



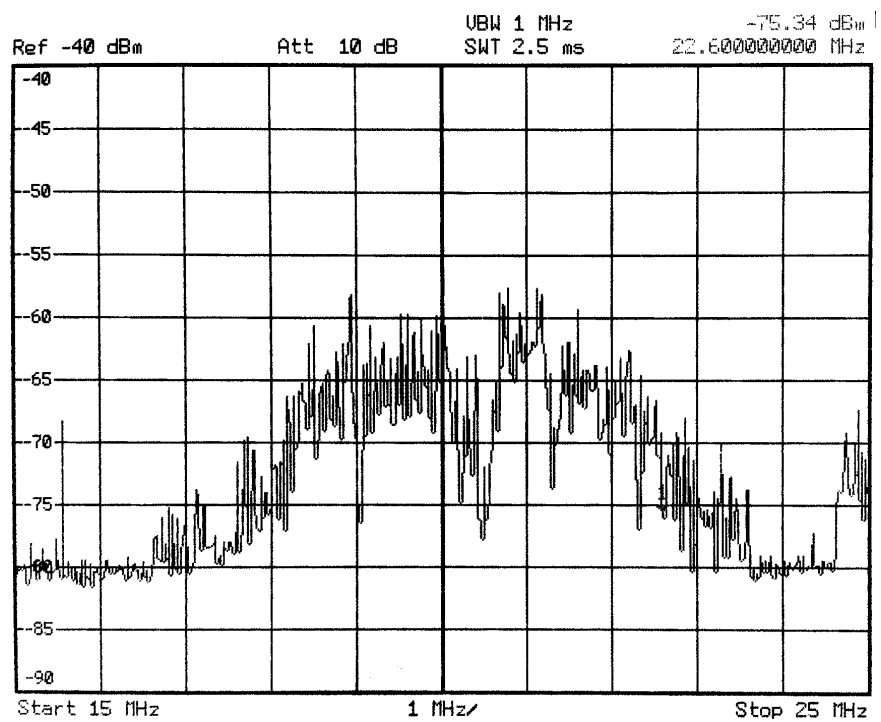
Obrázek B3: Proudý procházející obvodem se stabilně hořícím obloukem při čistě odporové zátěži zachycené sondou Agilent (nahore) a feritovým toroidním transformátorem (dole)



Obrázek B4: Naměřené frekvenční spektrum odpovídající situaci z obr. B3

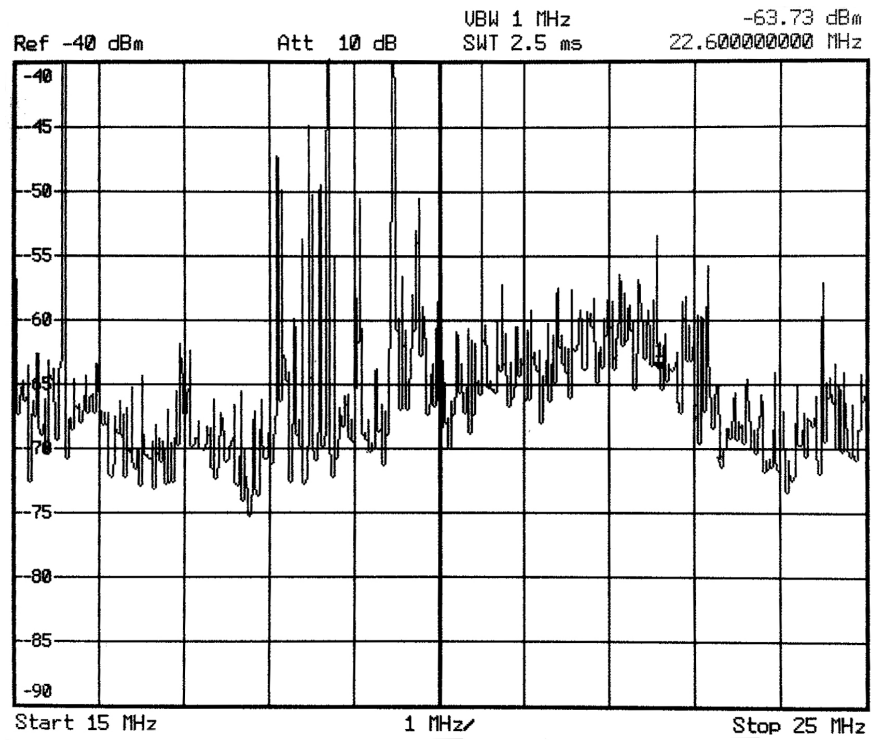


Obrázek C1: Naměřené spektrum při proudu 10 A a vypínacím času AFDD 720 ms

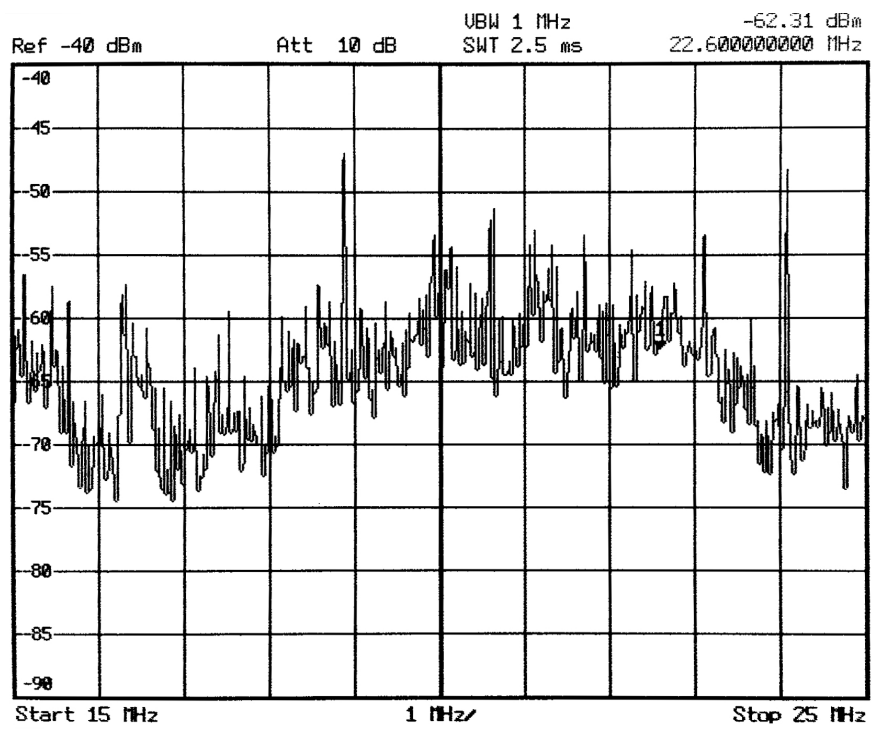


Obrázek C2: Naměřené spektrum při proudu 10 A a vypínacím času AFDD 120 ms

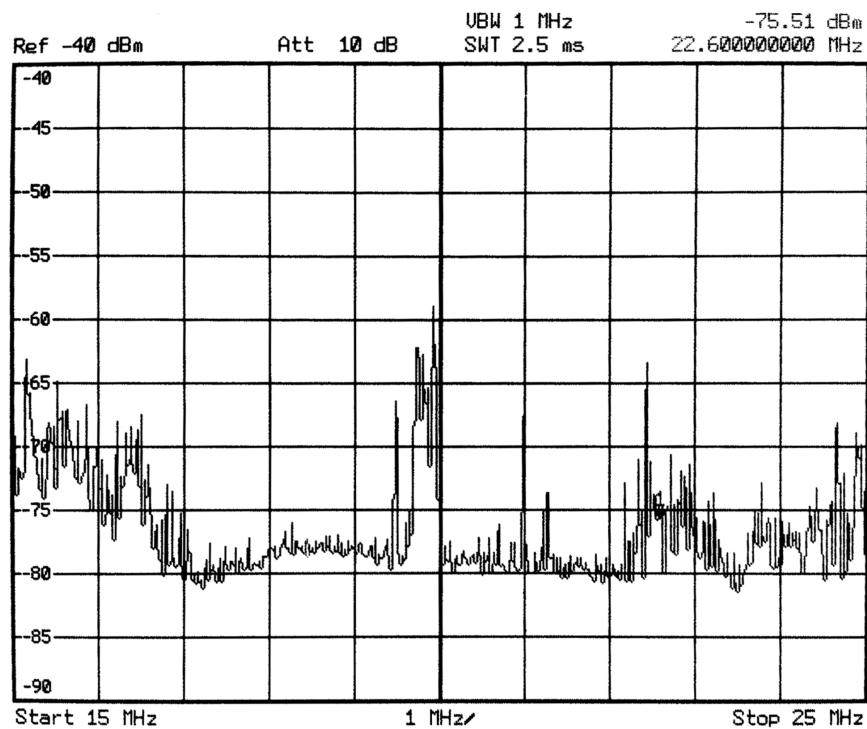




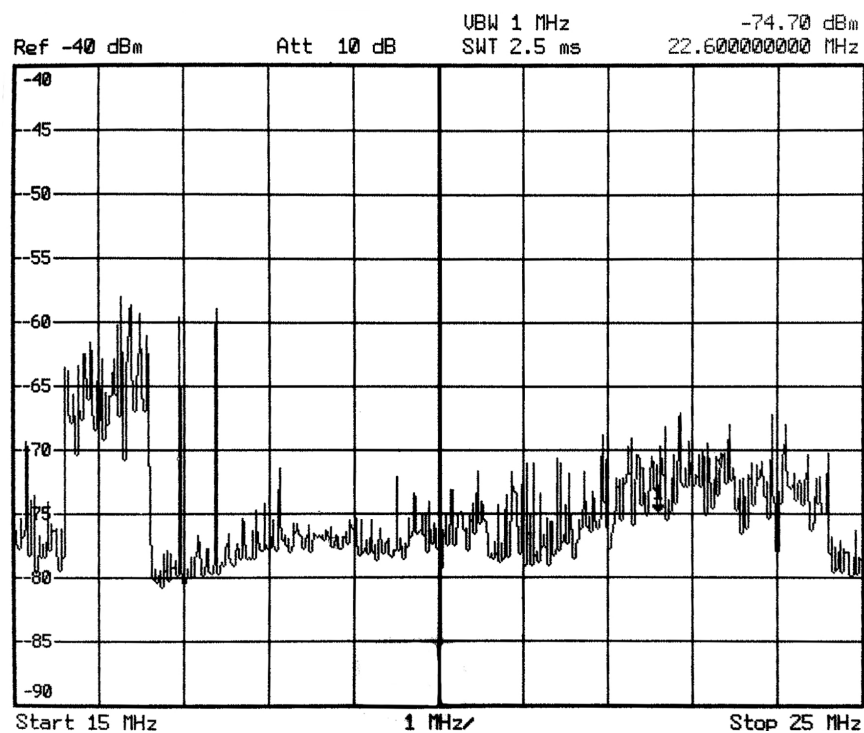
Obrázek C3: 1. naměřené spektrum při proudu 5 A a oblouku v elektrodovém generátoru



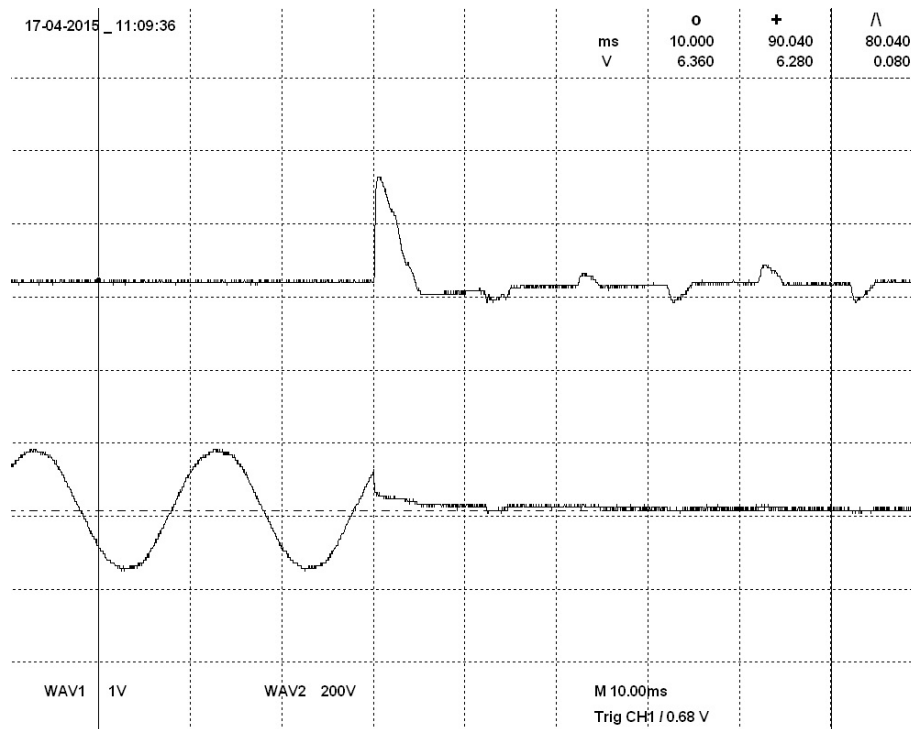
Obrázek C4: 2. naměřené spektrum při proudu 5 A a oblouku v elektrodovém generátoru



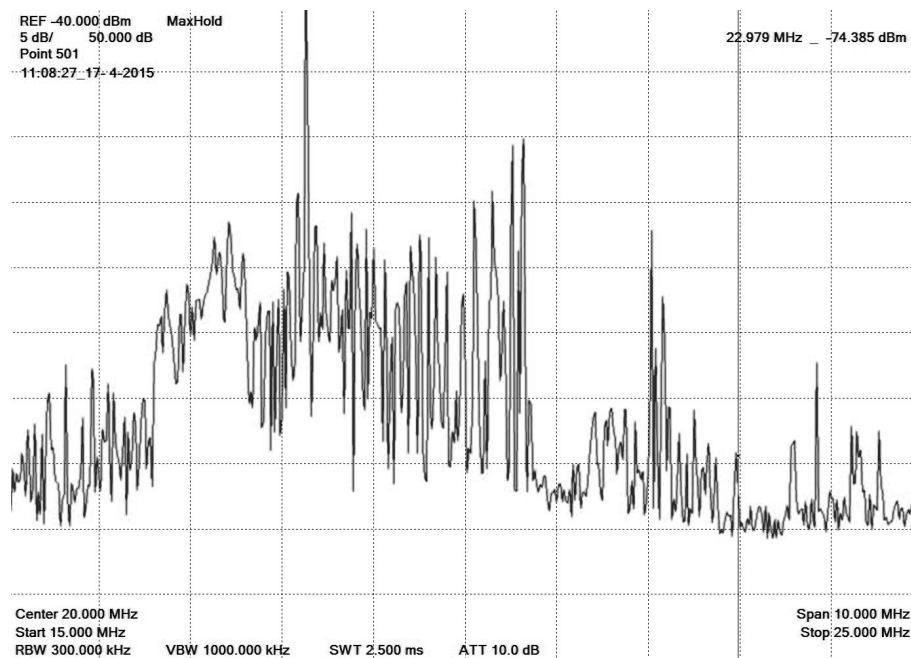
Obrázek C5: 1. naměřené spektrum při proudu 5 A a oblouku v lineárním jiskřišti



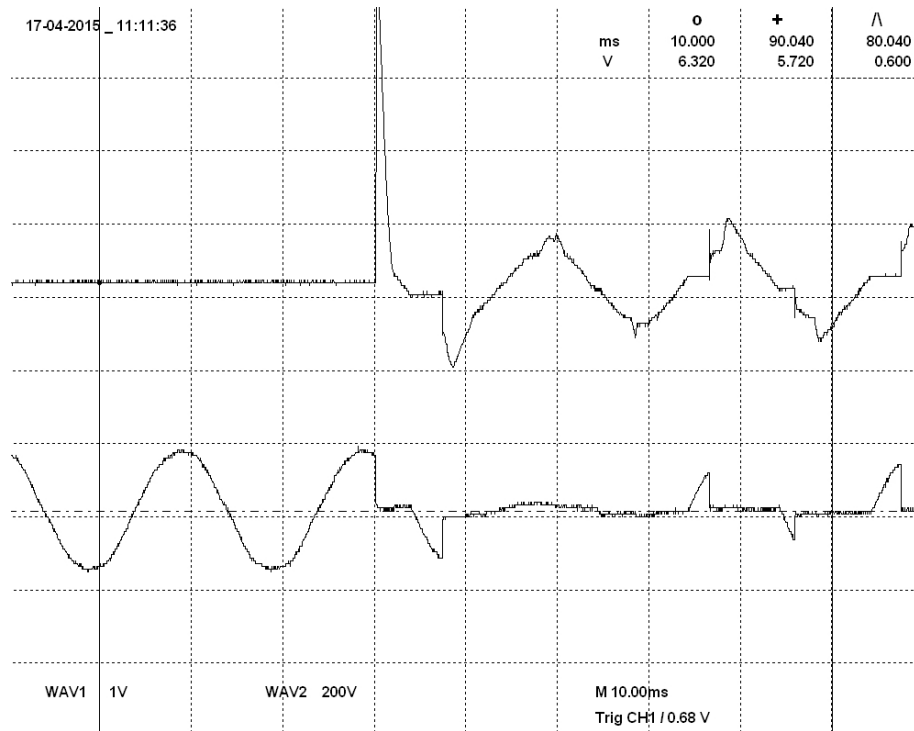
Obrázek C6: 2. naměřené spektrum při proudu 5 A a oblouku v lineárním jiskřišti



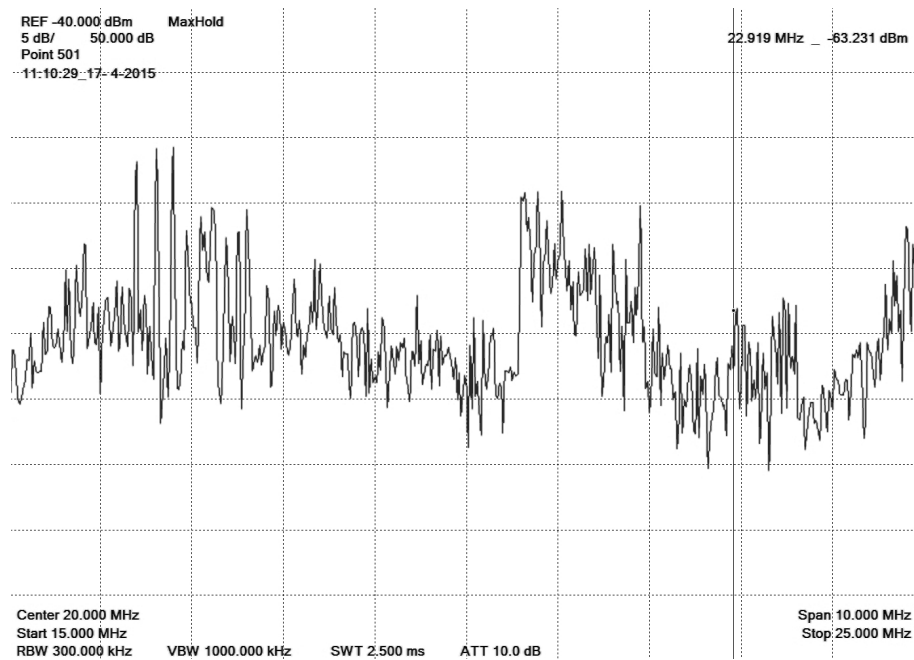
Obrázek C7: Proud procházející obvodem a průběh napětí na oblouku při zapojení spínaného zdroje (X - bez vybavení AFDD)



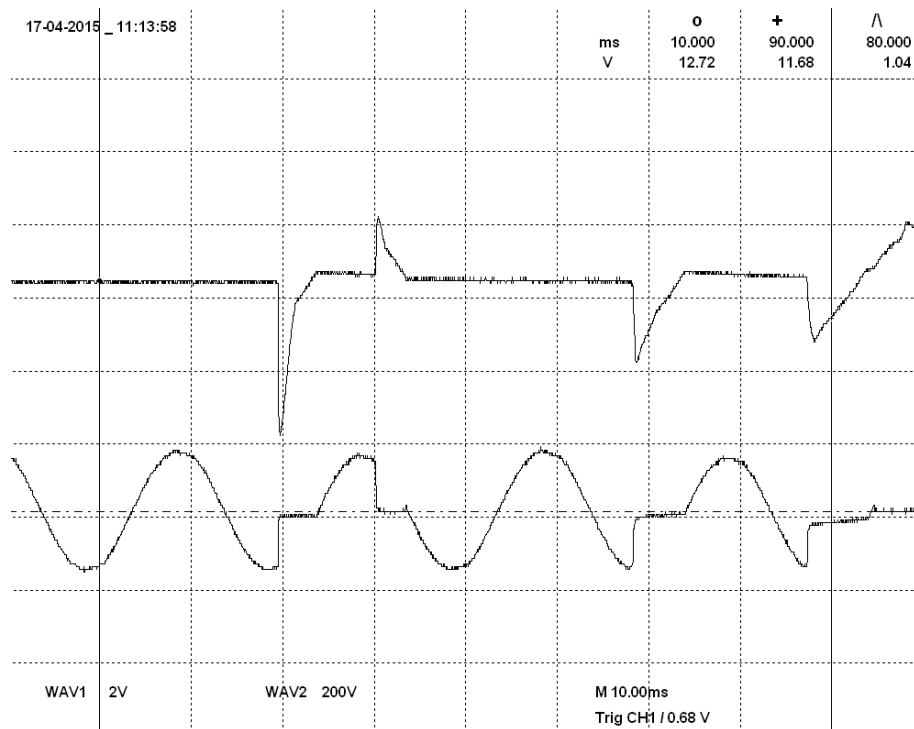
Obrázek C8: Frekvenční spektrum oblouku odpovídající průběhům na obr. C7



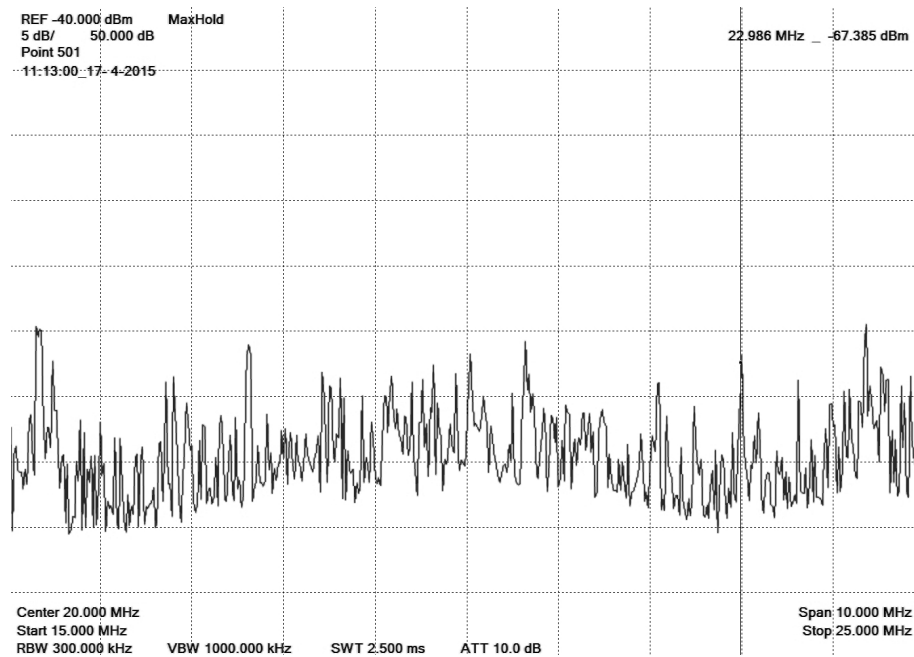
Obrázek C9: Proud procházející obvodem a průběh napětí na oblouku při zapojení spínaného zdroje a odporu  $70 \Omega$  (X - bez vybavení AFDD)



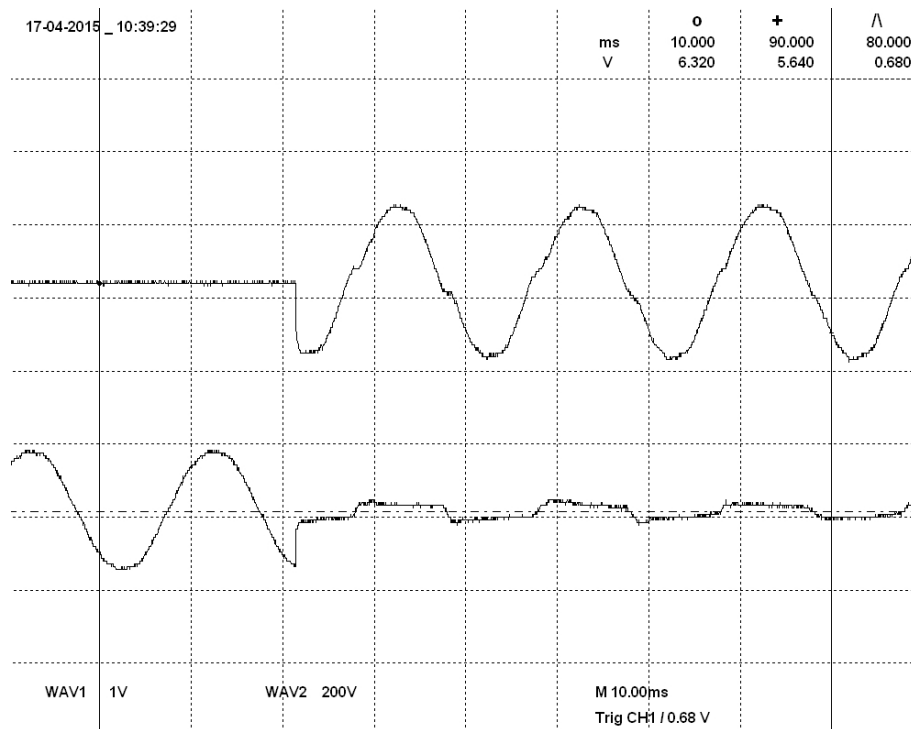
Obrázek C10: Frekvenční spektrum oblouku odpovídající průběhům na obr. C9



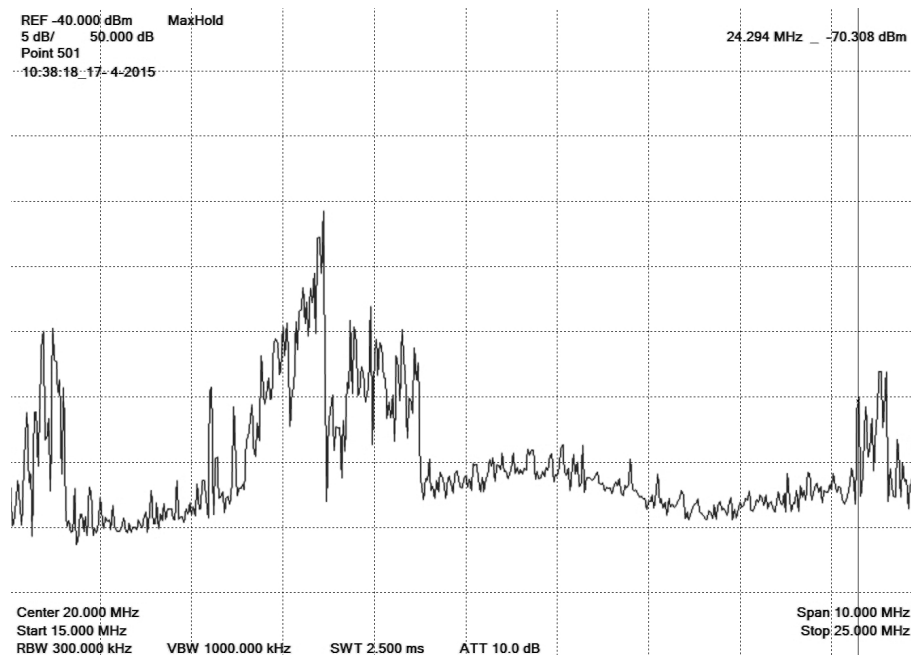
Obrázek C11: Proud procházející obvodem a průběh napětí na oblouku při zapojení spínaného zdroje a odporu  $26 \Omega$  (✓- s vybavením AFDD)



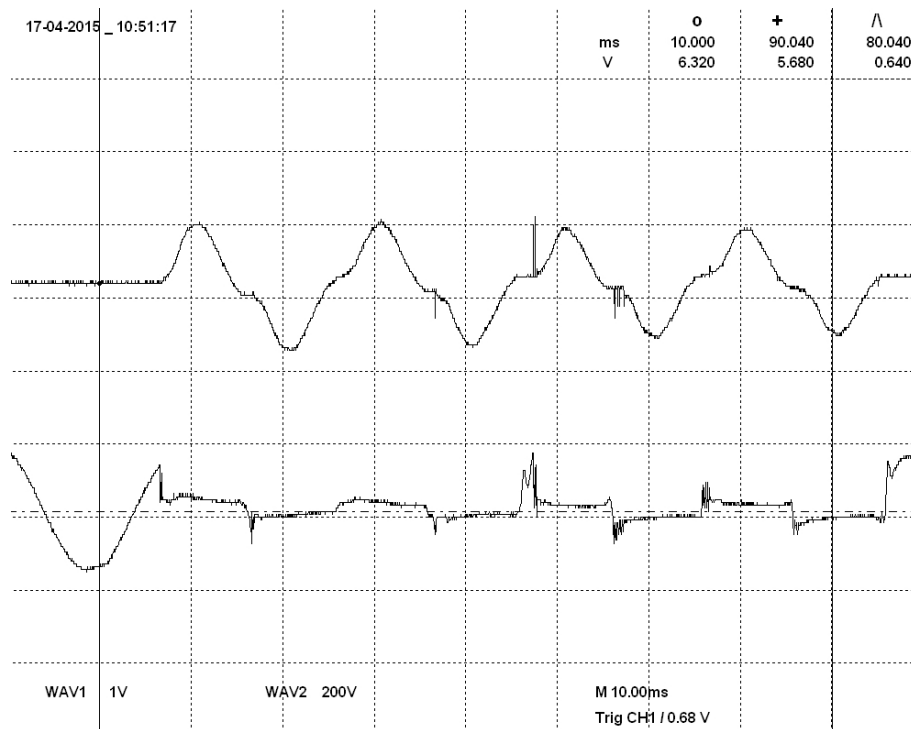
Obrázek C12: Frekvenční spektrum oblouku odpovídající průběhům na obr. C11



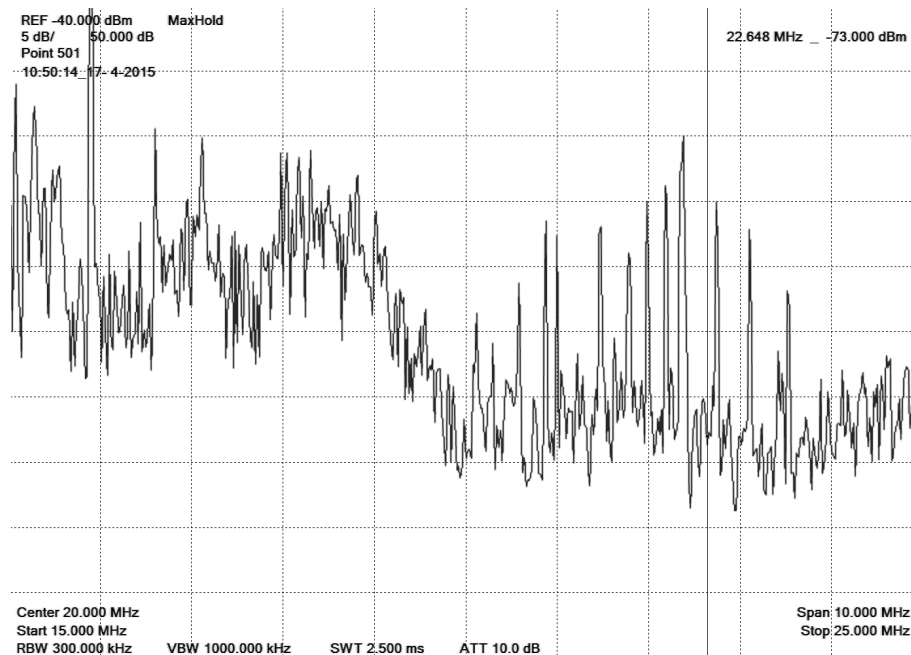
Obrázek C13: Proud procházející obvodem a průběh napětí na oblouku při zapojení fénu a odporu  $70 \Omega$  (✓- s vybavením AFDD)



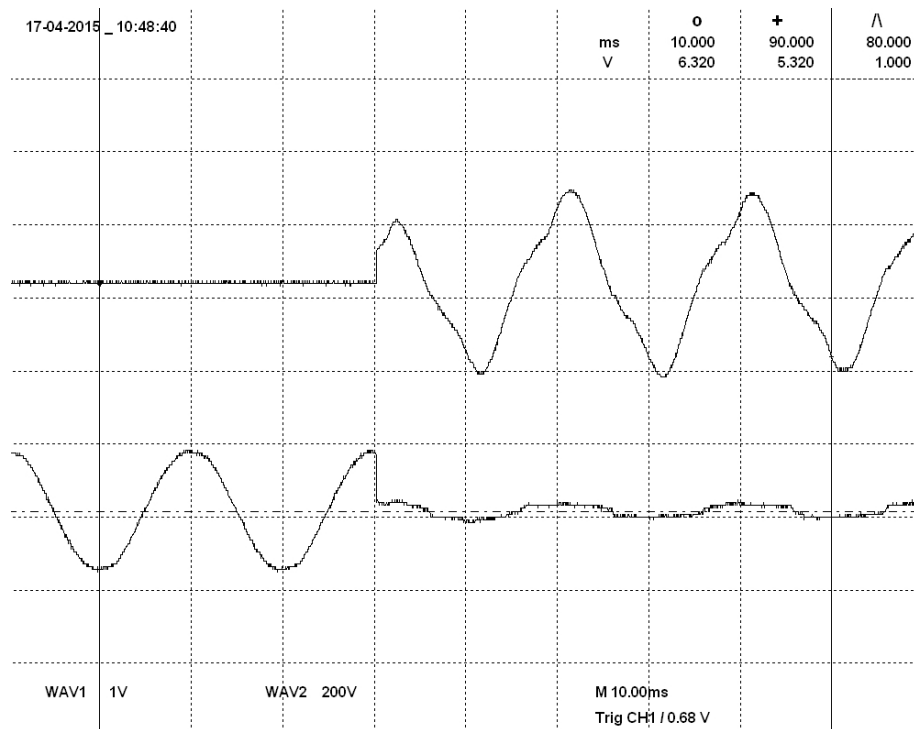
Obrázek C14: Frekvenční spektrum oblouku odpovídající průběhům na obr. C13



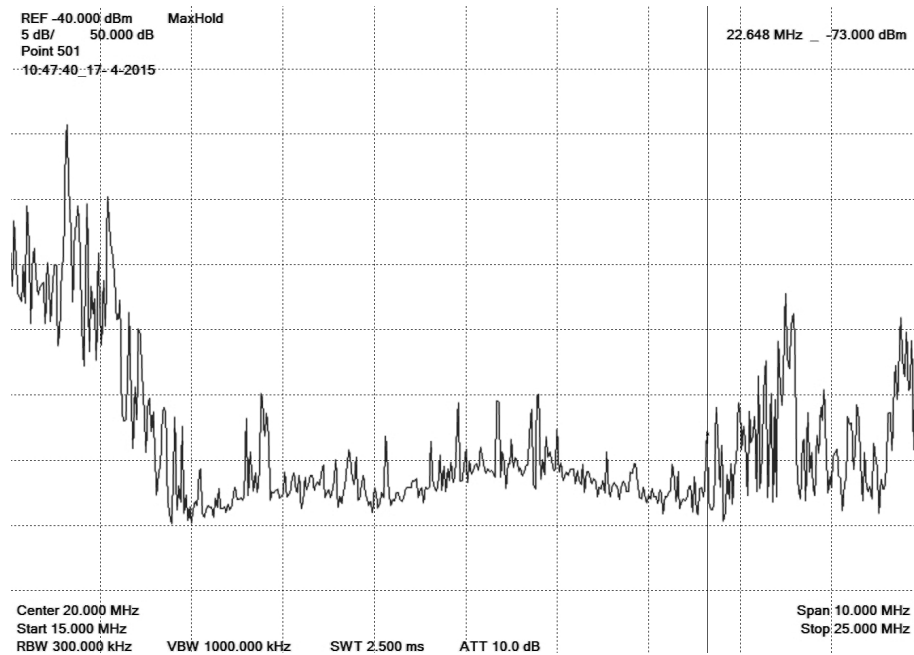
Obrázek C15: Proud procházející obvodem a průběh napětí na oblouku při zapojení vysavače Eta (X - bez vybavení AFDD)



Obrázek C16: Frekvenční spektrum oblouku odpovídající průběhům na obr. C15

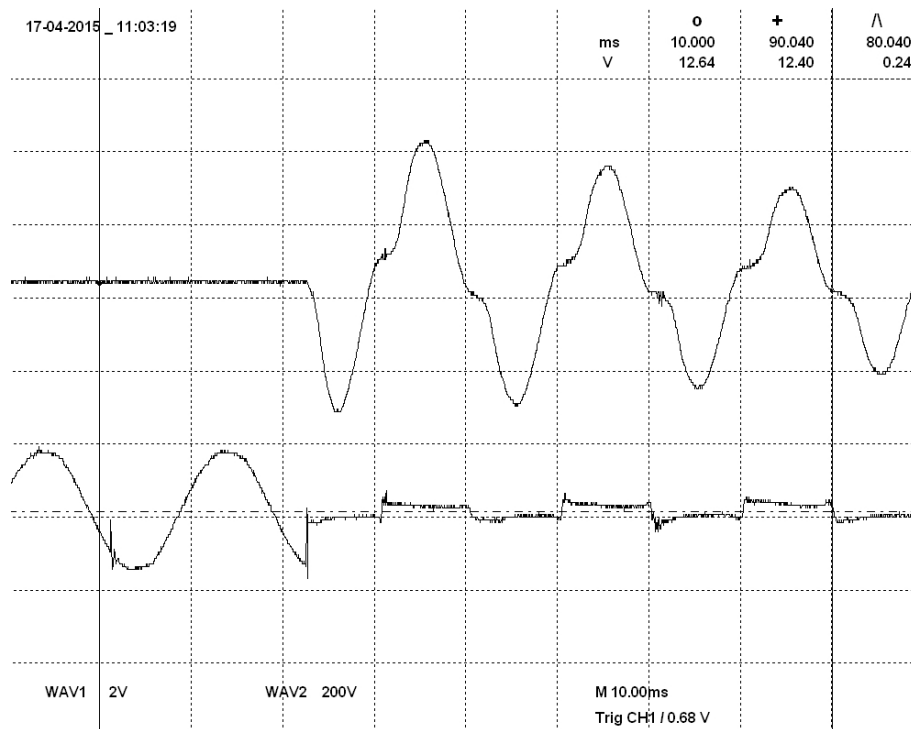


Obrázek C17: Proud procházející obvodem a průběh napětí na oblouku při zapojení vysavače Eta a odporu  $70 \Omega$  (✓- s vybavením AFDD)

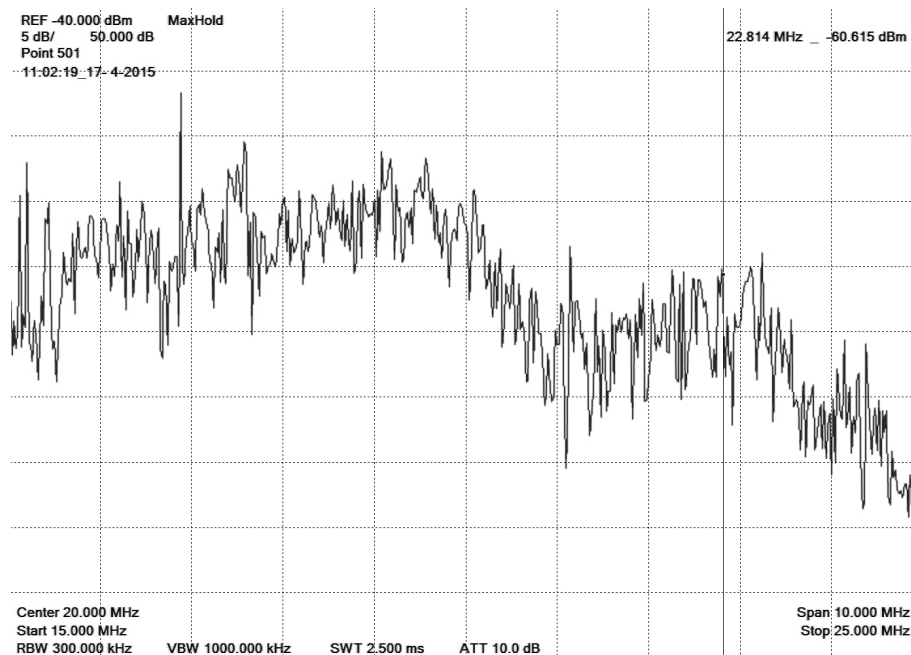


Obrázek C18: Frekvenční spektrum oblouku odpovídající průběhům na obr. C17

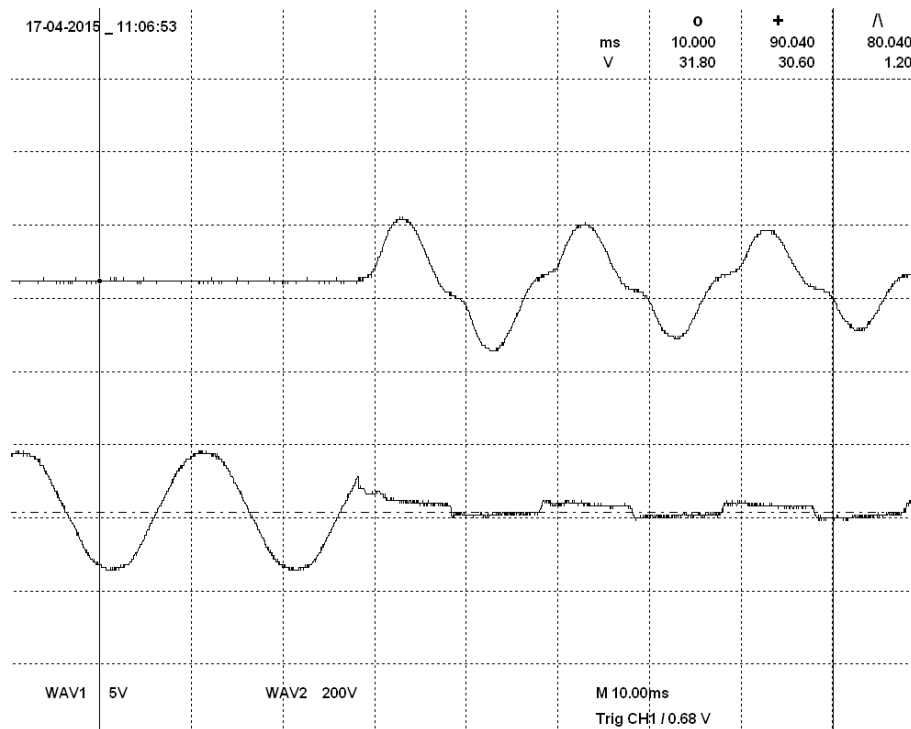




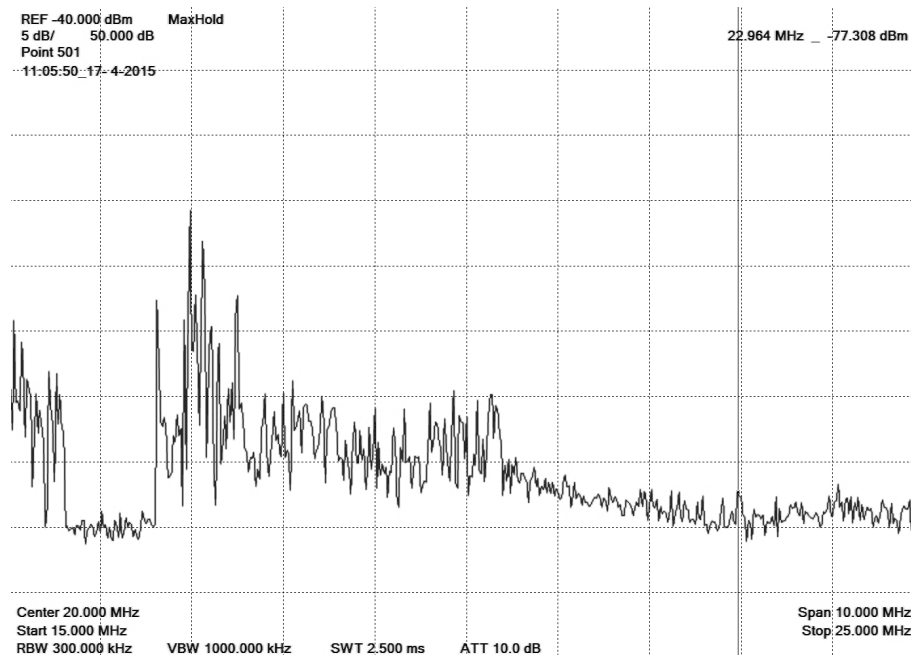
Obrázek C19: Proud procházející obvodem a průběh napětí na oblouku při zapojení vysavače AquaVac (X - bez vybavení AFDD)



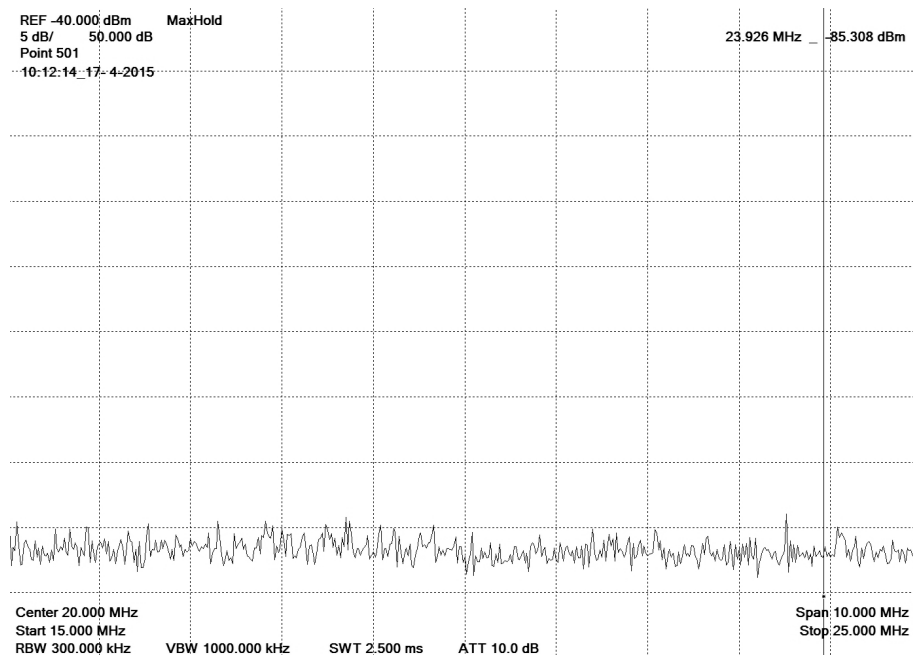
Obrázek C20: Frekvenční spektrum oblouku odpovídající průběhům na obr. C19



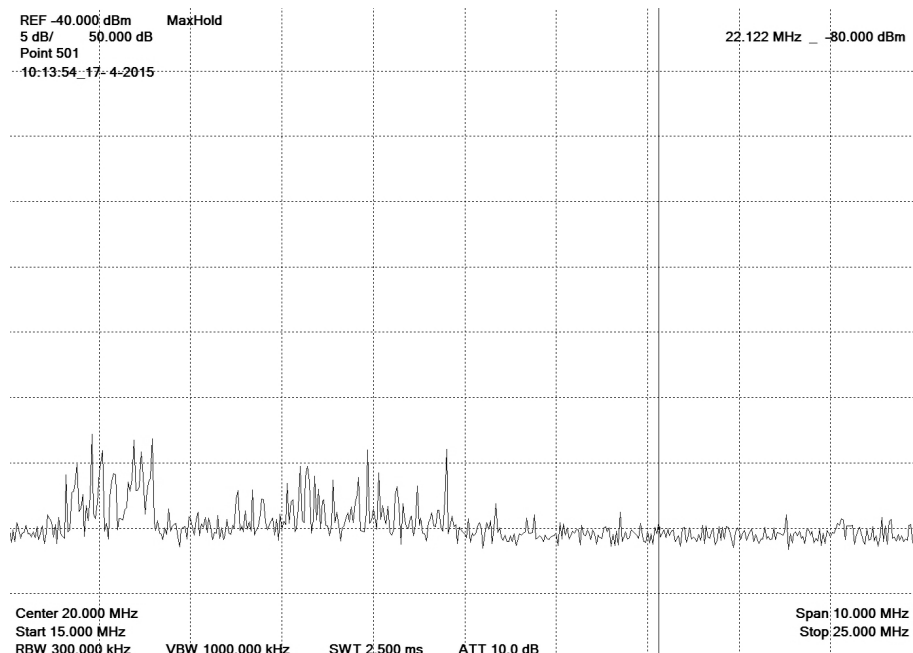
Obrázek C21: Proud procházející obvodem a průběh napětí na oblouku při zapojení obou vysavačů (✓- s vybavením AFDD)



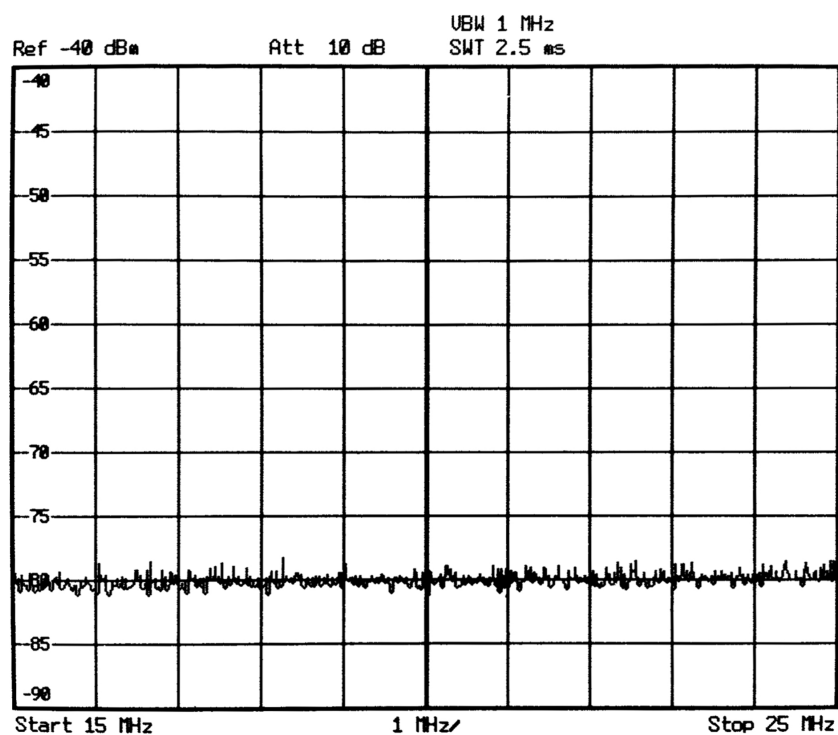
Obrázek C22: Frekvenční spektrum oblouku odpovídající průběhům na obr. C21



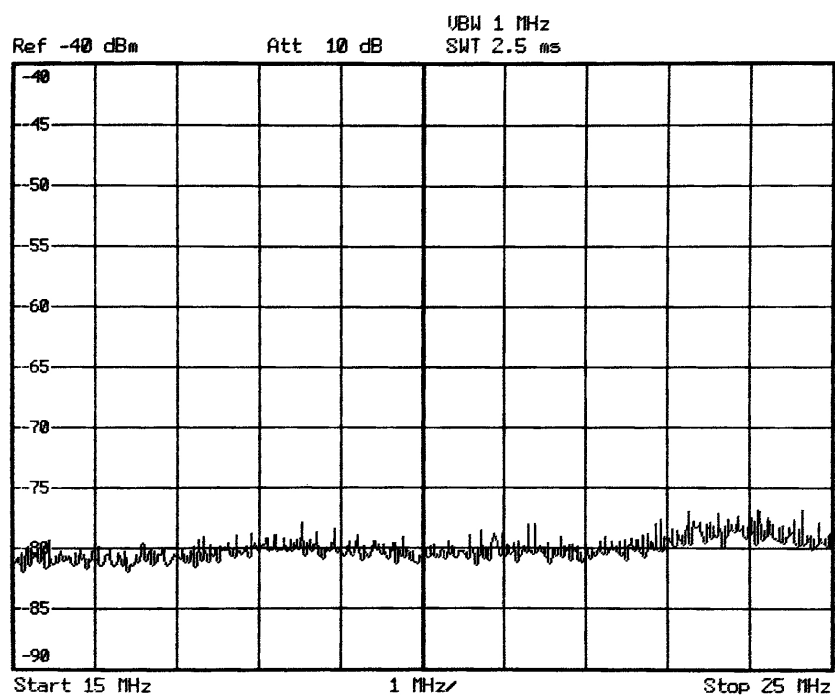
Obrázek C23: Frekvenční spektrum šumu na pozadí (bez výskytu poruchového oblouku), měřeno sondou Rohde & Schwarz



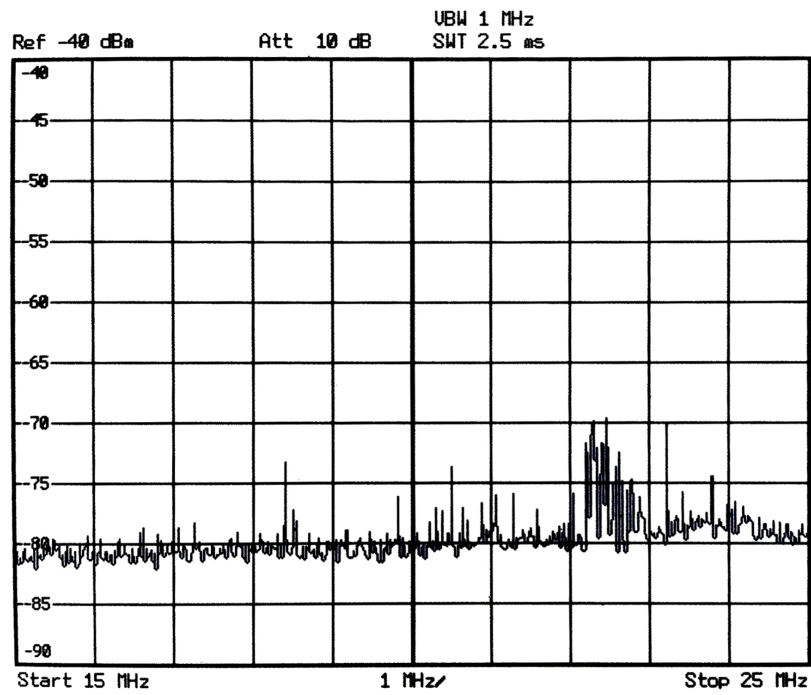
Obrázek C24: Frekvenční spektrum oblouku při při zapojení fénu a odporu 70 Ω (✓ - s vybavením AFDD), měřeno sondou Rohde & Schwarz



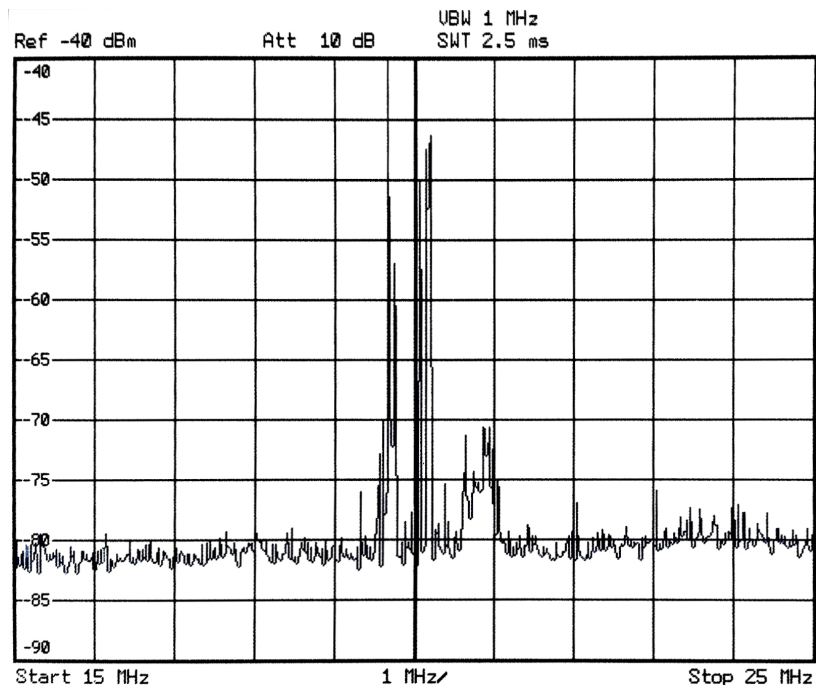
Obrázek D1: Frekvenční spektrum šumu na pozadí (bez výskytu poruchového oblouku), měřeno feritovým toroidním transformátorem



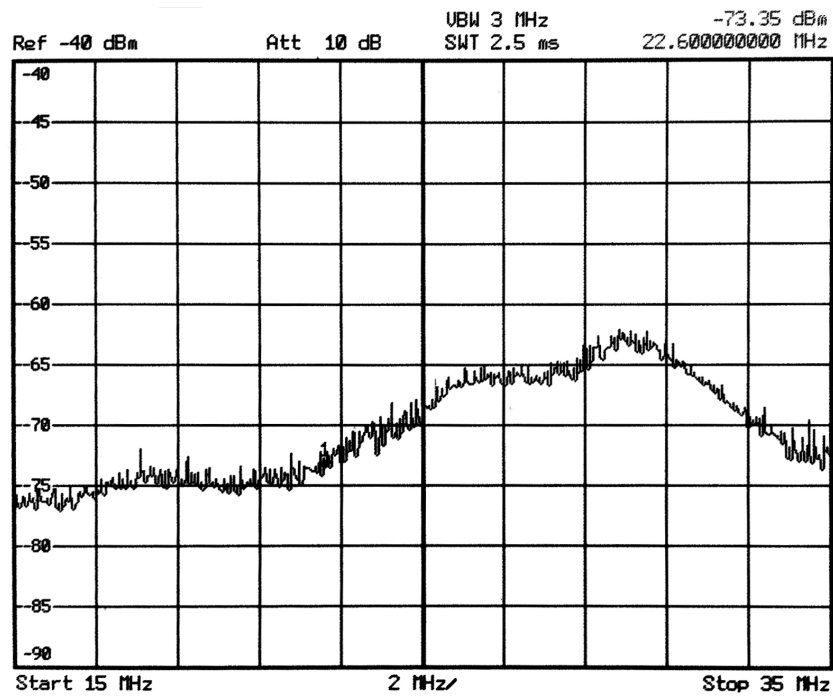
Obrázek D2: Rušivé frekvenční spektrum při běhu fénu (bez výskytu poruchového oblouku)



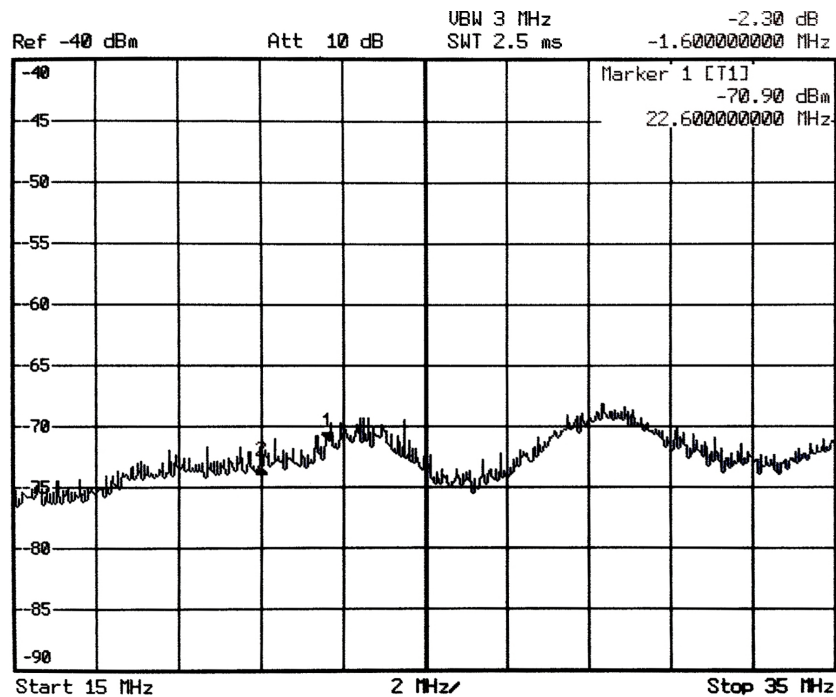
Obrázek D3: Rušivé frekvenční spektrum při běhu vysavače (bez výskytu poruchového oblouku)



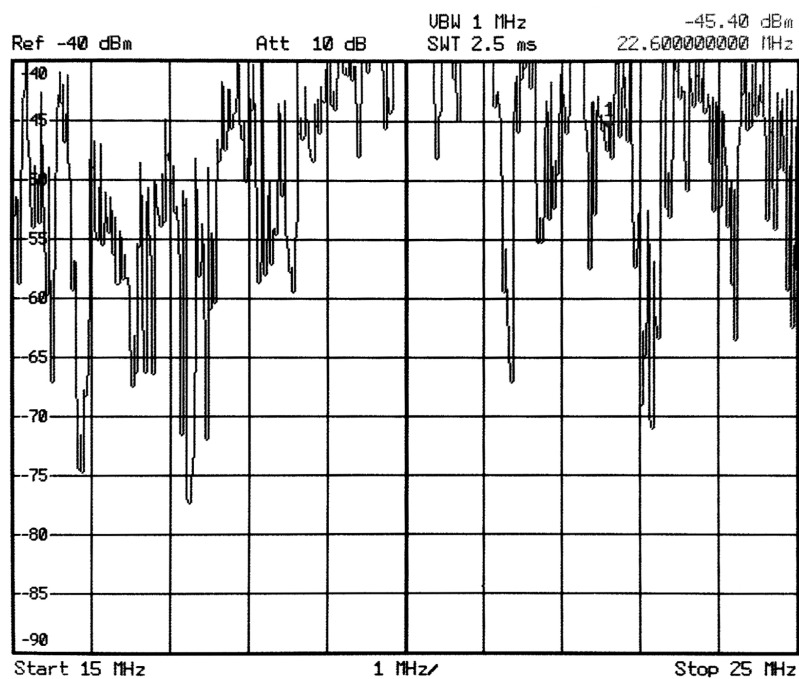
Obrázek D4: Rušivé frekvenční spektrum při spuštění vysavače (bez výskytu poruchového oblouku)



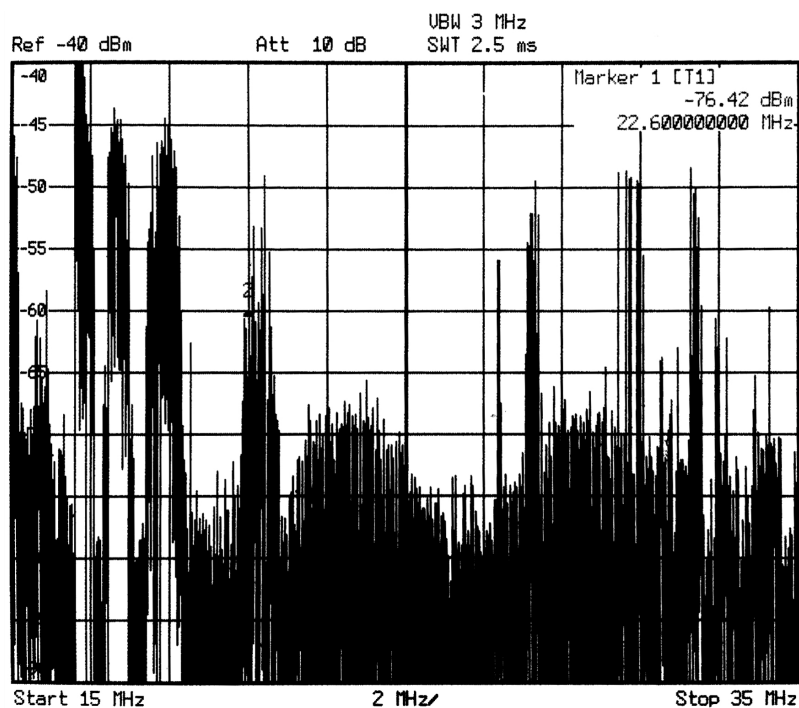
Obrázek D5: Rušivé frekvenční spektrum při běhu spínaného zdroje Emco (bez výskytu poruchového oblouku), upravený rozsah na 15 - 35 MHz



Obrázek D6: Rušivé frekvenční spektrum při běhu spínaného zdroje Hipro pro napájení notebooku (bez výskytu poruchového oblouku), upravený rozsah na 15 - 35 MHz



Obrázek D7: Rušivé frekvenční spektrum při běhu vrtačky (bez výskytu poruchového oblouku)



Obrázek D8: Rušivé frekvenční spektrum při běhu vrtačky s paralelním odporem 140 Ω (bez výskytu poruchového oblouku), vypnuta funkce MaxHold, upravený rozsah na 15 - 35 MHz