VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

VZNIK A DETEKCE ELEKTRICKÉHO OBLOUKU V SÍTÍCH NN
ARISING AND DETECTION OF AN ELECTRIC ARC IN LOW VOLTAGE NETWORKS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. Martin Dubský
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Lukáš Dostál
SUPERVISOR

BRNO 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Martin Dubský ***ID:*** 164721 ***Ročník:*** 2 ***Akademický rok:*** 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Vznik a detekce elektrického oblouku v sítích nn

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte rešerši obecného principu fungování ochrany AFDD.
2. Seznamte se s konkrétním typem ochrany AFDD.
3. Připravte modely různých poruch s využitím MCB, FI a AFDD a ty realizujte.
4. Proveďte všechny potřebné analýzy ve frekvenční oblasti a výsledky přehledně zpracujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Havelka, O. a kol.: Elektrické přístroje, SNTL, 1985

[2] ČSN 33 2000-4-42 ed. 2, Elektrické instalace nízkého napětí - Část 4-42: Bezpečnost - Ochrana před účinkytepla

[3] http://www.oez.cz/aktuality/obloukove-ochrany-afdd

[4] http://eatonelektrotechnika.cz/cz/obloukova-ochrana-afdd.html

Termín zadání: 5.2.2018 ***Termín odevzdání:*** 21.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Dostál ***Konzultant:***

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce se zabývá detekcí elektrického oblouku pomocí přístroje AFDD. Je zde vysvětlena a přiblížena obecná teorie elektrického oblouku. Dále je zde popsán princip fungování přístroje AFDD, popsán konkrétní typ přístroje od firmy OEZ s.r.o. a postup zkoušek tohoto přístroje dle technické normy. V praktické části jsou vybrané zkoušky realizovány a ověřena tak funkce přístroje AFDD při výskytu poruchového elektrického oblouku v obvodu.

Klíčová slova

AFDD, Elektrický oblouk, OEZ, sériový elektrický oblouk, paralelní elektrický oblouk, oblouková ochrana, detekce

Abstract

This thesis deals with arc detection using AFDD. Here is explained the general theory of electric arc. It also describes the principle of operation of the AFDD device, a specific type of instrument from OEZ s.r.o. and describe the test procedure for this instrument according to the technical standard. In the practical part, selected tests are performed and verified the function of the AFDD device in the event of a disturbance electric arc in the circuit.

Keywords

AFDD, Electric Arc, OEZ, Serial electric arc, Parallel electric arc, Arc protection, Detection

Bibliografická citace:

DUBSKÝ, M. *Vznik a detekce elektrického oblouku v sítích nn*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 68s. Vedoucí práce: Ing. Lukáš Dostál.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Vznik a detekce elektrického oblouku v sítích nn jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.
Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne **21. května 2018** Bc. Martin Dubský

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Lukáši Dostálovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 2**1. května 2018** Bc. Martin Dubský

Obsah

1 Úvod ... 1
2 Elektrický oblouk ... 2
2.1 Stejnosměrný oblouk ... 2
2.1.1 Statická V-A charakteristika elektrického oblouku ... 3
2.2 Střídavý elektrický oblouk ... 3
3 Obloukové ochrany afdd ... 5
3.1 Poruchy v elektroinstalaci ... 5
3.1.1 Sériové poruchové oblouky ... 6
3.1.2 Paralelní poruchové oblouky (L-L nebo L-N) ... 7
3.1.3 Paralelní poruchové oblouky (L-PE) ... 8
3.2 Princip fungování AFDD ... 8
3.2.1 Detekce sériových poruchových oblouků pomocí AFDD ... 10
3.2.2 Detekce paralelních poruchových oblouků pomocí AFDD ... 11
3.2.3 Detekce a rozpoznání ostatních provozních poruch ... 12
3.3 Normy spojené s AFDD ... 13
4 Oblouková ochrana afdd ... 14
4.1 Spouště obloukové ochrany ARC ... 14
4.2 Sestava AFDD s proudovým chráničem s nadproudovou ochranou ... 16
4.3 Sestava AFDD s jističem ... 16
4.4 AFDD od firmy EATON ... 17
5 Modely různých poruch podle technické normy: ČSN EN 62606 ... 18
5.1.1 Generátor oblouku ... 18
5.1.2 Vzorek kabelu ... 19
5.2 Zkouška sériového poruchového oblouku ... 20
5.2.1 Případ náhlého výskytu sériového oblouku v obvodu ... 20
5.2.2 Případ zapojení zátěže se sériovým obloukem ... 21
5.2.3 Případ zapnutí do sériového oblouku ... 21
5.3 Zkouška paralelního poruchového oblouku ... 21
5.3.1 Případ výskytu paralelního poruchového oblouku s omezeným proudem ... 22
5.3.2 Případ výskytu paralelního poruchového oblouku a zkouška řezání kabelu 22
5.3.3 Případ výskytu paralelního poruchového oblouku proti zemi ... 23
5.4 Zkouška rušení z maskovacích zátěží ... 24
5.5 Zkouška nežádoucího vypnutí ... 25
5.5.1 Případ vzájemného ovlivnění přístrojů ... 25
5.5.2 Případ s různými rušivými zátěžemi ... 26
6 Testovací přípravky použité pro vznik oblouku ... 27

6.1 Testovací vzorek kabelu ... 27
6.2 Jiskřiště ... 29
6.3 Generátor oblouku ... 29
7 Praktické měření s přístrojem AFDD ... 31
7.1 Analýza obvodu s elektrickým obloukem ... 31
7.2 Zkušební obvod s generátorem oblouku ... 34
7.3 Zkušební obvod s připojeným vzorkem kabelu ... 37
7.4 Zkušební obvod s připojeným jiskřištěm ... 41
7.4.1 Náhlé objevení sériového oblouku v obvodu (ARC-16-1N-3M + LTE B16) 43
7.4.2 Zapojení zátěže se sériovým obloukem (ARC-16-1N-3M + LTE B16) 45
7.4.3 Zapnutí do sériového oblouku (ARC-16-1N-3M+ LTE B16) ... 46
7.4.4 Náhlé objevení sériového oblouku v obvodu (ARC-16-1N-3M + OLI-16B-1N-030A) ... 46
7.4.5 Náhlé objevení sériového oblouku v obvodu (ARC-40-1N-3M + LTE B40) 47
7.5 Analýza naměřených dat ve frekvenční oblasti ... 48
8 Závěr ... 50
Literatura ... 52
Seznam symbolů, veličin a zkratek ... 53
Seznam příloh ... 54

Seznam obrázků

Obr. 2.1:Statická V-A charakteristika elektrického oblouku [1] 3
Obr. 2.2: Průběh napětí a proudu v oblouku hořícím v obvodu napájeném střídavým proudem spolu s dynamickou charakteristikou [8] 4
Obr. 2.3: Změna tvaru dynamické charakteristiky v závislosti na kmitočtu nap. proudu [8] 4
Obr. 3.1: Poruchy 1 [2] 5
Obr. 3.2: Poruchy 2 [2] 6
Obr. 3.3: Poruchy 3 [2] 6
Obr. 3.4: Sériový poruchový oblouk [2] 6
Obr. 3.5: Zapálení sériového poruchového oblouku [2] 7
Obr. 3.6: Paralelní poruchový oblouk L-L a L-N [2] 8
Obr. 3.7: Paralelní zkrat L-PE [2] 8
Obr. 3.8: Schéma znázorňující princip AFDD [2] 9
Obr. 3.9: Detekce sériového poruchového oblouku [2] 10
Obr. 3.10: Detekce paralelního poruchového oblouku [2] 12
Obr. 3.11: Různé faktory při detekci oblouku a VF šum [2] 13
Obr. 4.1: Oblouková ochrana ARC 16 A a jistič LTN 16 A char. B [6] 14
Obr. 4.2: Spoušť obloukové ochrany ARC [5] 15
Obr. 4.3: Spoušť ARC spolu s proudovým chráničem OLE/OLI vlevo a ARC spolu s jističem LTN/LTE vpravo [2] 16
Obr. 4.4: AFDD 16/2/B/003-A od firmy EATON [11] 17
Obr. 5.1: Generátor oblouků 19
Obr. 5.2: Vzorek kabelu 19
Obr. 5.3: Schéma zapojení pro zkoušku sériového poruchového oblouku 20
Obr. 5.4: Schéma zapojení pro zkoušku paralelního poruchového oblouku 22
Obr. 5.5: Zkušební přístroj pro řezání kabelu 23
Obr. 5.6: Schéma pro zkoušku paralelního poruchového oblouku proti zemi 23
Obr. 5.7: Schéma zapojení zkoušky maskovacích zátěží 25
Obr. 5.8: Schéma pro nežádoucí vypnutí – vzájemné ovlivnění přístrojů 26
Obr. 6.1: Postup výroby testovacího vzorku kabelu 27
Obr. 6.2: Karbonizovaná vodivá dráha na vzorku kabelu 28
Obr. 6.3: Karbonizace vzorku kabelu 28
Obr. 6.4: Jiskřiště 29
Obr. 6.5: Generátor oblouku 30
Obr. 7.1: Průběh napětí a proudu na oblouku při I_{z2} = 13,8 A; a_{obl} = 2,8 mm 32
Obr. 7.2: Frekvenční spektrum oblouku při I_{z2} = 13,8 A 33

Obr. 7.3: Průběh vypínání sér. oblouku s uhlíkovou elektrodou s měděným pláštěm (8A) ... 35
Obr. 7.4: Průběh vypínání sér. oblouku s měděným vodičem (9,5 A) ... 35
Obr. 7.5: Průběh vypínání sér. oblouku s měděným vodičem (12 A) ... 36
Obr. 7.6: Průběh vypínání sér. oblouku s měděným vodičem (16 A) ... 36
Obr. 7.7: Schéma zapojení zkušebního obvodu s připojeným vzorkem kabelu ... 37
Obr. 7.8: Měřící pracoviště ... 38
Obr. 7.9: Průběh proudu v obvodu po připojení přípravku ... 39
Obr. 7.10: Průběh proudu oblouku s nízkou stabilitou ... 39
Obr. 7.11: Průběh efektivní hodnoty proudu obloukem ... 40
Obr. 7.12: Detail okamžiku vypnutí obvodu přístrojem AFDD ... 40
Obr. 7.13: Zkušební obvod s připojeným jiskřištěm ... 41
Obr. 7.14: Zapálený sériový oblouk v jiskřišti ... 41
Obr. 7.15: Opálená lanka vodiče kabelu H05VV-F ... 42
Obr. 7.16: Průběh efektivní hodnoty proudu obloukem (první pokus; 2,5 A) ... 44
Obr. 7.17: VF složka proudu oblouku při 9,39 A (ARC-16-1N-3M + OLI-16B-1N-030A) ... 49

Seznam tabulek

Tabulka 1: Provozní stavy ukazatele LED obloukové ochrany ARC 15
Tabulka 2: Maximální hodnoty doby vypínání do 63 A [3] 18
Tabulka 3: Maximální počet půl period hoření oblouku během 0,5 s nad 63 A [3] 18
Tabulka 4: Naměřené hodnoty oblouku při I_{z1} = 9,4 A 31
Tabulka 5: Naměřené hodnoty oblouku při I_{z2} = 13,8 A 32
Tabulka 6: Naměřené hodnoty oblouku při I_{z3} = 19 A 32
Tabulka 7: Náhlé objevení sériového oblouku v obvodu (ARC-16-1N-3M + LTE B16) 44
Tabulka 8: Zapojení zátěže se ser. obloukem (ARC-16-1N-3M + LTE B16) 45
Tabulka 9: Zapnutí do sériového oblouku (ARC-16-1N-3M + LTE B16) 46
Tabulka 10: Náhlé objevené sér. oblouku v obvodu (ARC-16-1N-3M + OLI-16B-1N-030A) 47
Tabulka 11: Náhlé objevení sér. oblouku v obvodu (ARC-40-1N-3M + LTE B40) ... 48

1 ÚVOD

Proudové chrániče, jističe nebo pojistky, nejsou schopné v některých případech ochránit před vzplanutím a šířením požáru od poruchy v elektrické instalaci. Tento případ nastává při výskytu sériových nebo paralelních poruchových oblouků mezi živými vodiči. V současné době existuje částečná ochrana proti paralelním poruchovým obloukům, ale ochrana proti sériovým poruchovým obloukům těmito přístroji není možná. Oblouková ochrana AFDD, která umí detekovat jak paralelní, tak sériový poruchový oblouk, tuto mezeru v ochraně osob a majetku v domovních rozvodech úspěšně vyplňuje a stanovuje tak nový trend v této oblasti. K dnešnímu dni je tento způsob ochrany ze zákona povinný například v Německu nebo na Slovensku.

Oblouková ochrana byla vyvinuta na základě podnětů z USA, kde byly domovní rozvody (zejména 120 V) realizovány dvoužilově, bez ochranného uzemňovacího vodiče. Tím byla omezena možnost využití proudových chráničů k částečné ochraně proti vzniku požáru [12].

Cílem této práce je ukázat možnosti detekce elektrického oblouku v sítích NN pomocí obloukové ochrany AFDD a zamezení tak potencionálnímu vzniku požáru na elektrické instalaci. Pro tuto práci byla vybrána oblouková ochrana od firmy OEZ s.r.o.. Společnost dodává tuto ochranu ve „stavebnicovém“ provedení, a to v kombinaci spouště obloukové ochrany ARC a jističe LTN/LTE nebo proudového chrániče s nadproudovou ochranou OLI/OLE.

V praktické části této práce jsou popsané vybrané realizované zkoušky AFDD dle příslušné normy, které simulují skutečné poruchy vyskytující se na běžné domácí elektroinstalaci.

2 ELEKTRICKÝ OBLOUK

Fyzikální jev nazývaný elektrický výboj je ve většině případů krátkodobý jev, kdy se izolant vlivem vysoké teploty stává vodičem elektrického proudu. Pro vznik výboje v plynném dielektriku jsou zapotřebí nabité částice (elektrony a ionty) mezi elektrodami a přítomné napětí na samotných elektrodách. Dle napětí na elektrodách a velikosti proudu procházející výbojovou drahou lze elektrické výboje dělit na: korónový výboj, temný výboj, jiskrový výboj, doutnavý výboj a obloukový výboj [8].

Elektrický oblouk je tedy výboj, který hoří v plynném dielektriku mezi elektrodami a pokud není žádným zásahem přerušen, je schopen hořet libovolnou dobu. Tento oblouk vyzařuje velké množství energie. Jeho jádro tvoří plazma, tedy vysoce ionizovaný plyn, kterým protéká elektrický proud. Jádro oblouku má velkou proudovou hustotu (řádově MA/m^2) a také vysokou teplotu (pokud je oblouk přirozeně chlazen, dosahuje jeho teplota až 5–15 tisíc °C). Mezi další znaky elektrického oblouku patří také intenzivní světelné vyzařování. Obloukové napětí mezi elektrodami je vzhledem k napětí zdroje malé, obvykle okolo deseti procent [1].

Během vzniku oblouku dochází k termické nerovnováze (elektrony, ionty a neutrální atomy nemají stejnou teplotu). Vznik oblouku je velmi rychlý (řádově 10 μs) přechodem z korónového výboje. Poté je plazma oblouku v termické rovnováze a ionizační pochody jsou v rovnováze s rekombinačními. Zaniká-li oblouk, začnou převládat rekombinační pochody [8].

Teplo z oblouku je odváděno třemi způsoby. Jedná se o přestup tepla vedením (do elektrod), velká část tepla je odváděna prouděním a část tepla je odváděna také zářením [1].

V závislosti na napětí v obvodu, kde oblouk hoří, dělíme oblouky na stejnosměrné a střídavé. Stejnosměrný oblouk je označován jako statický a popisuje ho statická V-A charakteristika (závislost napětí mezi elektrodami na proudem protékající obloukem). Jak název napovídá, střídavý oblouk je proměnný s časem a jeho charakteristika je označována jako dynamická [1].

2.1 Stejnosměrný oblouk

Stejnosměrný oblouk považujeme za statický. Lze ho vytvořit pomocí spojení dvou elektrod připojených na stejnosměrné napětí (spolu se stabilizačním rezistorem v sérii, pro zamezení vzniku zkratu na zdroji). Po tomto spojení dojde k přehřátí elektrod s následkem zapálení oblouku. Následným oddalováním elektrod hoří oblouk v parách vycházejících z elektrod a v částicích vzduchu. Oddalování elektrod má také za následek zvětšení odporu oblouku a tím i jeho napětí. Teplotu samotného

oblouku ovlivňuje tlak okolních plynů, kdy se zvyšujícím se tlakem teplota oblouku roste [7].

Oblouk tedy vznikne přehřátím místa dotyku na katodě (teplota anody není tolik důležitá pro zapálení), a to při minimálním napětí 15 až 20 V.

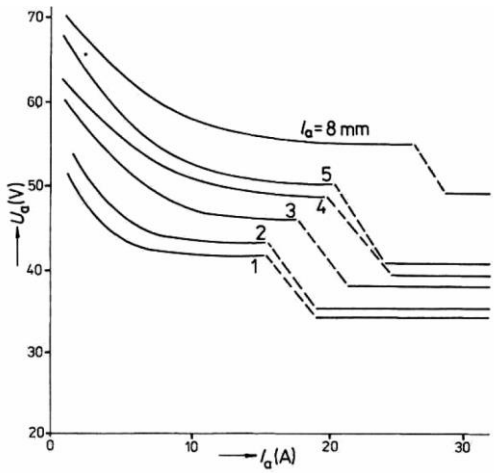
2.1.1 Statická V-A charakteristika elektrického oblouku

Jak už bylo výše zmíněno, statickou V-A charakteristikou je označována závislost napětí mezi elektrodami na proudu protékajícím obloukem *(Obr. 2.1)*. Obecně se dělí na dvě části. Její klesající část, která má tvar hyperboly, vyznačuje oblast malých proudů. Přímková část vyznačuje oblast velkých proudů.

Pro oblast malých proudů a krátkých oblouků empiricky odvodila Ayrtonová rovnici pro popis charakteristiky:

$$U_a = \alpha + \beta \cdot l_a + \frac{\gamma + \delta \cdot l_a}{I_a} \tag{1.1}$$

kde I_a je proud, který prochází obloukem, l_a je délka oblouku a α, β, γ, δ jsou konstanty závisející na tlaku a druhu plynu, na materiálu, tvaru a rozměrech elektrod. Výsledky měření Ayrtonové lze vidět na níže uvedené V-A charakteristice (Obr. 2.1) [8].



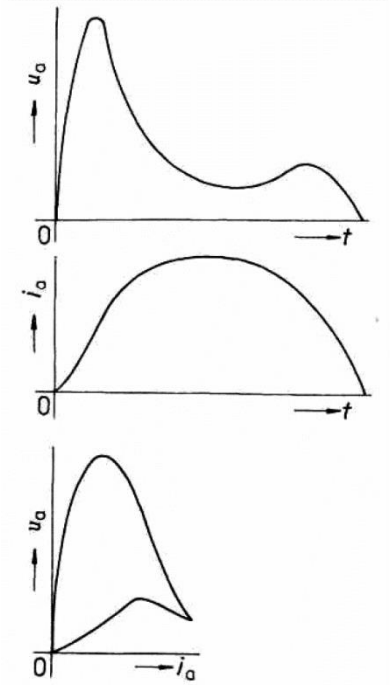
Obr. 2.1:Statická V-A charakteristika elektrického oblouku [1]

2.2 Střídavý elektrický oblouk

Střídavý elektrický oblouk napájený střídavým proudem má tu vlastnost, že při průchodu proudu nulou, a tedy jeho změně polarity, dochází ke zhasnutí oblouku. K opětovnému zapálení dojde, je-li bývalá anoda (nyní katoda) stále žhavá. Tato nová katoda má velký prostorový náboj, který se přesouvá k nové anodě a umožňuje tím chladnutí elektrod, je-li ovšem přítomno dostatečné napětí, dojde k znovu zapálení oblouku [7].

Střídavý oblouk je tedy proměnný s časem a popisuje ho dynamická charakteristika (závislost napětí na oblouku na proudu procházejícím obloukem). Na Obr. 2.2 je zobrazen průběh napětí a proudu v oblouku nacházející se v obvodu napájeném střídavým proudem.

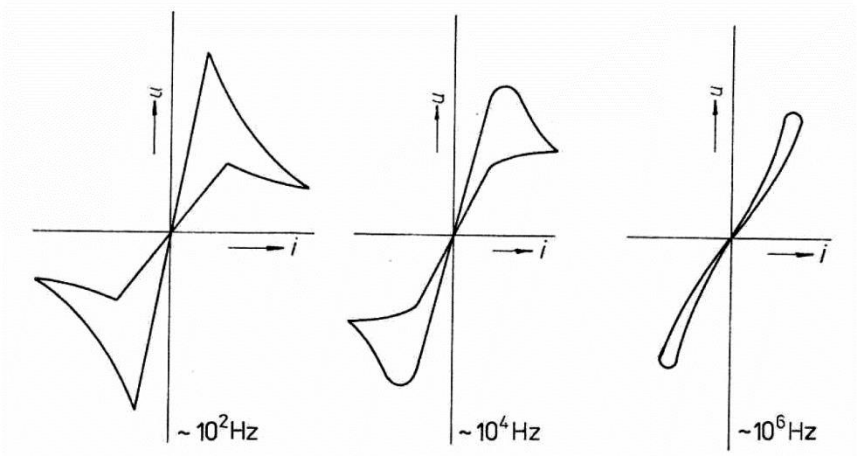
Napětí na elektrodách zpočátku stoupá stejně se síťovým napětím až do momentu, kdy hodnota napětí vzroste na velikost tzv. zapalovacího napětí potřebného k zapálení oblouku. Jakmile se oblouk zapálí, napětí klesne na velikost tzv. hořícího napětí a část půlperiody se relativně nemění. Proud se mění po dobu hoření oblouku. Na závěr půlperiody se napětí zvýší na velikost tzv. zhášecí špičky a proud tekoucí obloukem klesá k nule. Velikost této zhášecí špičky je menší než velikost zapalovacího napětí viz Obr. 2.2. Odstraněním časové osy z obou průběhů vznikne dynamická charakteristika (spodní průběh na Obr. 2.2).



Obr. 2.2: Průběh napětí a proudu v oblouku hořícím v obvodu napájeném střídavým proudem spolu s dynamickou charakteristikou [8]

Na výsledný tvar dynamické charakteristiky mají vliv hysterezní pochody probíhající v plazmatu samotného oblouku. Díky nedostatku nábojů při vytváření oblouku (po předešlé nule proudu) musí mít napětí na elektrodách patřičnou velikost pro přenos energie do oblouku, pokrytí ztrát a zajištění převahy ionizačních pochodů nad rekombinacemi částic. Dále také například délka oblouku, materiál elektrod a další proměnné [8] [1].

S větší velikostí kmitočtu napájecího proudu se dynamická charakteristika blíží k přímce. Zapalovací špička se zmenšuje (Obr. 2.3) [8].



Obr. 2.3: Změna tvaru dynamické charakteristiky v závislosti na kmitočtu nap. proudu [8]

3 OBLOUKOVÉ OCHRANY AFDD

Podnět ke vzniku obloukové ochrany, která by spolehlivě detekovala výskyt elektrického oblouku v síti, přišla z USA. Díky tamní napěťové hladině (110 V) a velkému rozšíření dřevostaveb bylo mnoho požárů způsobeno poruchou na elektroinstalaci. Z tohoto důvodu zde vynalezli přístroj chránící elektrické instalace automatickým odpojením, před škodami způsobenými elektrickým obloukem. Tento přístroj ve Spojených státech nazývají AFCI (Arc Fault Circuit Interrupter). U nás se používá označení oblouková ochrana AFDD (Arc Fault Detection Device).

Toto zařízení zásadně zvyšuje bezpečnost elektroinstalací. Spolehlivým rozpoznáním proudů, vytvořených elektrickým obloukem, dokáže včas odpojit elektrický obvod a zamezí tak případnému vzniku požáru a s tím spojených rizik. V následujících podkapitolách jsou popsány skutečnosti k pochopení principu fungování ochrany AFDD.

3.1 Poruchy v elektroinstalaci

Požáry způsobené poruchou na elektroinstalaci jsou zapříčiněné tzv. poruchovým elektrickým obloukem. Tento výboj elektřiny izolačním prostředím, doprovázený světelným efektem a částečným odpařením materiálu elektrod, způsobí uhelnatění izolace a vlivem vysoké proudové hustoty, a tím i vysoké teploty *(viz kapitola 2 - Elektrický oblouk)* hrozí vzplanutí požáru. Následně pak elektrický oblouk vytváří širokopásmový vysokofrekvenční šum. Ke vzniku poruchového oblouku může dojít z mnoha důvodů, které často (zejména laikům) nejsou na první pohled zřejmé. Může to být poškození izolace kabelů, vlivem mechanické manipulace při realizaci elektroinstalace, pozdější narušení izolace (např. provrtáním), nebo také nedotažením svorek, či přivřením kabelů do dveří a podobně. Konkrétní příklady poruch jsou na následujících obrázcích.

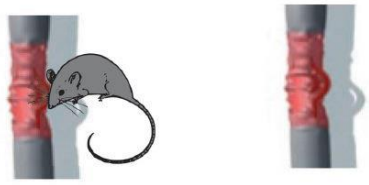
Na prvním obrázku *(Obr. 3.1)* je znázorněn porušený vodič poškozený například častým ohýbáním, dále je zde kabel ohnutý ve velkém úhlu, kde hrozí poškození, a také přimáčknutý vodič v úchytu na stěnu.

Obr. 3.1: Poruchy 1 [2]

Druhý obrázek *(Obr. 3.2)* zobrazuje případ, kdy vlivem špatného dotažení šroubu dochází ke ztrátě kontaktu. Také je zde zobrazen přimáčknutý kabel nábytkem a narušený vodič provrtáním.

Obr. 3.2: Poruchy 2 [2]

Poslední obrázek *(*Obr. 3.3*)* zachycuje situaci, kdy je například izolace kabelu narušena hlodavci, nebo poškozena vysokou teplotou.



Obr. 3.3: Poruchy 3 [2]

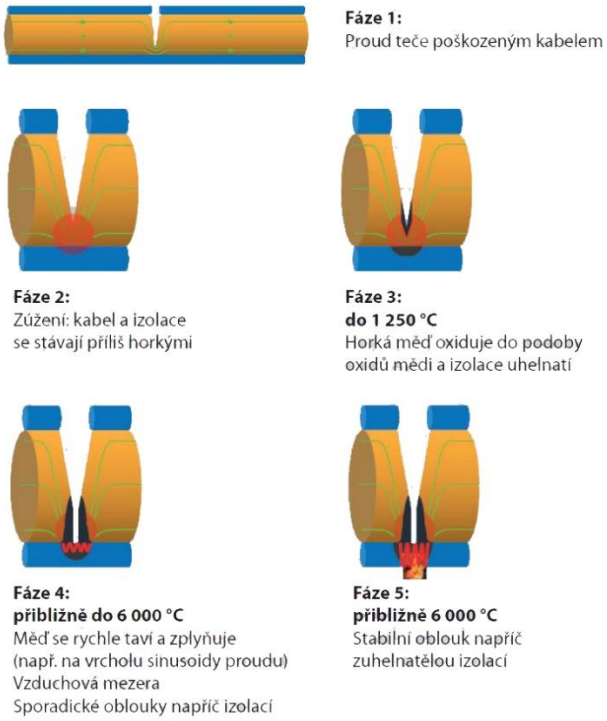
Všechny zde uvedené příklady poruchy vodičů mohou ve výsledku vyústit v poruchový oblouk z přímého nebo nepřímého kontaktu mezi kovovými částmi. Ionizovaný vzduch v místě poruchy zapříčiní znovu zapálení oblouku, který uhasl po průchodu proudu nulou. Poruchový oblouk lze rozdělit na sériový nebo paralelní.

3.1.1 Sériové poruchové oblouky

Ke vzniku sériových poruchových oblouků *(Obr. 3.4)*, tedy případu, kdy je poruchový oblouk zařazen v sérii se spotřebičem, dochází nejčastěji v důsledku zúžení vodivé cesty *(Obr. 3.5)*. To nastane zejména při navrtání nebo častým ohýbáním vodiče. V místě zúžení vzrůstá teplota, což má za následek oxidaci mědi a její zplyňování. Díky tomu, se zvýší odpor zúženého místa, a tím dochází i k dalšímu zvýšení teploty. Izolace zuhelnatí a dojde k zapálení stabilního oblouku zuhelnatělou izolací a tak hrozí vznik požáru.

Obr. 3.4: Sériový poruchový oblouk [2]

Při sériovém poruchovém oblouku nedochází k překročení provozního proudu vlivem impedance spotřebiče a nedochází k úniku proudu do země. Provozní proud je při této situaci naopak ještě snížen vznikem napětí na samotném oblouku v sérii a jeho impedancí, díky čemuž bude proud držen pod prahem vypnutí jistícího zařízení. Z tohoto důvodu nejsou schopny proudové chrániče, pojistky, nebo jističe detekovat poruchu a odpojit obvod. Tuto poruchu detekuje pouze oblouková ochrana.



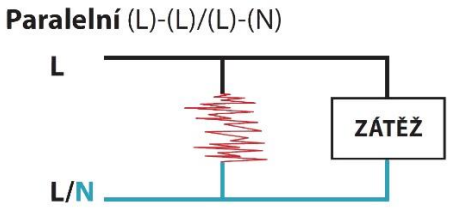
Obr. 3.5: Zapálení sériového poruchového oblouku [2]

3.1.2 Paralelní poruchové oblouky (L-L nebo L-N)

Paralelní poruchový oblouk *(Obr. 3.6)* může vytvořit vodivou cestu mezi dvěma vodiči s porušenou izolací (například vlivem stárnutí materiálu, naříznutí izolace, nebo teplotou) a to i bez přímého spojení obou vodičů. Krátké výboje nebo proudy tekoucí na povrchu poškozeného vodiče (nečistoty, kondenzace) zahřejí a zuhelnatí plasty, které se začnou vysokou teplotou odpařovat a mohou zapálit stabilní oblouk.

Pokud dojde k nechtěnému spojení dvou vodičů, mezi kterými vzniká zpočátku nedokonalý elektrický kontakt, ve většině případů vznikne zkratový proud, který detekuje nadproudová ochrana a odpojí obvod (velikost tohoto proudu je dána impedancí obvodu). Ovšem může nastat situace, kdy nebude dosaženo

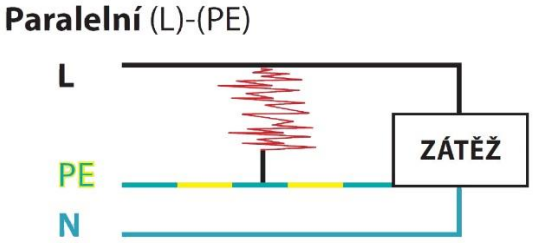
vypínacího proudu nadproudové ochrany (vlivem velké impedance obvodu), a nadproudová ochrana tuto poruchu neodpojí. V tomto případě zapůsobí oblouková ochrana.



Obr. 3.6: Paralelní poruchový oblouk L-L a L-N [2]

3.1.3 Paralelní poruchové oblouky (L-PE)

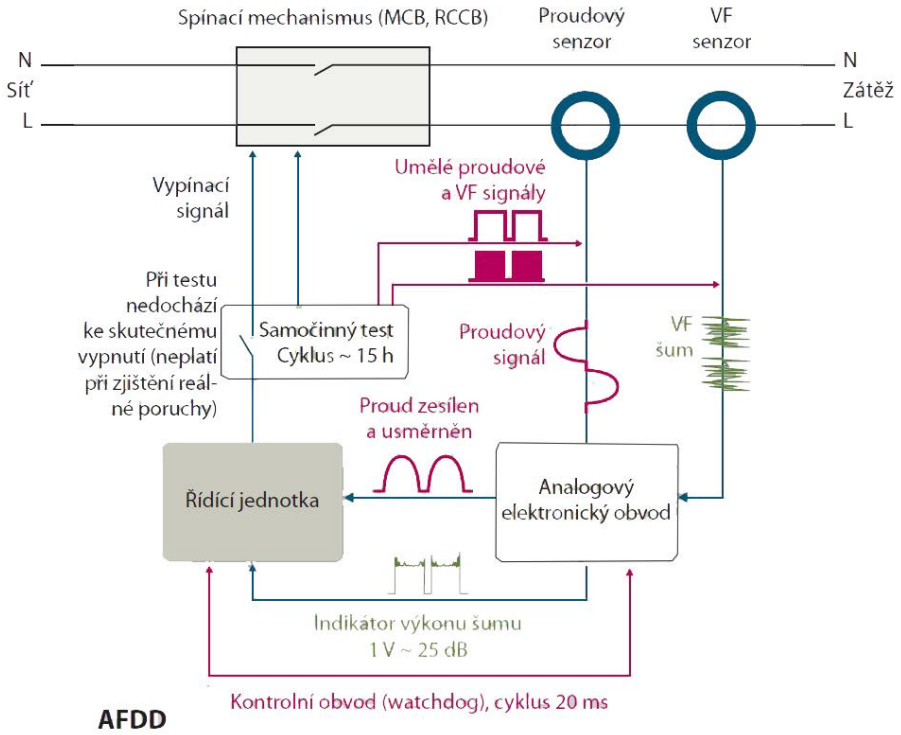
Poslední možností je poruchový oblouk mezi fázovým a ochranným vodičem *(Obr. 3.7)*. Impedance vadného obvodu může být značně vysoká, díky čemuž na tuto poruchu nemusí nadproudové přístroje včas reagovat. Ovšem vznik tohoto poruchového oblouku je spolehlivě detekován proudovým chráničem, který následně odpojí obvod. Oblouková ochrana v tomto případě rovněž zapůsobí a zdvojnásobí tak ochranu proti této poruše.



Obr. 3.7: Paralelní zkrat L-PE [2]

3.2 Princip fungování AFDD

Fungování přístroje AFDD je obecně založeno na principu snímání s následným vyhodnocováním nízkofrekvenčního a vysokofrekvenčního signálu. Princip přístroje AFDD lze nejlépe pochopit z grafického schématu této jednotky (Obr. 3.8).



Obr. 3.8: Schéma znázorňující princip AFDD [2]

Jak lze vidět na grafickém schématu přístroje, aktivní vodiče (vodič L a vodič N) jsou připojeny na svorky AFDD, kde dochází k jejich spínání pomocí připojeného spínacího zařízení. Na fázovém vodiči směrem k zátěži jsou navlečeny dva proudové transformátory. Jeden transformátor je určen pro snímání časového průběhu proudu v nízkofrekvenční oblasti a druhý s několika závity snímá vysokofrekvenční signály (šum) v kritickém kmitočtovém pásmu od 22 MHz až do 24 MHz.

Zjednodušeně řečeno, analogový elektronický obvod upravuje (zesiluje a usměrňuje) naměřený signál pro převod do řídící jednotky označované zkratkou RSSI (z angl. názvu: Received Signal Strength Indication – Indikátor síly přijatého signálu). Mikroprocesor v řídící jednotce signál zpracuje pomocí matematických operací (derivace nebo integrace), vyhodnotí zjištěné výsledky a odešle signál na výstupní relé, které v případě zjištění elektrického oblouku v obvodu tento obvod rozepne.

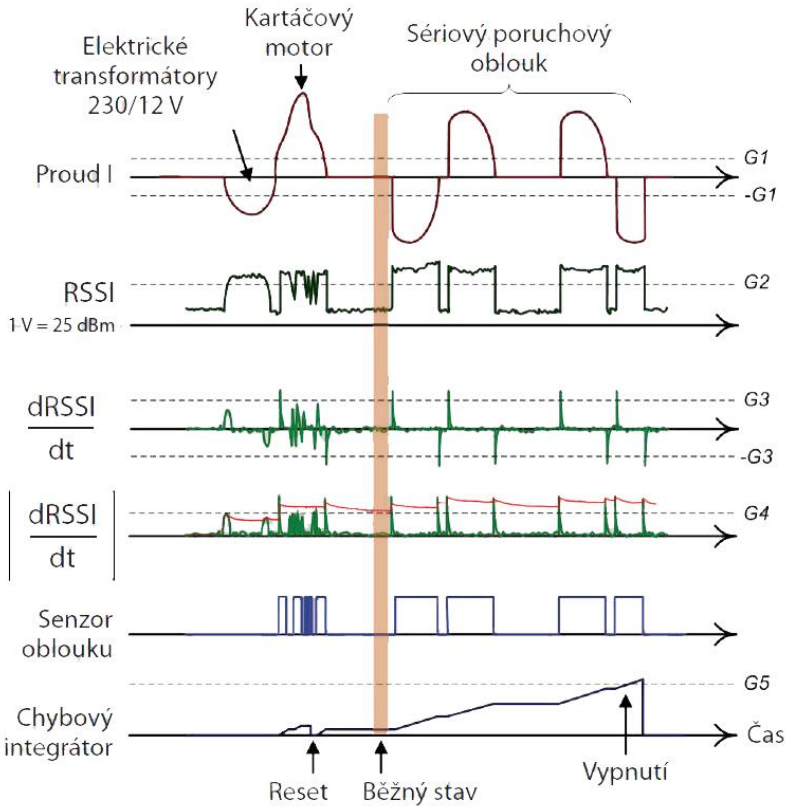
Správnou funkci elektroniky a detekčního systému umožňuje automatické testování probíhající každých patnáct hodin. Během této doby autotestu je vypínací signál, který by dal za normálních okolností povel vypínacímu mechanismu k odpojení obvodu, blokován (v řádech milisekund). Řídící jednotka vyšle za oba senzory uměle vytvořený vysokofrekvenční a proudový signál, který simuluje výskyt poruchového oblouku v obvodu. Tento signál poté zpracovává a vyhodnocuje

elektronický obvod spolu s řídicí jednotkou. Pokud je test úspěšný a přístroj poruchový oblouk detekuje, je přístroj uveden zpět do svého provozního stavu. Při negativním výsledku testu má za následek okamžité odpojení obvodu a vypnutí přístroje. Toto automatické testování je odloženo, pokud se v obvodu objeví před testem první známky poruchového oblouku nebo v případě nadprůměrné spotřeby elektrického proudu ve větvi. Toto sledování a kontrolu obvodu má za úkol tzv. watchdog, který kontroluje funkci každých 20 ms [2].

Jelikož mají sériové a paralelní poruchové oblouky různé vlastnosti, je postup při jejich detekci odlišný.

3.2.1 Detekce sériových poruchových oblouků pomocí AFDD

Níže zobrazený obrázek *(Obr. 3.9)* znázorňuje princip detekce sériového poruchového oblouku. Svislá oranžová čára odděluje běžný provozní stav a stav při poruše, kdy se v síti vyskytl sériový poruchový oblouk. První průběh na obrázku tedy zobrazuje tvar elektrického proudu tekoucího sledovaným vedením. Samotný princip detekce (princip AFDD viz podkapitola *3.2 - Obr. 3.8*) je založen na sledování nárůstu strmých hran signálu pomocí jednotky RSSI zaznamenaných v jednotkách dBm (decibel nad miliwattem).



Obr. 3.9: Detekce sériového poruchového oblouku [2]

Pokud je signál z jednotky RSSI větší než nastavená mez G2 (Obr. 3.9), oblouková ochrana pokračuje dále v detekci. Nejprve signál derivuje (mez G3) a poté provede z derivovaného signálu absolutní hodnotu, čímž určí referenční signál. Pokud je referenční signál větší než mezní hodnota G4 a postupně narůstá chybový integrátor až do mezní hodnoty G5, po jejíž dosažení je obvod pomocí připojeného spínacího přístroje vypnut.

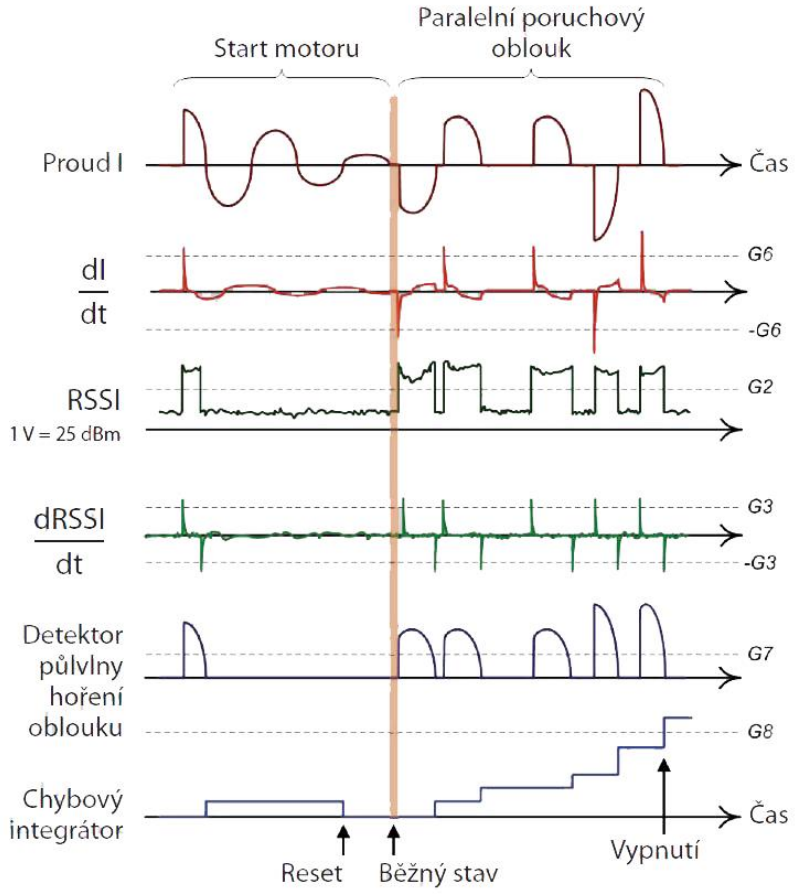
Běžná provozní zátěž (například zde uvedený kartáčový motor a transformátor) rovněž generuje vysoký šum, který je také nad mezí G2 a je tedy nutné zabránit nežádoucím vypnutím. Rozpoznáním, zda se jedná o běžnou provozní zátěž nebo o poruchu, je docíleno resetováním chybového integrátoru, pokud se nevyskytnou charakteristické znaky oblouku. Zejména se jedná o vlastnost oblouku, kdy po průchodu napětí nulou oblouk zhasne a vznikne po určitý čas nulový proud, než se oblouk znovu obnoví. Pokud tento charakteristický znak oblouku není přítomen, chybový integrátor je vyresetován [2].

3.2.2 Detekce paralelních poruchových oblouků pomocí AFDD

Vyhodnocení paralelního poruchového oblouku je podobné postupu popsanému výše. Detekcí sériových poruchových oblouků je vytíženo přibližně 80 % výpočtové práce řídící jednotky, zatímco detekce paralelních poruchových oblouků zaobírá zbylých 20 % výpočtové práce. Je to způsobeno tím, že některé proměnné vypočítané při detekci sériového poruchového oblouku jsou použity i v tomto případě a snižují tak potřebný výpočetní výkon potřebný od řídící jednotky. Detekce jednoduše řečeno spočívá ve sledování půlvln hoření oblouku [2].

Na rozdíl od sériového oblouku je zde počítána i derivace proudu *(Obr. 3.10)*. Algoritmus pro detekci paralelního oblouku není spuštěn, dokud nedosáhne hodnota derivace proudu velikosti mezní hranice G6. Dosáhne-li zároveň hodnota RSSI větší hodnoty jak mezní hranice G2, přístroj vyhodnotí půlvlnu jako poruchový oblouk a načte hodnotu úměrnou proudu oblouku do chybového integrátoru. Aktuální hodnota chybového integrátoru může být snížena v případě, že po určitou dobu nebyla zaznamenána žádná kritická půlvlna. Pokud přístroj zaznamená dostatečný počet půlvln oblouku a hodnota chybového integrátoru dosáhne mezní hranice G8, řídící jednotka zajistí pomocí připojeného spínacího zařízení odpojení obvodu [2].

I zde je zapotřebí, aby přístroj dodržel prevenci proti nechtěným vypnutím. Jinými slovy, aby reagoval pouze v případě, kdy se vyskytne reálná porucha.

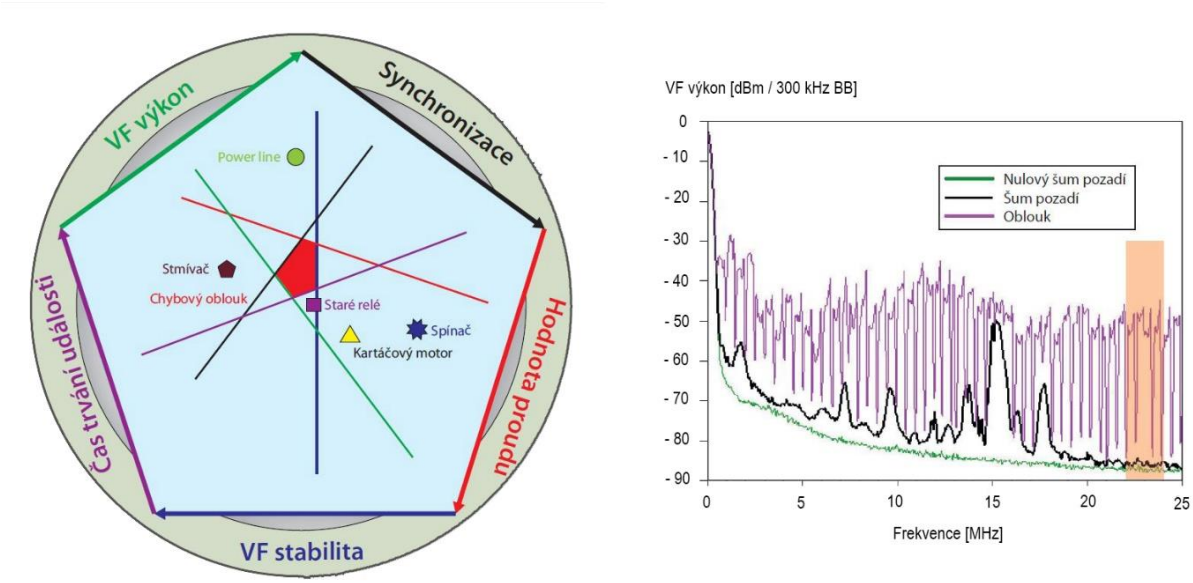


Obr. 3.10: Detekce paralelního poruchového oblouku [2]

3.2.3 Detekce a rozpoznání ostatních provozních poruch

Je důležité, aby nedocházelo k vypnutí spouště obloukové ochrany v případech, kdy to není nutné. Jako příklad lze uvést nárazové proudy u zářivkových lamp nebo u kartáčových motorů.

V levé části na obrázku *Obr. 3.11* jsou zobrazeny různé faktory, které jsou sledovány při detekci poruchového oblouku. Jedná se o výkon oblouku, hodnotu proudu oblouku, délku hoření oblouku, synchronizaci se sítí a v neposlední řadě také vysokofrekvenční stabilitu. Jak lze na obrázku názorně vidět, nachází-li se všechny zjištěné hodnoty v červeně vyznačené oblasti uprostřed, přístroj situaci vyhodnotí jako poruchový oblouk a dá povel k vypnutí spínacího mechanismu.



Obr. 3.11: Různé faktory při detekci oblouku a VF šum [2]

Přístroj bere v úvahu také vysokofrekvenční šum způsobený samotnou elektroinstalací. Na obrázku *Obr. 3.11* v pravé části je zobrazen vysokofrekvenční šum spolu se samotným obloukem. Z obrázku je patrné, že nejvyšší šum okolí se nachází okolo velikosti frekvence cca 16 MHz. U vyšších frekvencí (nad 20 MHz) šum pozadí ustupuje. Z tohoto důvodu AFDD pracuje při detekci s frekvencemi od 22 do 24 MHz (vyznačeno oranžově), kde značný rozdíl mezi úrovní šumu pozadí a oblouku.

3.3 Normy spojené s AFDD

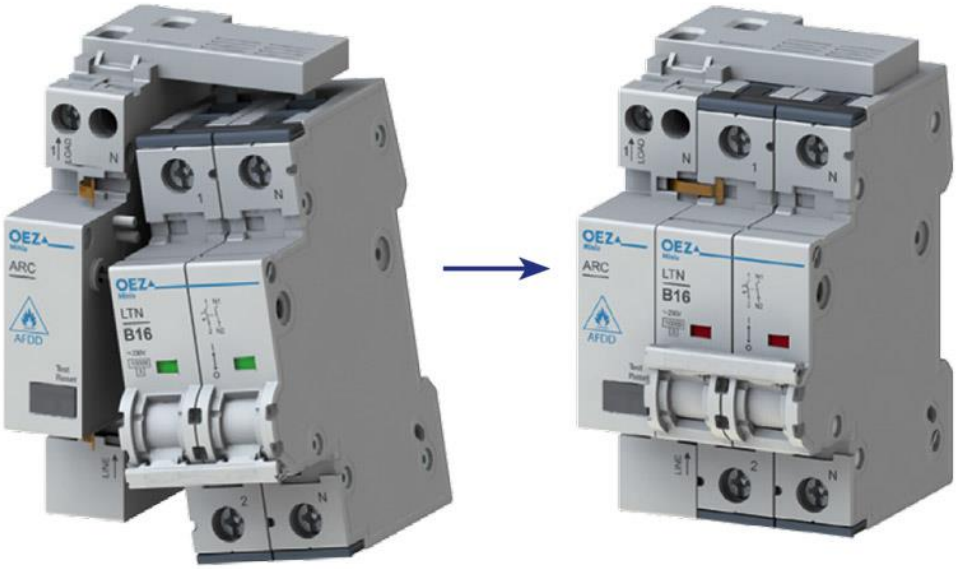
Obloukové ochrany AFDD jsou již zařazeny do českých technických norem. Nasazením těchto přístrojů pro sítě NN se zabývá česká technická norma ČSN 33 2000-4-42 ed.2 „Elektrické instalace nízkého napětí“. Tato norma obloukové ochrany zmiňuje jako účinné doplňkové řešení, avšak nikoliv jako výhradní řešení pro ochranu proti vzniku požáru na elektroinstalacích. A doporučuje instalovat tyto ochrany v koncových obvodech elektroinstalací [4].

Technické záležitosti týkající se ochran AFDD pro domácnost a podobná použití řeší česká technická norma ČSN EN 62606„ Obecné požadavky na obloukové ochrany“. Norma určuje rozsah použití, různé požadavky na konstrukci a také například zkoušky těchto přístrojů [3].

4 OBLOUKOVÁ OCHRANA AFDD

Oblouková ochrana AFDD od firmy OEZ s.r.o. (Obr. 4.1) je realizována ve stavebnicovém provedení, díky kterému lze sestavit mnoho variant se jmenovitým proudem od 1 A až do 40 A. Skládá se ze spouště obloukové ochrany ARC a jističe LTN 1 +N / LTE 1+N nebo proudového chrániče s nadproudovou ochranou OLE/OLI. Spoušť ARC a připojený spínací přístroj tvoří dohromady jednotku AFDD.

Obecně jsou tyto ochrany doporučované pro instalaci do zásuvkových a světelných obvodů (230 V) se jmenovitými proudy do 40 A, a to vždy na začátek chráněného obvodu. Pro minimalizaci rušivého šumu působící na jednotku AFDD a pro snadnější hledání vzniklé poruchy se doporučuje použití jednoho přístroje AFDD na jeden vývod. Je velmi důležité připojit AFDD ve správném směru k zátěži, vzhledem principu fungování ochrany (viz. 3.2).

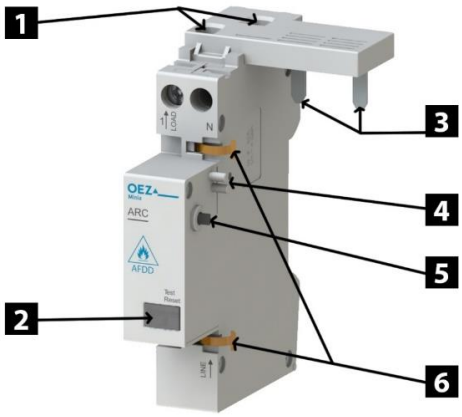


Obr. 4.1: Oblouková ochrana ARC 16 A a jistič LTN 16 A char. B [6]

4.1 Spouště obloukové ochrany ARC

Spoušť obloukové ochrany ARC umí detekovat jak sériové, tak paralelní poruchové oblouky a dokáže pomocí připojeného jističe nebo proudového chrániče rozpojit obvod.

Společnost OEZ má ve svém portfoliu dvě varianty provedení spouště ARC. Jedná se o typ ARC-16-1N-3M pro jmenovité proudy 1 až 16 A a typ ARC-40-1N-3M pro jmenovité proudy 1 až 40 A. Katalogové parametry těchto spouští jsou dostupné v příloze této práce. Na následujícím obrázku (Obr. 4.2) je zobrazena spoušť ARC-16-1N-3M s vyznačenými důležitými prvky přístroje.



Obr. 4.2: Spoušť obloukové ochrany ARC [5]

Popis spouště obloukové ochrany ARC (Obr. 4.2):

1) Bod číslo jedna ukazuje místo, kde se nachází svorky pro připojení vodičů od zátěže. Svorky jsou na přístroji označeny šipkou směřující ven z ochrany a označeny slovem „LOAD“.
2) Tlačítko na přední části spouště má tři funkce:
    a. Ukazatel stavu LED, která pomocí barevného zbarvení signalizuje jednotlivé stavy přístroje *(Tabulka 1)*. Je-li ochrana zapnuta a v provozu, tlačítko svítí červeně.
    b. Testovací tlačítko, kterým může být kdykoli za normálního stavu v provozu přístroje spuštěn test funkčnosti. AFDD musí po spuštění testu vypnout. Po opětovném zapnutí musí LED ukazatel zobrazovat provozní stav.
    c. Resetovací tlačítko, kterým lze resetovat ukazatel signalizující důvod zapůsobení ochrany. Pokud signalizuje poruchu z důvodu neúspěšného autotestu, resetovací tlačítko neumožní tento stav vyresetovat.

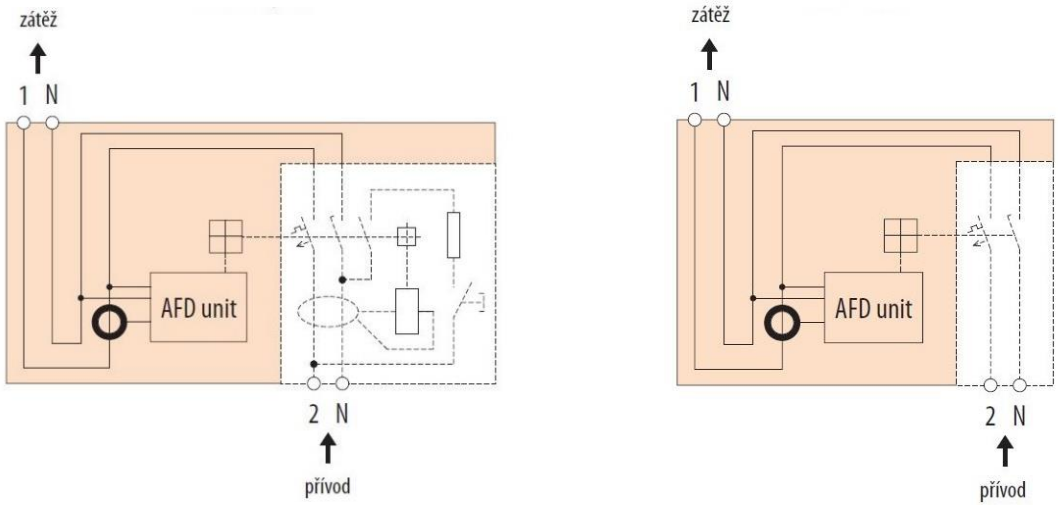
Tabulka 1: Provozní stavy ukazatele LED obloukové ochrany ARC

LED ukazatel	Význam	Stav
	ARC zapnuta a v provozu	**Provozní stav**
	ARC vypnuta: sériový nebo paralelní oblouk	**Chybová hlášení**
	RC vypnuta: nadpětí > 275 V	
	ARC není připravena, vnitřní porucha	
	ARC nemá napájení	-

3) Zde se nachází spojovací vodiče pro připojení ochrany k jistícímu prvku (jistič, nebo nadproudová ochrana).
4) Pro znemožnění připojení nesprávného jističe, nebo proudového chrániče, z hlediska velikosti jmenovitého proudu, jsou zde kódovací kolíky, které této montáži zamezí.
5) Bod pět ukazuje na vybavovací mechanismus, který zajistí vybavení proudového chrániče nebo jističe.
6) Mechanické spojení obloukové ochrany s jistícím prvkem zajišťují kovové lamely.

4.2 Sestava AFDD s proudovým chráničem s nadproudovou ochranou

Sestava AFDD s proudovým chráničem je zapojena dle *Obr. 4.3*. Vypínací schopnost přístroje závisí na typu proudového chrániče (I_{cu} = 6 kA pro chránič OLE a I_{cu} = 6 kA pro chránič OLI). Jmenovité proudy přístroje jsou v rozsahu 1 A až 40 A, dle použitého typu spouště viz kap. *4.1*. Vypínací charakteristika dle proudového chrániče B nebo C.



Obr. 4.3: Spoušť ARC spolu s proudovým chráničem OLE/OLI vlevo a ARC spolu s jističem LTN/LTE vpravo [2]

4.3 Sestava AFDD s jističem

Sestava AFDD s jističem *(Obr. 4.1)* je zapojena viz *Obr. 4.3*. Provedení je pouze jednopólové s jmenovitým napětím AC 230 V a s jmenovitými proudy od 1 A až po 40 A, dle použitého typu spouště viz kap. 4.1.

4.4 AFDD od firmy EATON

Skupina EATON Corporation rovněž ve svém portfoliu disponuje obloukovou ochranou AFDD. Tento přístroj na rozdíl od přídavné spouště ARC tvoří jedno kompaktní zařízení. Výrobce ho uvádí pod názvem: Proudový chránič s nadproudovou a obloukovou ochranou. Přístroj na Obr. 4.4 tvoří funkci jističe, proudového chrániče a obloukové ochrany.

AFDD vyrábí v mnoha variantách. Tyto varianty se liší zejména ve jmenovitém proudu zařízení a ve vypínací charakteristice jističe. Jmenovité proudy se pohybují od 10 do 40 A. Vypínací charakteristika může být buď B, nebo C. Dále výrobce uvádí vypínací schopnost 10 kA (I_n do 25 A) a 6 kA (I_n od 32 A). Jmenovitý reziduální proud je 30 mA.

Kompaktní zařízení, které kombinuje jistič, proudový chránič a obloukovou ochranu si bohužel vyžádalo jistou nevýhodu oproti svému konkurentovi v podobě mírně vyšší ceny [10].

Obr. 4.4: AFDD 16/2/B/003-A od firmy EATON [11]

5 MODELY RŮZNÝCH PORUCH PODLE TECHNICKÉ NORMY: ČSN EN 62606

Modelové příklady různých poruch a tím ověření pracovních charakteristik přístroje AFDD jsou popsány v technické normě ČSN EN 62606: „Obecné požadavky na obloukové ochrany“.

Kompletní sled všech zkoušek je v uveden v tabulkách A.1, A.2 a A.3 v příslušné normě ČSN EN 62606 [3]. Pro účely této práce byly vybrány zkoušky na ověření pracovních charakteristik přístroje AFDD.

Norma pro AFDD s jmenovitým napětím U_n = 230 V definuje maximální hodnoty celkové doby vypínání při nízkých proudech poruchového oblouku do 63 A viz Tabulka 2. Tyto nízké proudy oblouku jsou nejčastěji způsobené poruchou izolace fáze proti zemi nebo vlivem sériového oblouku [3].

Tabulka 2: Maximální hodnoty doby vypínání do 63 A [3]

Zkušební proud oblouku (efektivní hodnoty)	[A]	2,5	5	10	16	32	63
Maximální doba vypínaní	[s]	1	0,5	0,25	0,15	0,12	0,12

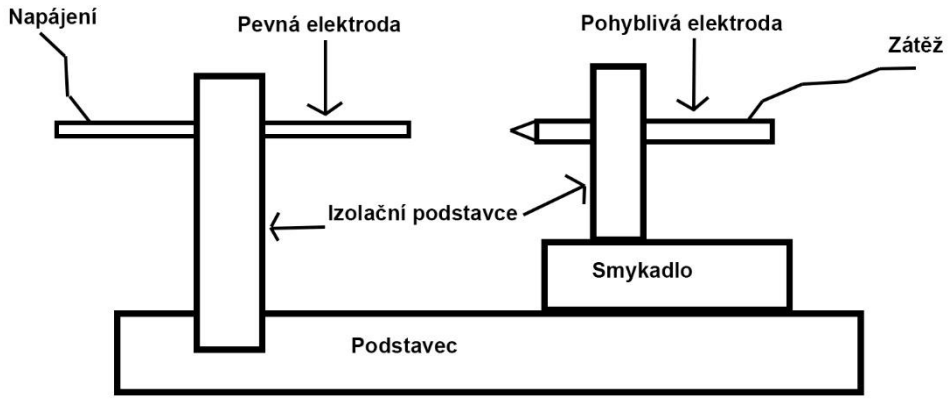
Dále definuje mezní hodnoty počtu povolených půlperiod hoření oblouku během 0,5 s v oblasti vysokých proudů nad 63 A viz Tabulka 3. Tyto vysoké proudy oblouku jsou nejčastěji způsobené poruchou izolace proti zemi nebo vlivem paralelního oblouku [3].

Tabulka 3: Maximální počet půl period hoření oblouku během 0,5 s nad 63 A [3]

Zkušební proud oblouku (efektivní hodnoty)	[A]	75	100	150	200	300	500
Počet půl period při jmenovitém kmitočtu N	[-]	12	10	8	8	8	8

5.1.1 Generátor oblouku

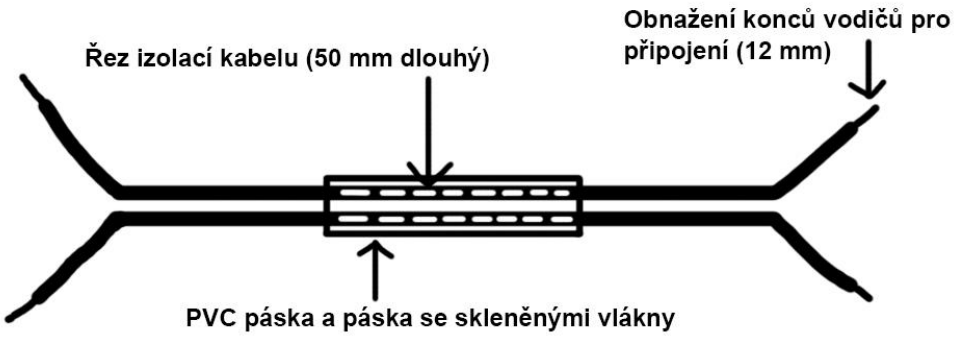
Přístroj pro generování poruchových oblouků se skládá z měděné tyče představující pevnou elektrodu a z karbon-grafitové tyče představující pohyblivou elektrodu viz *Obr. 5.1*. Použitím generátoru oblouku ve zkušebním obvodu musí AFDD detekovat poruchový oblouk za méně než je 2,5násobek mezních hodnot doby vypínaní uvedených v Tabulka 2 a Tabulka 3 [3].



Obr. 5.1: Generátor oblouků

5.1.2 Vzorek kabelu

Vzorek kabelu pro simulaci poruchy se skládá ze dvou vodičů o průřezu 1,5 mm^2 navzájem těsně spojené viz *Obr. 5.2*. Norma nařizuje pro tyto zkoušky použití kabelu s paralelními vodiči a jako vhodný kabel doporučuje kabel H05VV-F se dvěma vodiči.



Obr. 5.2: Vzorek kabelu

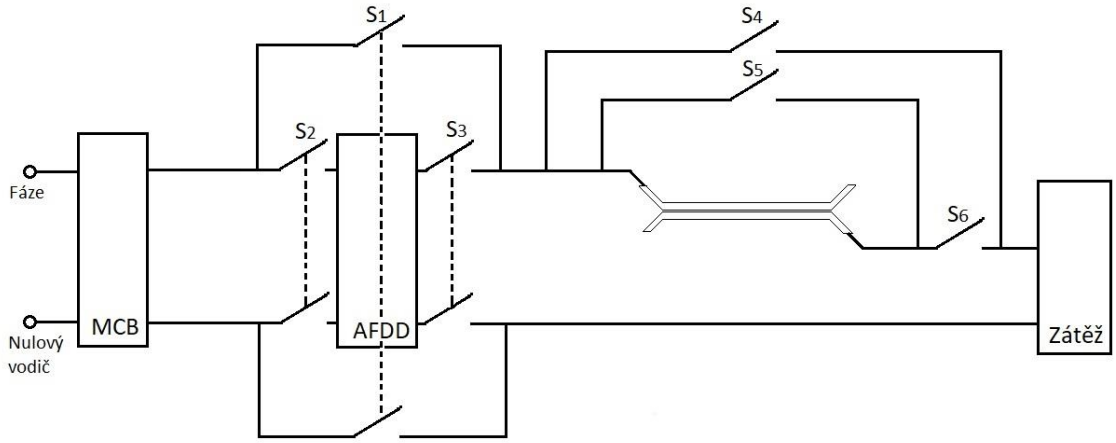
Cílem takovéhoto vzorku je vytvoření karbonizace mezi dvěma vodiči kabelu a tím vytvoření vodivé dráhy na izolaci, která zapříčiní hoření oblouku při připojeném jmenovitém napětí. Jak je vidět na obrázku *Obr. 5.2*, řez izolací obou vodičů má být 50 mm dlouhý a hluboký tak, aby nedošlo k poškození žádných vláken vodiče. Tento řez je poté obvázán dvojitou vrstvou černé PVC elektrikářské pásky a dvojitou vrstvou pásky obsahující skleněná vlákna. Celková délka tohoto vzorku musí být alespoň 200 mm, přičemž na každém konci vzorku musí být dráty odděleny vzdáleností alespoň 25 mm. Konce vodičů je vhodné zbavit izolace pro připojení ke zkušebnímu obvodu. Na takto připraveném vzorku je ještě potřeba vytvořit karbonizovanou dráhu [3].

Prvním způsobem je připojení vzorku na obvod, který dodává zkratový proud 30 mA a napětí naprázdno alespoň 7 kV. Napájení tohoto obvodu by mělo trvat

přibližně 10 sekund, nebo dokud se nepřestane vytvářet kouř. Druhým způsobem je připojeni vzorku na obvod, který dodává zkratový proud o velikosti 300 mA a napětí cca 2 kV, nebo menší, které dostačuje k průchodu proudu. Napájení tohoto obvodu by mělo trvat přibližně minutu, nebo dokud se nepřestane vytvářet kouř [3].

5.2 Zkouška sériového poruchového oblouku

Tato zkouška simuluje vznik sériového poruchového oblouku v sledovaném obvodu a testuje přístroj AFDD, zda vyhoví mezním hodnotám uvedených v tabulce (Tabulka 2). Připravený vzorek kabelu je připojen do série s AFDD spolu s pomocnými spínači a jističem viz Obr. 5.3. AFDD je do obvodu zapojeno, pokud je zkušební spínač S_1 ve vypnuté poloze a spínače S_2 a S_3 v zapnuté poloze.



Obr. 5.3: Schéma zapojení pro zkoušku sériového poruchového oblouku

AFDD musí být zkoušeno na jmenovitém napětí. Toto jmenovité napětí je ale v takto zapojeném obvodu (Obr. 5.3) snížené o 50 V, a to kvůli hodnotě napětí oblouku vytvořeného během zkoušky. Spínače S_1, S_2 a S_3 tedy slouží k bezpečnému odpojení AFDD od měřícího obvodu. Spínače S_4, S_5 a S_6 slouží k připojování a odpojování upraveného vzorku kabelu viz 5.1.2.

5.2.1 Případ náhlého výskytu sériového oblouku v obvodu

Dle normy [3] je AFDD je připojeno ke zkušebnímu obvodu (Obr. 5.3), zkušební spínače S_4, S_5 a S_6 jsou v zapnuté poloze a upraveným vzorkem kabelu neteče proud. Odporovou zátěží je nastavován zkušební proud oblouku od nejnižší hodnoty až do jmenovitého proudu AFDD a poté je spínač S_4 vypnut. Náhlého připojení vzorku kabelu do série se zátěží je docíleno náhlým vypnutím spínače S_5. Doba vypínání má být měřena minimálně třikrát a v žádném měření nemají být překročeny hodnoty v tabulce (Tabulka 2) [3].

5.2.2 Případ zapojení zátěže se sériovým obloukem

Zde je dle normy [3] AFDD připojeno ke zkušebnímu obvodu (Obr. 5.3), zkušební spínače S_5 a S_6 jsou ve vypnuté poloze a spínač S_4 je v zapnuté poloze. Odporovou zátěží je zkušební proud oblouku nastaven na nejnižší hodnotu proudu uvedenou v tabulce (Tabulka 2). Poté je spínač S_4 vypnut. Zapojení zátěže se sériovým obloukem je docíleno zapnutí zkušebního spínače S_6. Postup vyhodnocení měření je stejný jako u 5.2.1. Celé měření je poté zopakováno pro jmenovitou hodnotu proudu AFDD [3].

5.2.3 Případ zapnutí do sériového oblouku

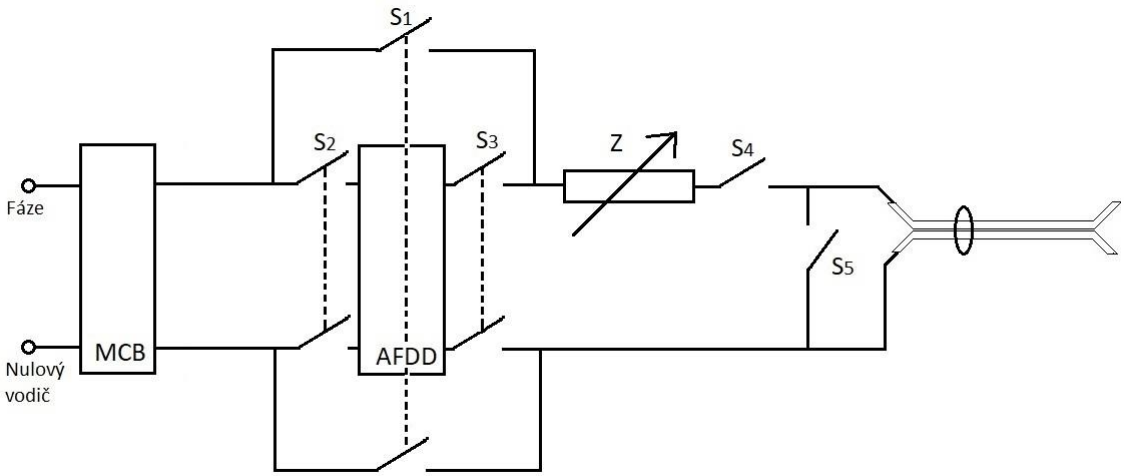
Dle normy [3] je AFDD připojeno ke zkušebnímu obvodu (Obr. 5.3), zkušební spínače S_4 a S_6 jsou v zapnuté poloze a spínač S_5 ve vypnuté poloze. Odporovou zátěží je zkušební proud oblouku nastaven na nejnižší hodnotu proudu uvedenou v tabulce (Tabulka 2). Poté je vypnut spínač S_2 a následně je vypnut také spínač S_4. Zapnutí AFDD do sériového oblouku je docíleno zapnutím spínače S_2. Postup vyhodnocení měření je rovněž stejný jako u 5.2.1. Celé měření je poté zopakováno pro jmenovitou hodnotu proudu AFDD [3].

5.3 Zkouška paralelního poruchového oblouku

Touto zkouškou je ověřena správná činnost AFDD v případě výskytu paralelního poruchového oblouku v obvodu. Podle normy [3] musí AFDD detekovat a vypnout poruchový oblouk, pokud počet půlperiod hoření oblouku dosáhne hodnoty uvedené v tabulce (Tabulka 3) během 0,5 s (doba 0,5 s začíná počátkem první půlperiody hoření oblouku). Půlperioda hoření oblouku je v normě chápána jako souhrn všech proudových drah, které se vyskytují v době 10 ms pro AFDD dimenzovaný na 50 Hz a době 8,3 ms pro AFDD dimenzovaný na 60 Hz. Proud může po určitou dobu v tomto úseku protékat, ale nikoliv po celou dobu [3].

Mezi jednotlivými půlperiodami hoření oblouku může nastat doba s velmi sníženým (proud s amplitudou menší jak 5 % amplitudy zkušebního proudu) nebo i nulovým proudem. Tato doba může trvat část periody, nebo i několik po sobě jdoucích půlperiod. Za půlperiodu hoření oblouku se nepovažuje celá kompletní sinusová půlperioda proudu [3].

Zkušební obvod je zapojen dle Obr. 5.4.



Obr. 5.4: Schéma zapojení pro zkoušku paralelního poruchového oblouku

5.3.1 Případ výskytu paralelního poruchového oblouku s omezeným proudem

Zkouška je realizována při omezené velikosti poruchového proudu 75 A a 100 A. Nejprve je zkušební poruchový proud v obvodu (Obr. 5.4) nastaven na hodnotu 75 A při impedanci obvodu Z, když jsou zkušební spínače S_2 a S_3 ve vypnuté poloze a spínače S_1, S_4 a S_5 v zapnuté poloze. Poté jsou spínače S_1, S_4 a S_5 vypnuty a S_2 a S_3 zapnuty. Výskyt paralelního poruchového oblouku je docílen náhlým zapnutím spínače S_4. AFDD musí poruchový oblouk vypnout dle tabulky (Tabulka 3). Poté je zkouška zopakována s nastaveným poruchovým proudem 100 A, kde AFDD musí rovněž vyhovět mezním hodnotám z tabulky [3].

AFDD musí odstranit paralelní oblouk v obvodu, dojde-li během 0,5 s k počtu půlperiod podle Tabulka 3 [3].

Pokud AFDD nevypne v případě, kdy je doba hoření oblouku menší, než je počet půlperiod viz Tabulka 3, zkouška musí být zopakována s novým vzorkem kabelu [3].

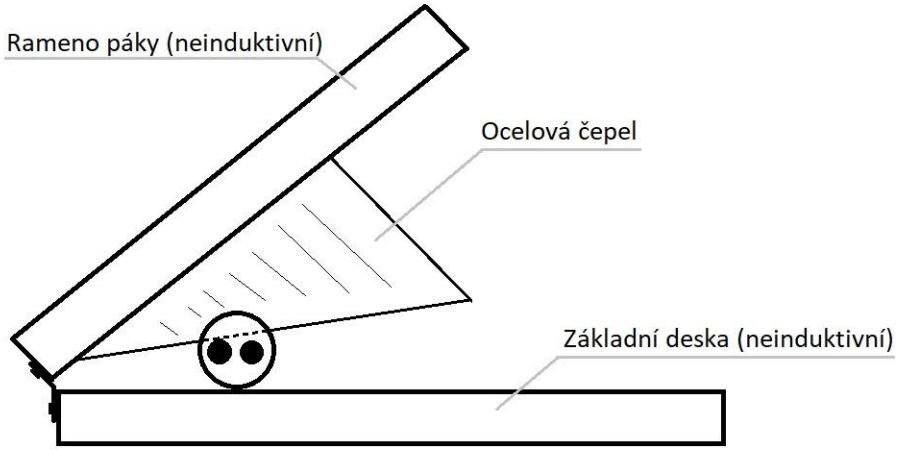
5.3.2 Případ výskytu paralelního poruchového oblouku a zkouška řezání kabelu

Zkouška je realizována dle schématu na Obr. 5.4 s tím rozdílem, že místo připojení z karbonizovaného vzorku kabelu jsou do obvodu připojeny dva těsně spojené vodiče používané v příslušné zemi (nebo například kabel s dvěma vodiči H05VV-F).

Vzorek kabelu (5.1.2) znázorněný na tomto schématu je pro zkoušky řezání kabelu vložen do zkušebního přístroje na Obr. 5.5. Čepel tohoto přístroje musí mít dle normy tloušťku 3 mm pro AFDD s jmenovitým napětím 230 V.

Zkouška je realizovaná při jmenovitém napětí AFDD. Se spínači S_1, S_4 a S_5 v zapnuté poloze je zkušební proud oblouku nastaven s impedancí Z na velikost dle Tabulka 3. Poté je spínač S_1 a S_5 vypnut a následně spínače S_2 a S_3 zapnuty. Vytvoření paralelního oblouku je docíleno proříznutím izolace na připojeném pokusném kabelu. Ocelová čepel musí vytvořit pevný kontakt s jedním vodičem a bodový kontakt s druhým.

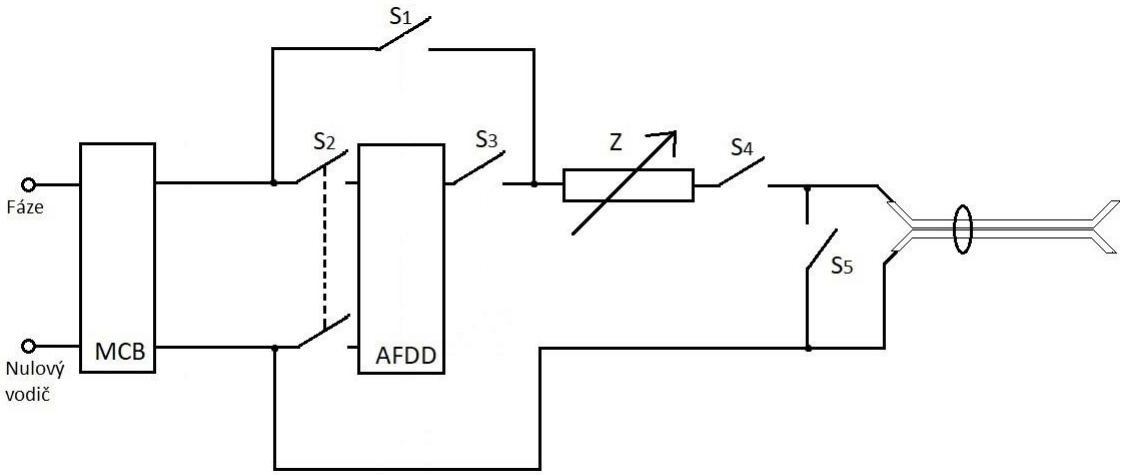
Zkouška probíhá se třemi vzorky kabelu pro každou velikost proudu (pro každé měření musí být použit nový). AFDD musí vyhovět hodnotám uvedených v Tabulka 3.



Obr. 5.5: Zkušební přístroj pro řezání kabelu

5.3.3 Případ výskytu paralelního poruchového oblouku proti zemi

Zkouška je realizována dle schématu na Obr. 5.6.



Obr. 5.6: Schéma pro zkoušku paralelního poruchového oblouku proti zemi

Postup zkoušky je totožný jako v kap. 5.3.1. Zkušební proud je nastaven nejdříve na 5 A a poté na 75 A za účelem vytvoření poruchového oblouku proti zemi. První případ pro zkušební proud 5 A musí AFDD vypnout dle Tabulka 2 a druhý případ pro zkušební proud 75 A dle Tabulka 3.

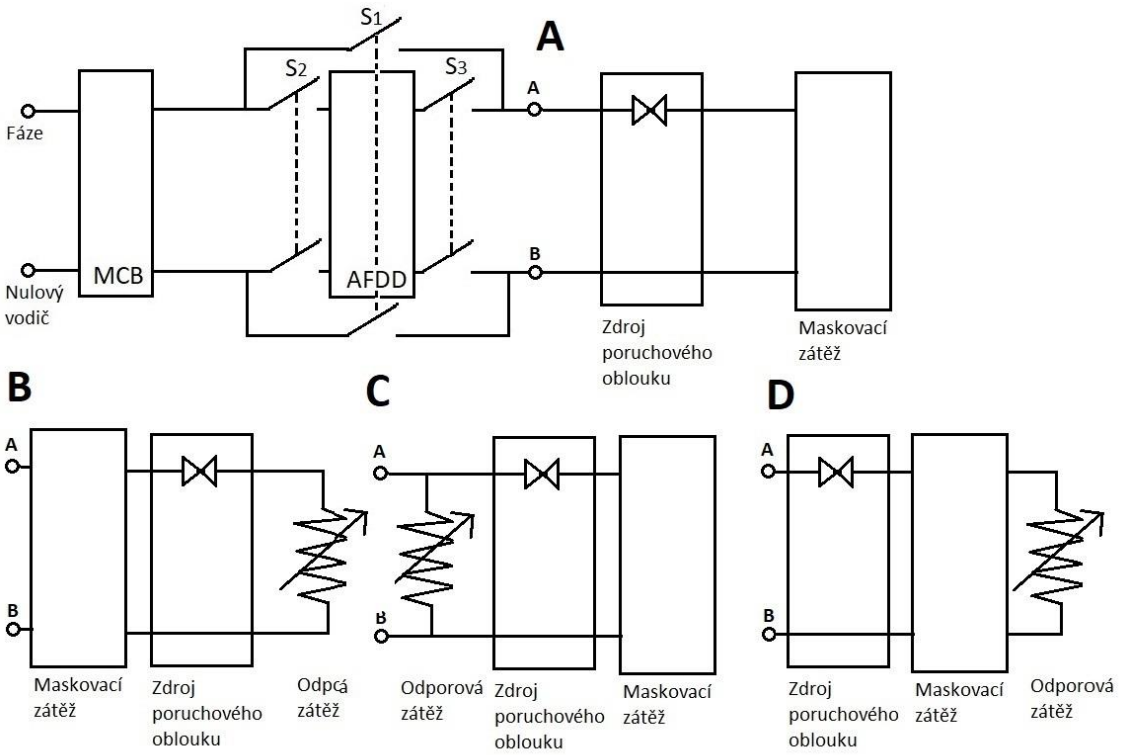
5.4 Zkouška rušení z maskovacích zátěží

Tato zkouška dle normy [3] poskytuje ověření schopnosti AFDD detekovat poruchový oblouk, vyskytuje-li se v obvodu zátěž produkující vysokofrekvenční rušení. U této zkoušky je možné použít buď vzorek kabelu (5.1.2), nebo generátor oblouku (5.1.1). Pro potřeby této zkoušky je provedena nejprve první část zkoušek bez rušivé maskovací zátěže obdobné jako u zkoušky sériového oblouku viz 5.2.1 pouze s omezeným proudem 2,5 A (pro AFDD s jmenovitým napětím 230 V) nastaveným odporovou zátěží [3].

Druhá část zkoušek je realizována s rušivými maskovacími zátěžemi za použití totožné přídavné odporové zátěže. Obvod je zapojen v každé konfiguraci viz Obr. 5.7.

Pro AFDD na 230 V musí být zkoušky provedeny dle normy [3] s každou z následujících maskovacích zátěží:

a) Vysavač s univerzálním motorem. Zapnutý a při plném zatížení a dimenzovaný na 5 až 7 A.
b) Elektronicky spínaný zdroj s minimálním zatěžovacím proudem 2,5 A.
c) Motor s rozběhovým kondenzátorem a se vzduchovým kompresorem o výkonu 2,2 kW a se špičkovým zapínacím proudem 65 A.
d) Elektronický stmívač žárovek 600 W.
e) Dvě zářivky o výkonu 40 W spolu s odporovou zátěží 5 A.
f) Halogenové žárovky o výkonu 12 V (napájené transformátorem s celkovým výkonem minimálně 300 W) spolu s odporovou zátěží 5 A.
g) Elektrický spotřebič typu vrtačka o výkonu minimálně 600 W.



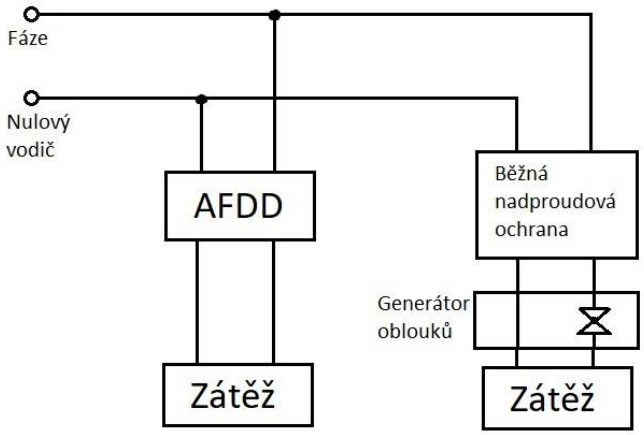
Obr. 5.7: Schéma zapojení zkoušky maskovacích zátěží

5.5 Zkouška nežádoucího vypnutí

Je nutné, aby AFDD nevypnulo v situacích, kdy vypínat nemá. Tato funkce je ověřena zkouškou nežádoucího vypnutí.

5.5.1 Případ vzájemného ovlivnění přístrojů

Jak lze vidět z obrázku, dva obvody jsou napájeny ze stejné fáze a se stejným nulovým vodičem. Jsou instalovány co nejblíže u sebe. V obou obvodech je připojena odporová zátěž odebírající proud 5 A. Jeden obvod obsahuje ochranu AFDD a druhý obvod obsahuje běžnou nadproudovou ochranu (například jistič) a připojený generátor oblouku. V obvodu s generátorem oblouku je dle postupu v 5.2.3 vyvolán oblouk s délkou trvání 0,5 s. AFDD nacházející se v druhém obvodě nesmí vybavit [3].



Obr. 5.8: Schéma pro nežádoucí vypnutí – vzájemné ovlivnění přístrojů

5.5.2 Případ s různými rušivými zátěžemi

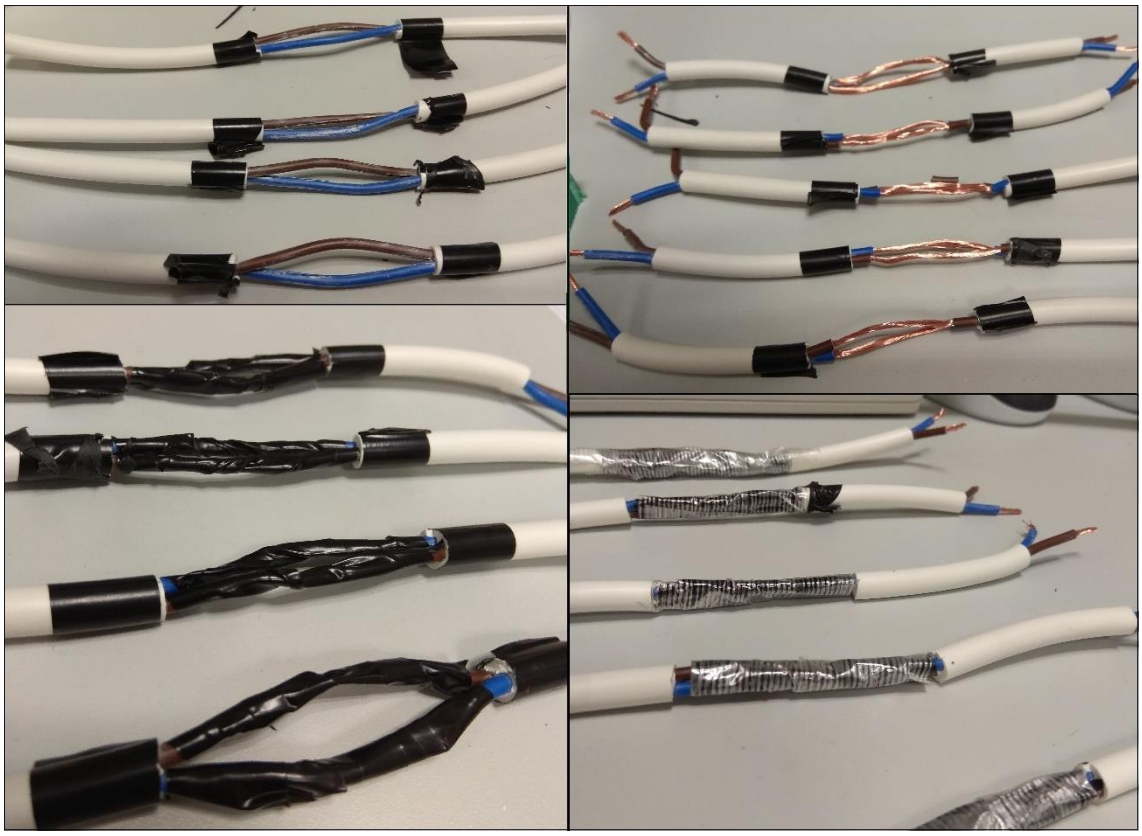
Tato zkouška je realizována obdobným způsobem se stejnými zátěžemi jako v podkapitole 5.4, pouze bez připojení vzorku kabelu nebo generátoru oblouku. AFDD nesmí být ovlivněna vysokofrekvenčním rušením, které tyto zátěže produkují. Jednotlivé zátěže musí být během zkoušky napájeny minimálně po dobu 5 sekund s minimálními pěti cykly operací start/stop [3].

6 TESTOVACÍ PŘÍPRAVKY POUŽITÉ PRO VZNIK OBLOUKU

Pro účely této práce byly vyrobeny testovací vzorky kabelu (viz 5.1.2) a také testovací vzorek, tzv. jiskřiště. Dále byl využit již vyrobený generátor oblouku.

6.1 Testovací vzorek kabelu

Postup výroby testovacího vzorku kabelu byl v souladu s technickou normou ČSN EN 62606 [3]. Pro výrobu byl použit kabel H05VV-F se dvěma vodiči s lankovým jádrem, který je rovněž touto normou doporučován. Postup výroby je zobrazen na Obr. 6.1. Po odstranění izolace uprostřed vodiče na délce 50 mm byla na obnažené vodiče aplikována dvojitá vrstva černé PVC pásky elektrické kvality a následně ještě celé překryté páskou se skleněnými vlákny (výrobce pásky: TESA). Tato páska díky vyztužení skleněnými vlákny dosahuje větší pevnosti a plní funkci ochrany karbonizované vodivé dráhy.

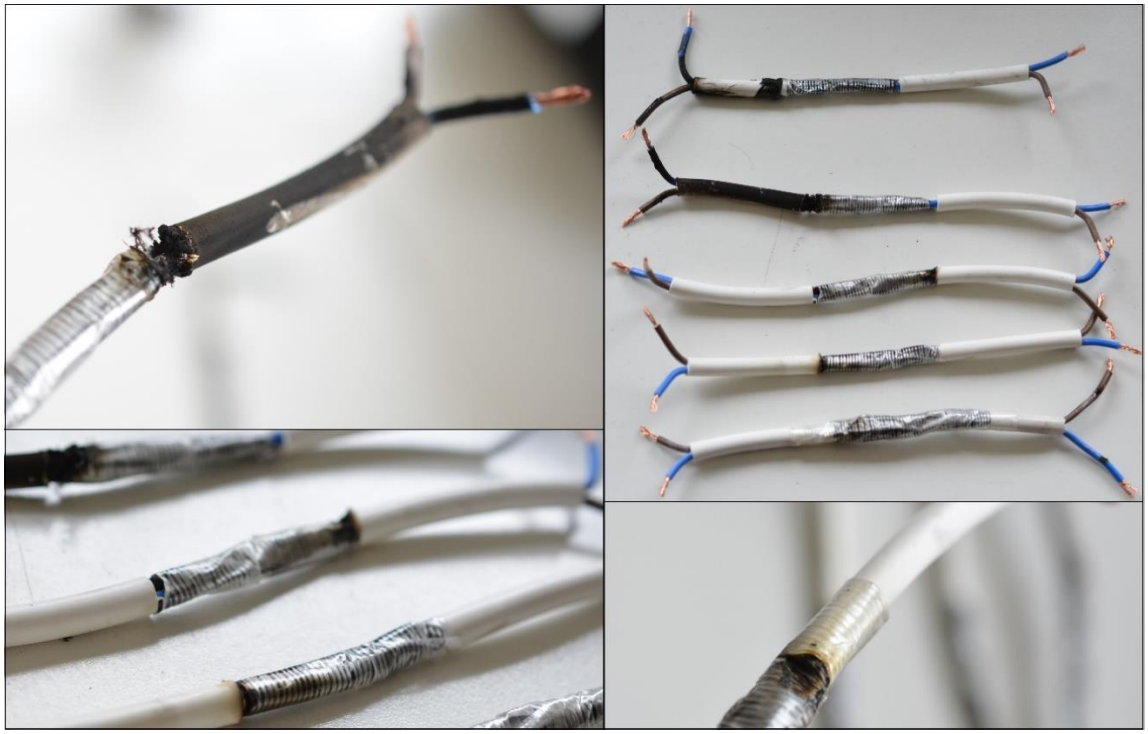


Obr. 6.1: Postup výroby testovacího vzorku kabelu

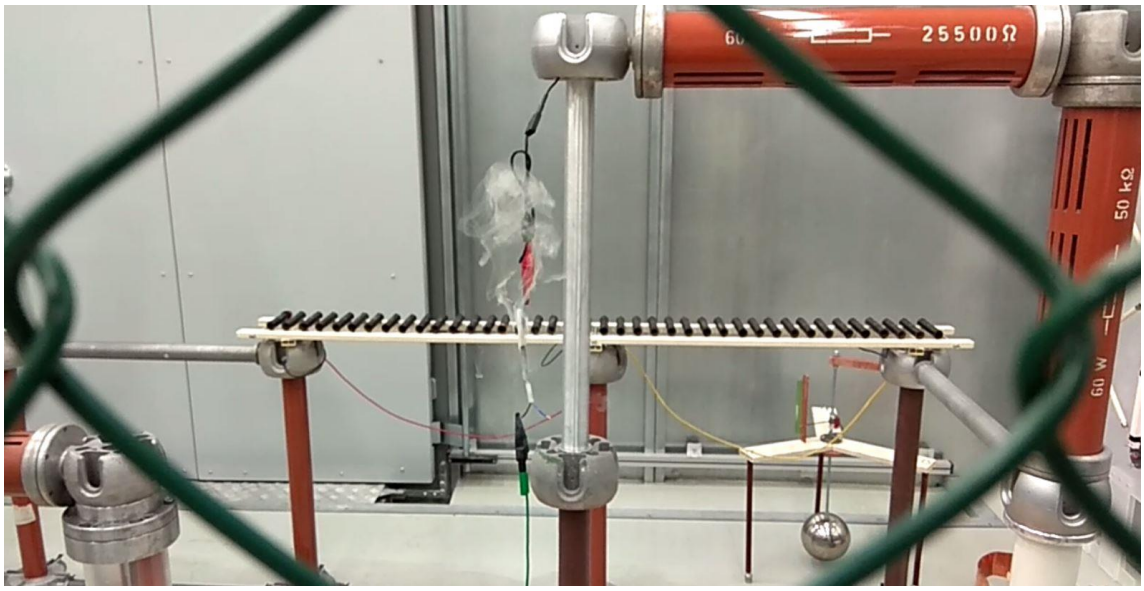
Takto připravený vzorek kabelu byl následně zapojen tak, aby se mezi dvěma obnaženými vodiči omotanými černou PVC páskou vytvořila karbonizovaná vodivá dráha (Obr. 6.2). Vzorek byl připojen k obvodu, který dodával zkratový proud 30 mA

a napětí naprázdno 7 kV. Ke karbonizování vodivé dráhy na izolaci docházelo v průměru po deseti sekundách, kdy byl obvod napájen (viz Obr. 6.3). Záznam jednoho přípravku připojeného na tento obvod lze vidět na videu *vzorek_1.mp4* v příloze na DVD.

Ověření karbonizované vodivé dráhy proběhlo připojením vzorku na obvod se 100 W/120 V žárovkou. Tato vodivá dráha se považovala za kompletní, pokud zmíněná žárovka v obvodu začala svítit při 120 V. Tomuto ověření vyhovělo všech pět vzorků.



Obr. 6.2: Karbonizovaná vodivá dráha na vzorku kabelu



Obr. 6.3: Karbonizace vzorku kabelu

6.2 Jiskřiště

Dále byl pro účely této práce vyroben zkušební přípravek – jiskřiště (Obr. 6.4), které rovněž jako výše popsaný karbonizovaný vzorek kabelu simuluje poruchu kabelu v reálné elektroinstalaci.

Na tomto jiskřišti byl použit již zmíněný kabel H05VV-F se dvěma vodiči s lankovým jádrem o průřezu 1,5 mm^2 a také dva vodiče H05V-K s plným jádrem o průřezu 1,5 mm^2. Tyto měděné vodiče jsou připevněné na dřevěném podstavci s tím, že část izolace byla z těchto vodičů pro účely zapálení oblouku odstraněna. Zapálení elektrického oblouku je dosaženo nasypáním prášku grafitu získaného z obyčejné tužky s grafitovou tuhou na obnažené vodiče.

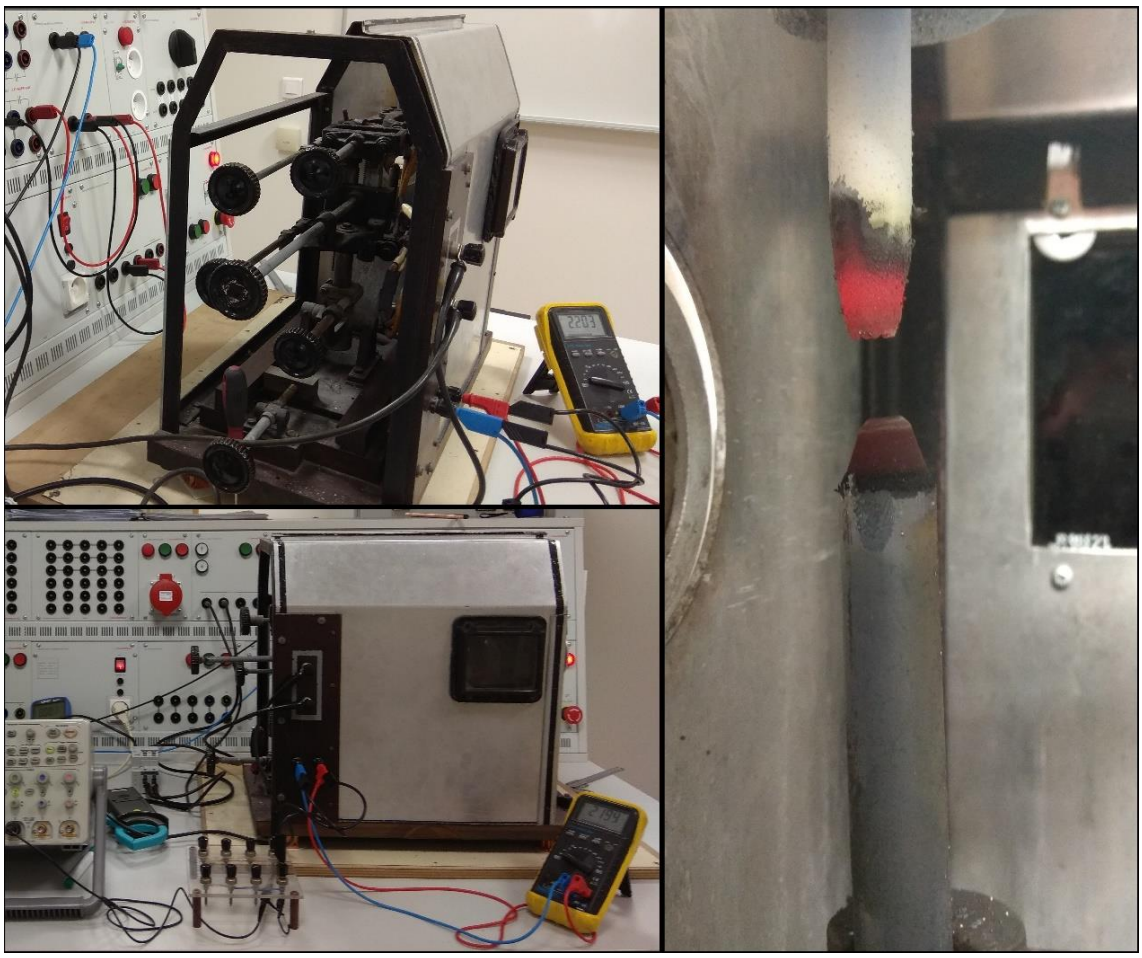
Obr. 6.4: Jiskřiště

6.3 Generátor oblouku

Jako generátor oblouku (Obr. 6.5) byl využit již dostupný přípravek v laboratoři elektrických přístrojů T12/SC2.56. Přípravek funguje na principu popsaném v kap. 5.1.1. Obraz zapáleného oblouku pro potřeby měření jeho délky je možné přes vestavěnou čočku promítat na stínítko.

Na Obr. 6.5 je také zobrazen detail uhlíkových elektrod. S vrchní elektrodou lze pomocí vestavěného mechanismu pohybovat, díky čemuž je možné zapálit oblouk.

Bezpečnostní opatření proti nechtěnému dotyku živých částí je zde řešeno plechovým krytem, ve kterém se nachází okénko s vestavěným svářecím sklíčkem. Pomocí tohoto opatření lze bez rizika poškození zraku UV zářením pozorovat zapálený oblouk.



Obr. 6.5: Generátor oblouku

7 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ S PŘÍSTROJEM AFDD

Praktické měření s přístrojem AFDD probíhala v prostorách areálu CVVOZE v laboratoři spínacích přístrojů a v laboratoři elektrických přístrojů T12/SC2.56. Měření byla zaměřena na simulaci poruch v elektroinstalaci s výskytem sériového poruchového oblouku, na který dostupné jističe, pojistky ani proudové chrániče nedokáží reagovat. Pro tyto účely byl použit generátor oblouku viz kap. 6.3 a testovací přípravky viz kap. 6.1 a 6.2. Parametry zkušebního obvodu byly nastavovány pomocí odporové zátěže.

7.1 Analýza obvodu s elektrickým obloukem

Prvotní analýza obvodu, ve kterém se vyskytne elektrický oblouk, byla měřena bez přístroje AFDD pouze s generátorem oblouků (viz 5.1.1). Odporová zátěž byla připojena na konstantní napětí zdroje U_z = 133 V a při třech velikostech proudu I_{z1} = 9,4 A; I_{z2} = 13,8 A; I_{z3} = 19 A (efektivní hodnota). Při těchto nastavených parametrech testovacího obvodu byl v generátoru oblouku zapálen oblouk. Pro měření byly použity uhlíkové elektrody. Pomocí osciloskopu Agilent Technologies DSO6054A byl snímán průběh napětí a proudu obloukem při různých délkách oblouku. Z naměřených hodnot je patrné (Tabulka 4, 5 a 6), že výskyt sériového poruchového oblouku v obvodu má vlivem konečné impedance připojené zátěže za následek snížení tekoucího pracovního proudu obvodem, který se se vzrůstající délkou oblouku dále snižuje. Z tohoto důvodu nejsou schopné nadproudové přístroje (jistič, pojistka) tuto poruchu detekovat a včas odpojit obvod.

Tabulka 4: Naměřené hodnoty oblouku při I_{z1} = 9,4 A

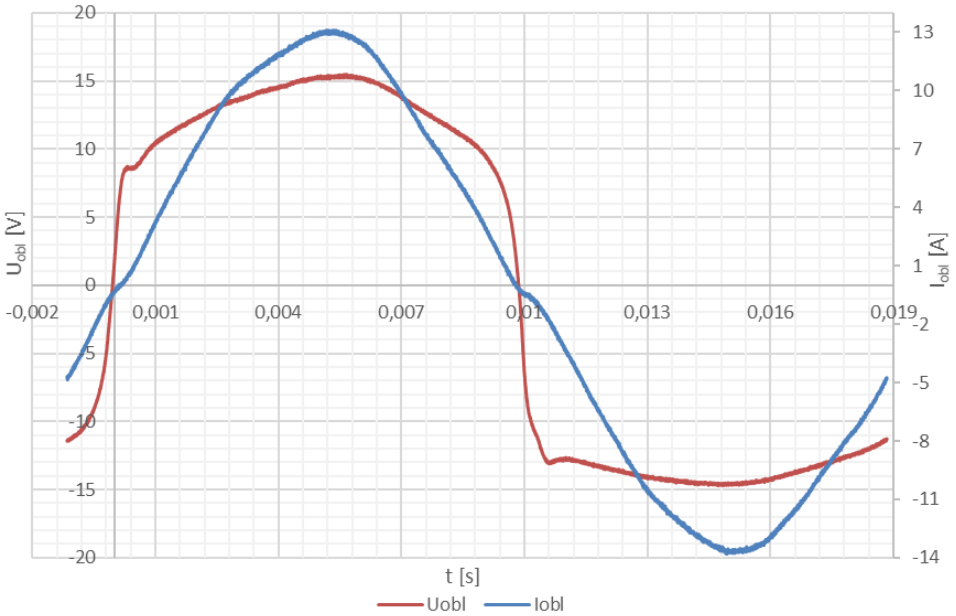
No.	U_{obl}	I_{obl}	a_{obl}
	[V]	[A]	[mm]
1	21,6	8,2	4,1
2	33,0	7,4	6,5
3	40,2	6,9	11,7
4	51,0	6,1	16,5
5	63,0	5,3	21,5
6	72,0	4,7	23,0

Tabulka 5: Naměřené hodnoty oblouku při I_{z2} = 13,8 A

No.	U_{obl}	I_{obl}	a_{obl}
	[V]	[A]	[mm]
1	19,2	12,7	2,8
2	31,0	11,5	6,7
3	40,0	10,6	10,6
4	50,0	9,4	16,8
5	60,1	8,4	21,5
6	70,8	7,4	25,3
7	79,6	6,1	28,6

Tabulka 6: Naměřené hodnoty oblouku při I_{z3} = 19 A

No.	U_{obl}	I_{obl}	a_{obl}
	[V]	[A]	[mm]
1	21,0	17,2	4,1
2	29,8	15,8	8,0
3	40,8	14,1	15,6
4	48,3	12,7	19,3
5	59,7	11,1	25,5
6	70,4	9,6	30,8
7	80,4	7,9	33,0

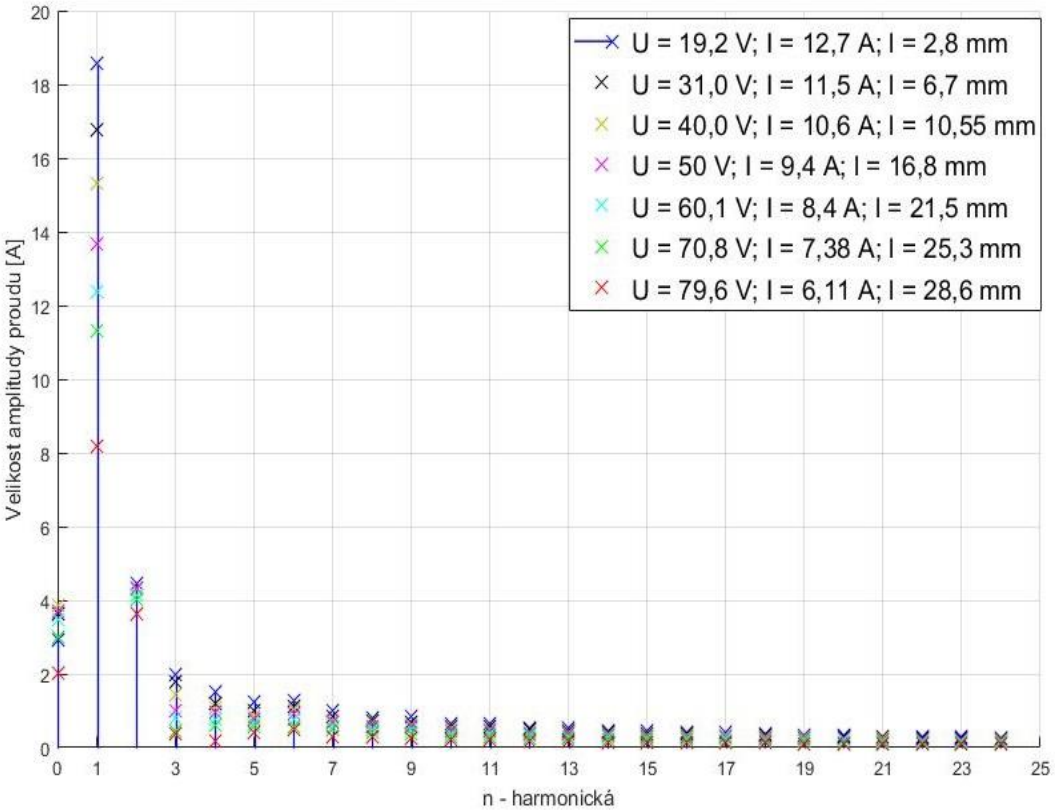


Obr. 7.1: Průběh napětí a proudu na oblouku při I_{z2} = 13,8 A; a_{obl} = 2,8 mm

Na Obr. 7.1 je vynesen průběh napětí a proudu na oblouku při délce oblouku 2,8 mm. Z obecné teorie je známo, že popis dějů pomocí deformovaných časových průběhů okamžitých hodnot napětí nebo proudů je obtížný. Jelikož byl změřený signál periodický, lze změřený průběh nahradit sumou stejnosměrné složky, základní harmonickou (odpovídá síťové frekvenci) a řadou vyšších řádů harmonických. Tyto sinusové složky vyšších řádů (harmonické) jsou celistvým

násobkem základní frekvence. Výsledný vztah periodické funkce v časové oblasti a funkce ve frekvenční oblasti se nazývá Fourierova řada. Jedná se tedy o speciální případ Fourierovy transformace [9]. Z důvodu časové náročnosti výpočtu Fourierovy transformace byl pro analýzu měřeného obvodu s generátorem oblouku použit algoritmus tzv. rychlé Fourierovy transformace (dále jen FFT). Ze získaných hodnot proudů bylo pomocí FFT programem MATLAB zjištěno frekvenční spektrum proudu oblouku. Frekvenční spektrum na obrázku Obr. 7.2 odpovídá variantě při I_{z2} = 13,8 A.

Na vodorovné ose tohoto frekvenčního spektra (Obr. 7.2) je vynesen řád harmonické a na svislé ose velikost amplitudy proudu. Je patrné, že dominantní složku tohoto spektra tvoří složka základní frekvence, tedy první harmonická odpovídající frekvenci 50 Hz. V tomto konkrétním případě pro nejkratší měřenou vzdálenost oblouku (a = 2,8 mm) odpovídá hodnota amplitudy proudu cca 18,5 A, tedy cca 13 A efektivní hodnoty proudu. Hodnoty "nulté harmonické" odpovídají stejnosměrné složce. Třetí harmonická odpovídá frekvenci 150 Hz, pátá harmonická odpovídá frekvenci 250 Hz, sedmá harmonická odpovídá 350 Hz atd. Sudé harmonické lze zanedbat, jelikož bývají ve většině případů několikanásobně menší než ty liché a vznikají jen při určitých případech. Větší velikosti sudých harmonických v tomto konkrétním případě jsou zapříčiněny vnikem rušení v měřeném obvodu a nepřesností měřícího přístroje.



Obr. 7.2: Frekvenční spektrum oblouku při I_{z2} = 13,8 A

AFDD ovšem vyhodnocují frekvence oblouku daleko vyšší, než které lze zjistit z Obr. 7.2 (pásmo 22 až 24 MHz viz 3.2.3). Tomu by teoreticky odpovídala až harmonická čísla 440 000 až 480 000. Tyto vysoké frekvence bohužel pomocí osciloskopu Agilent DSO6054A, který byl pro toto měření k dispozici, nebylo možné změřit. Vzhledem k tomu, že tento osciloskop pracuje s osmi-bitovým rozlišením A/D převodníku (256 kvantovacích úrovní), zůstávají při spektrální analýze některé složky pod šumovým prahem.

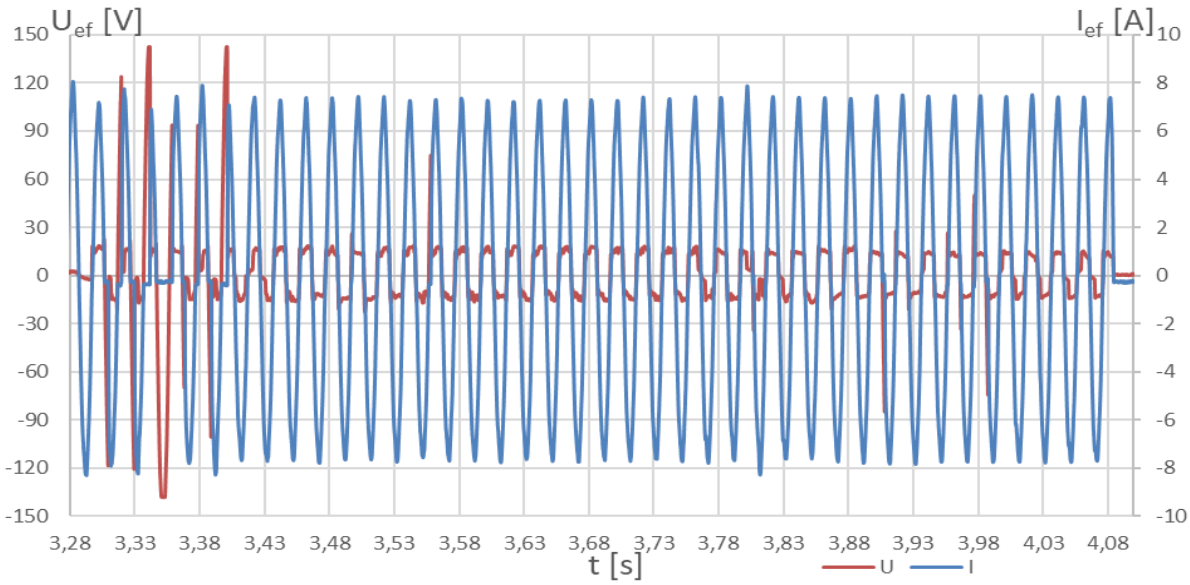
7.2 Zkušební obvod s generátorem oblouku

V další části bylo do stejného obvodu s generátorem oblouku jako v předešlé podkapitole připojeno AFDD v kombinaci ARC-16-1N-3M + LTE B16. Nutno podotknout, že energie, která vzniká při hoření oblouku v generátoru oblouku, je přibližně 2,5krát menší, než energie oblouku vytvořeného přes karbonizovaný vzorek kabelu. Z tohoto předpokladu vychází mezní doba vypínání v rozsahu 2,5krát větší než hodnoty uvedené v Tabulka 2 a Tabulka 3 [3].

Nejdříve byly v generátoru oblouku namontované uhlíkové elektrody, použité v předchozím případě. Při napětí ze zdroje U_z = 130 V (AFDD by mělo fungovat již od 75 V) a nastaveném zkušebním proudu pomocí odporové zátěže I = 8 A byl zapálen oblouk. Měření ukázalo, že v případě dvou uhlíkových elektrod dojde k zapálení oblouku s takovými vlastnostmi, které AFDD nevyhodnotí jako poruchový oblouk a obvod tak nevypne. Proud tekoucí tímto obloukem nemá typický průběh poruchového oblouku (ani jeho VF složku) vyskytujícího se při poruchách v běžné elektroinstalaci a díky tomu tento AFDD považuje za bezporuchový.

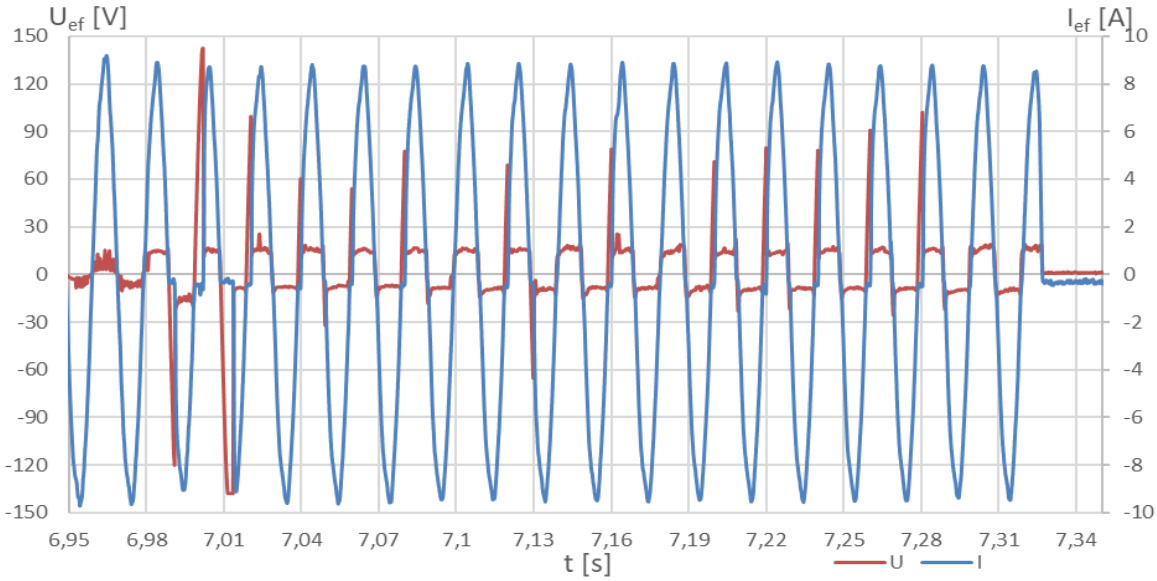
Následně byla jedna uhlíková elektroda vyměněna za uhlíkovou elektrodu potaženou měděným pláštěm. Napětí ze zdroje i nastavený proud odporovou zátěží zůstal na stejné hodnotě. V tomto případě byl výsledek již příznivější. Po prvních pár pokusech, kdy sice oblouk hořel, ale AFDD na něj nereagovalo, došlo už k několika úspěšným vypnutím. Zřejmě vlivem zahřátí vyměněné elektrody po neúspěšných pokusech a zejména díky měděnému plášti dosahoval oblouk takových parametrů, na které AFDD už reagovalo.

Na Obr. 7.3 je zachycen průběh napětí a proudu sériového oblouku a jeho vypnutí s těmito elektrodami. Maximální proud obloukem byl 8 A. Mezní doba vypínání pro tento proud dle Tabulka 2 je 0,35 s (určeno lineární interpolací mezi hodnotami 0,5 s a 0,25 s). Vzhledem k použitému generátoru oblouku je tato hodnota 2,5krát větší. AFDD v tomto případě musí dodržet mezní hodnotu 0,875 s. Jako počátek hoření oblouku byl považován čas 3,297 s na Obr. 7.3. K vypnutí obvodu došlo v čase 4,084 s. Celková doba vypnutí byla 0,787 s. AFDD při tomto pokusu vypnulo obvod spolehlivě.



Obr. 7.3: Průběh vypínání sér. oblouku s uhlíkovou elektrodou s měděným pláštěm (8A)

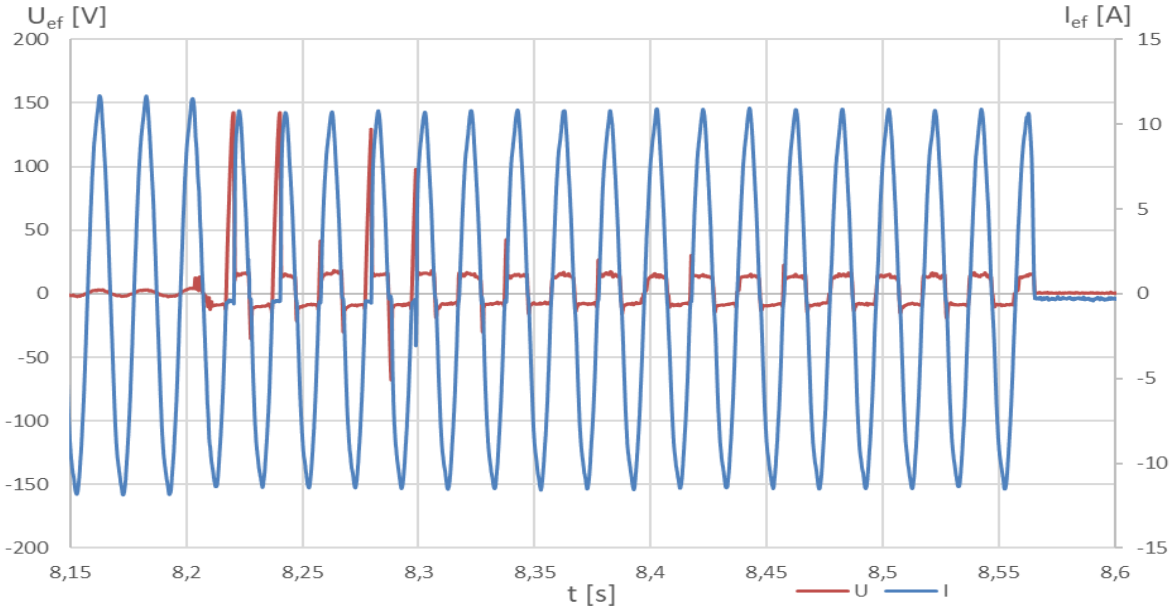
Díky těmto poznatkům byla pro další měření uhlíková elektroda potažená měděným pláštěm vyměněna za měděný vodič o průměru 1,5 mm². Pro další měření bylo zapotřebí zvýšit napětí ze zdroje na U_z = 180 V. Na Obr. 7.4 je vynesen průběh oblouku při proudu 9,5 A. Mezní doba vypínání je pro tento případ 0,688 s. Počátek hoření oblouku je uvažován v čase 6,98 s. K vypnutí došlo v čase 7,325 s. AFDD v tomto případě vypnulo za 0,345 s, čímž vyhovělo mezní hodnotě.



Obr. 7.4: Průběh vypínání sér. oblouku s měděným vodičem (9,5 A)

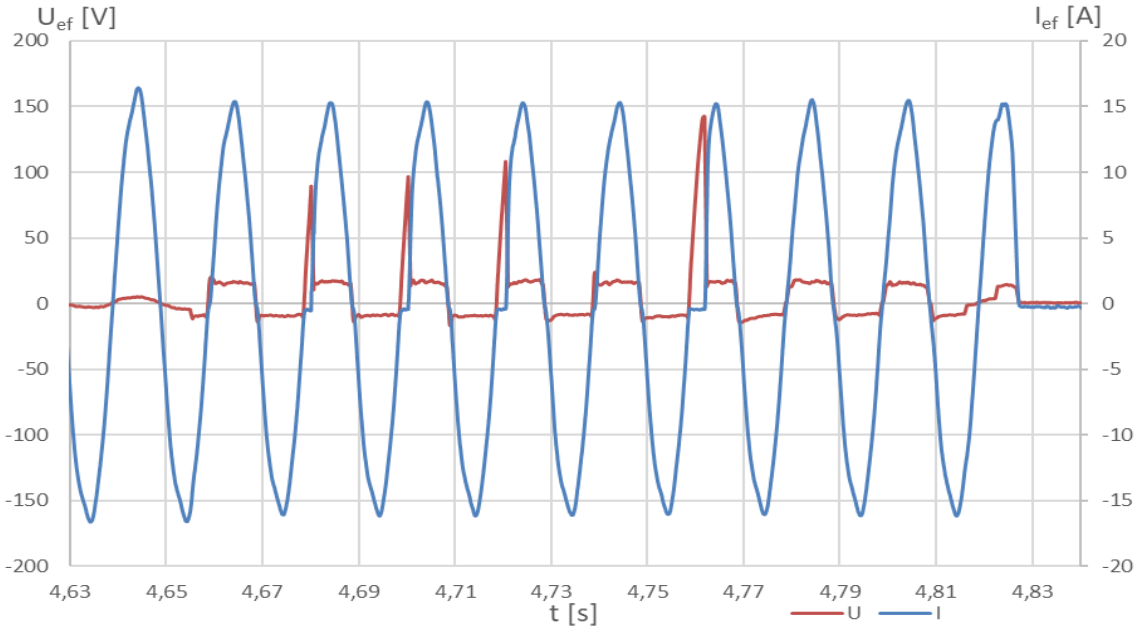
Na Obr. 7.5 je vynesen průběh oblouku a vypínání při proudu 12 A (U_z = 180 V). Mezní doba vypínání je pro tento případ 0,542 s. Počátek hoření oblouku je

uvažován čas 8,22 s. Obvod byl vypnut v čase 8,565 s. Při tomto pokusu AFDD vyplo za 0,345 s a vyhovělo tak mezní době.



Obr. 7.5: Průběh vypínání sér. oblouku s měděným vodičem (12 A)

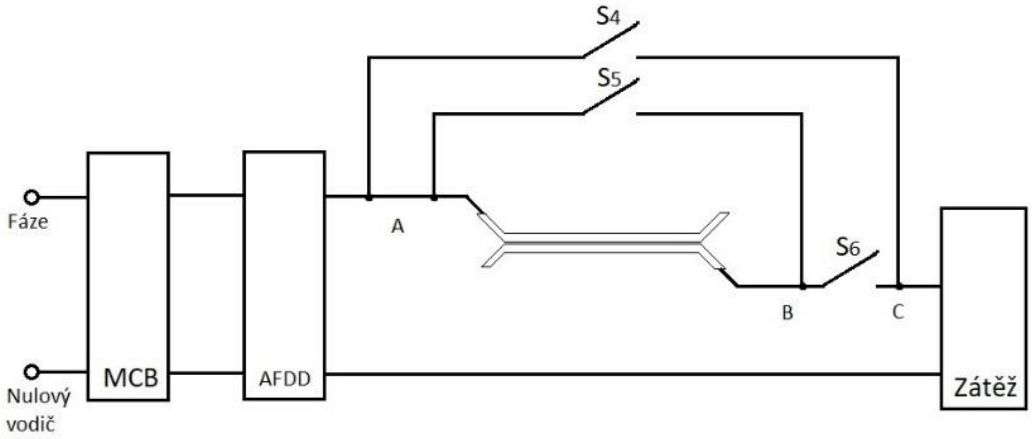
Na Obr. 7.6 je vynesen průběh oblouku a vypínání při max. proudu obloukem 16 A (U_z = 180 V). Mezní doba vypínání je pro tento případ 0,375 s. Počátek hoření oblouku je uvažován čas 4,657 s. K vypnutí došlo v čase 4,826 s. AFDD obvod vypnulo po 0,169 s od zapálení oblouku. Mezní době pro vypnutí vyhovělo i v tomto případě.



Obr. 7.6: Průběh vypínání sér. oblouku s měděným vodičem (16 A)

7.3 Zkušební obvod s připojeným vzorkem kabelu

V této části měření byla simulována porucha na elektroinstalaci, kdy se v obvodu náhle objeví sériový oblouk (kap. 5.2.1). AFDD tuto poruchu musí odstranit v době uvedené v Tabulka 2. Zkušební obvod byl zapojen dle Obr. 5.3 v mírně zjednodušené formě viz Obr. 7.7.



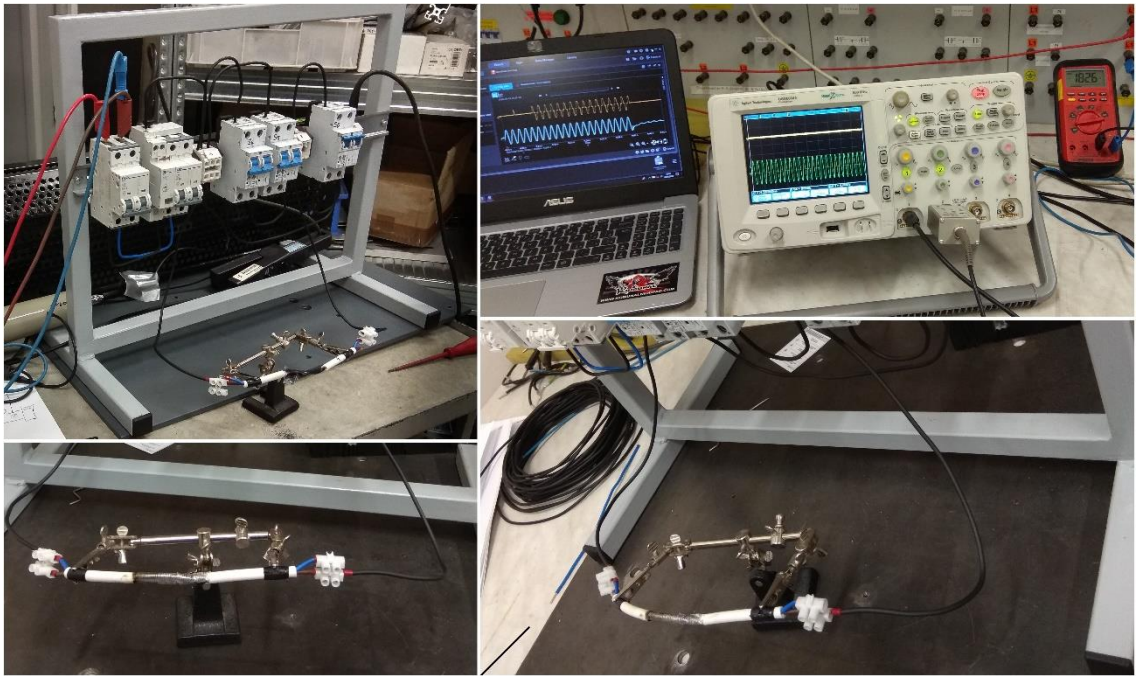
Obr. 7.7: Schéma zapojení zkušebního obvodu s připojeným vzorkem kabelu

Měřící pracoviště je zobrazeno na Obr. 7.8. K měření průběhů napětí a proudu v obvodu byl použit osciloskop Agilent Technologies DSO6054A s napěťovou sondou Tektronix P6015A s převodem 1:1000 a proudovou sondou s převodem 100mV/A. K osciloskopu byl přes UTP kabel připojen notebook se softwarem BenchVue od firmy Keysight pro ukládání dat. AFDD bylo použito v provedení s jističem LTE B16. Stejný jistič byl předřazen i před přístroj AFDD z důvodu bezpečnosti a názorné demonstrace případu zapůsobení přístroje AFDD, kde běžná nadproudová ochrana nezareaguje.

Se zapnutými spínači S_4, S_5 a S_6 byl pomocí odporové zátěže nastaven zkušební proud oblouku na 5 A. Tuto hodnotu zkušebního proudu oblouku musí AFDD vypnout v čase menším než 0,5 s viz Tabulka 2. Dle normy [3] bylo proběhlo nastavení tohoto proudu při sníženém jmenovitém napětí o 50 V. Proud byl tedy nastavován při hodnotě napětí 180 V. Spínač S_4 byl poté vypnut. Vypnutím spínače S5 byl vzorek kabelu připojen do série se zátěží.

Při tomto měření bylo otestováno všech pět připravených vzorků (kap. 6.1). Bohužel u všech pěti vzorků nedošlo k zapálení takového stabilního oblouku, který by zapříčinil vypnutí AFDD. Karbonizace mezi vodiči byla ve většině pokusů narušena a docházelo zde ke dvěma různým případům. V prvním případě byla vytvořena vodivá cesta a po úvodním „zajiskření“ začal přes vodivou cestu téct proud bez zapálení oblouku. V druhém případě byla po úvodním „zajiskření“ karbonizace narušena tím způsobem, že zde vodivá cesta nevznikla a proud přestal přes přípravek téct. Tyto vzniklé problémy mohly být zřejmě zapříčiněny

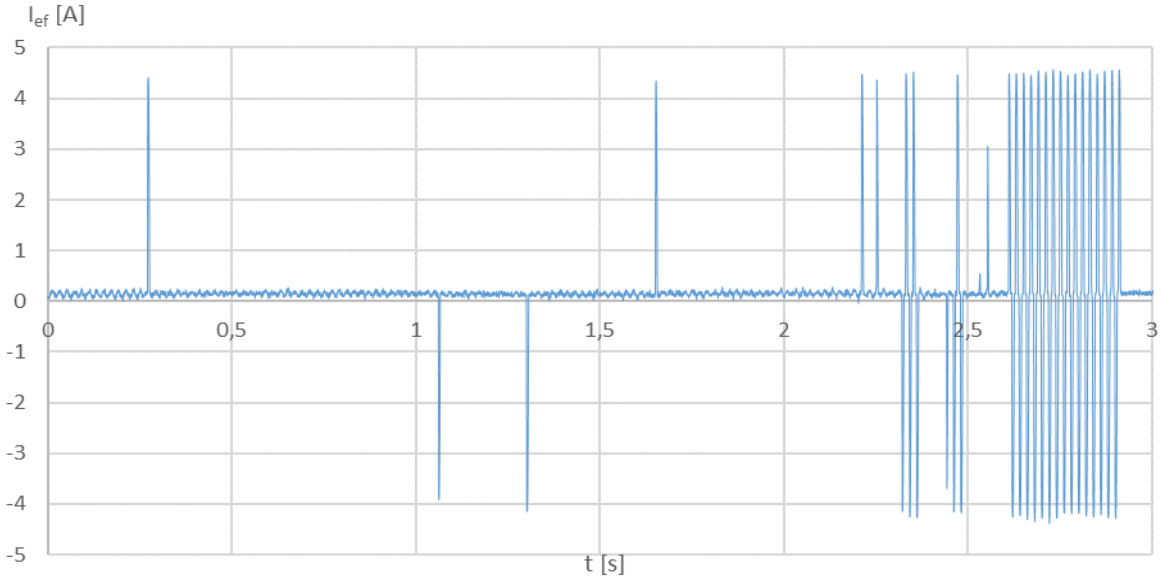
nedostatečnou karbonizací přípravku. Některé neúspěšné pokusy ověření funkce přístroje AFDD lze vidět na videu *zk_ser_1.mp4* a *zk_ser_2.mp4* v příloze na DVD.



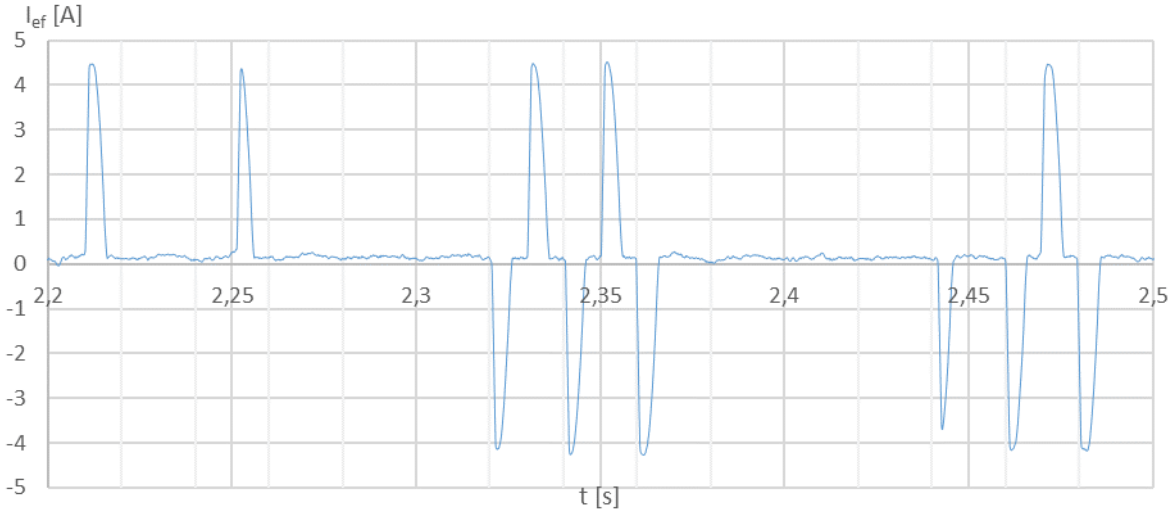
Obr. 7.8: Měřící pracoviště

Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k principu zapálení oblouku použitém ve vyrobeném jiskřišti (kap. 6.2). Po částečném uvolnění vodičů na karbonizované části přípravku byla na vodiče nasypána jemná vrstva prášku grafitu z tuhy na kreslení. Na takto upraveném přípravku již k zapálení oblouku s vysokou stabilitou došlo, AFDD oblouk detekovalo a obvod vypnulo (lze vidět na videu *zk_ser_3.mp4* v příloze na CD).

Na Obr. 7.9 je zobrazen celý změřený průběh efektivní hodnoty proudu v obvodu po připojení testovacího vzorku kabelu. V časech přibližně t = 0,25 s, t = 1,1 s, t = 1,3 s a t = 1,65 s lze vidět první půlperiody hoření oblouku, kde ale po průchodu proudu nulou nedošlo k opětovnému zapálení. Ke stejnému případu docházelo i v časech mezi t = 2,2 s a t = 2,6 s. Interval lze vidět na Obr. 7.10, kde je vynesen detail. Na tento počáteční oblouk s nízkou stabilitou AFDD ještě nereagovala a nevypnula obvod. Poruchový oblouk s vyšší stabilitou vznikl v čase t = 2,625 s (Obr. 7.9).

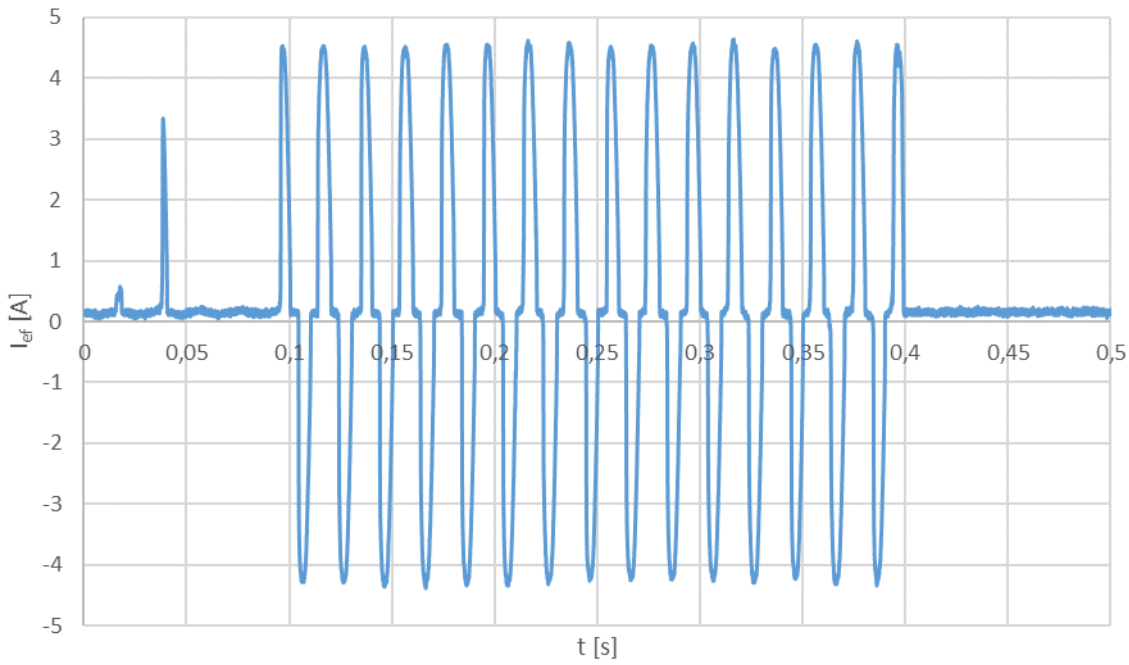


Obr. 7.9: Průběh proudu v obvodu po připojení přípravku



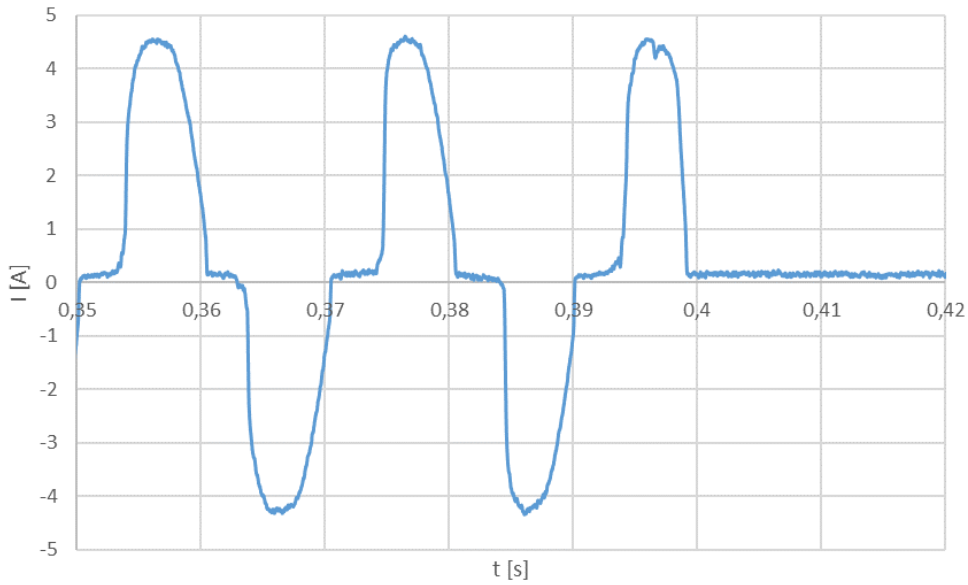
Obr. 7.10: Průběh proudu oblouku s nízkou stabilitou

Zobrazením celého průběhu hoření oblouku na Obr. 7.11 lze určit dobu vypnutí přístrojem AFDD (pozn.: pro zjednodušení byla časová osa upravena oproti předchozím průběhům). Konkrétně ze změřeného průběhu proudu na Obr. 7.11 je patrné, že v čase přibližně t = 0,02 s a zejména pak v čase t = 0,04 s dojde k prvním náznakům zapálení oblouku. K zapálení oblouku s vyšší stabilitou však dojde až v čase přibližně t = 0,09 s. V přístroji AFDD postupně narůstá chybový integrátor (viz kap. 3.2.1). V čase cca t = 0,4 s AFDD vyhodnotí situaci jako sériový oblouk v obvodu a dojde k vypnutí obvodu. Celková doba vypínání byla t = 0,31 s. AFDD tedy v tomto případě vyhovělo času stanoveného normou [3] viz Tabulka 2.



Obr. 7.11: Průběh efektivní hodnoty proudu obloukem

Detailní průběh vypnutí oblouku přístrojem AFDD je znázorněn na Obr. 7.12, kde lze také vidět příklad průběhu sériového proudu obloukem. Při průchodu napětí nulou dochází k uhasnutí oblouku a poté k jeho znovu-zapálení. Z obrázku je patrné, že k vypnutí obvodu došlo v čase t = 0,399 s.

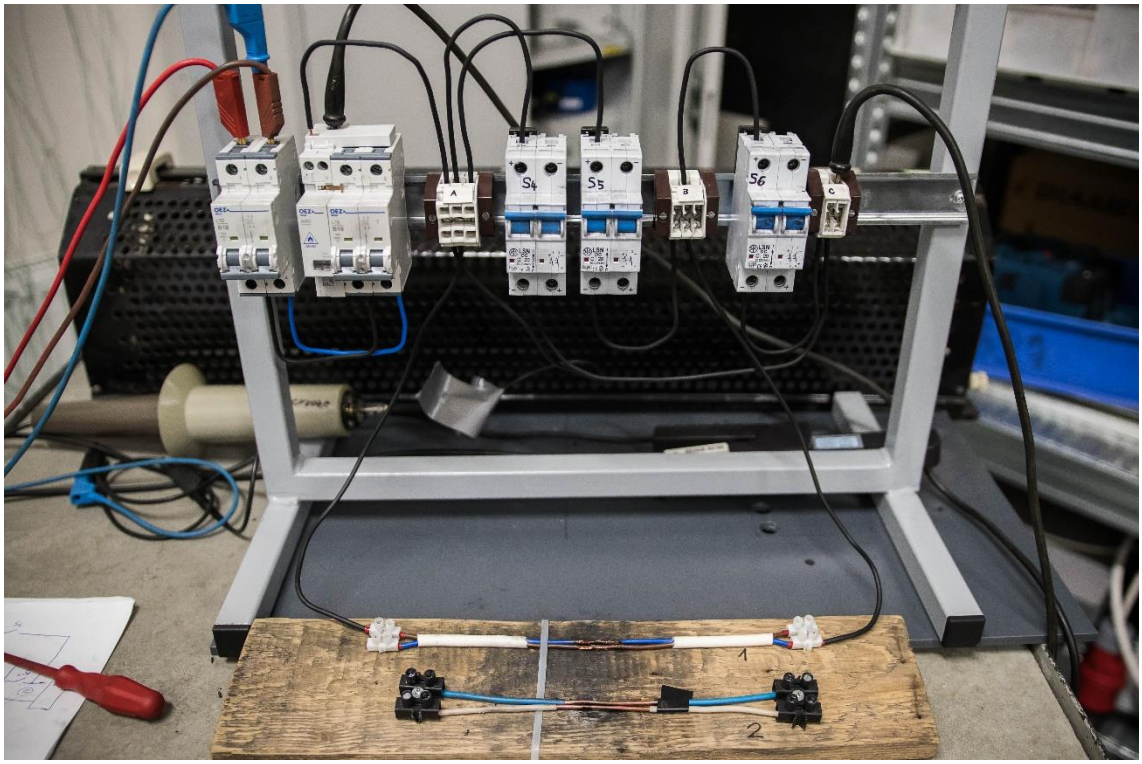


Obr. 7.12: Detail okamžiku vypnutí obvodu přístrojem AFDD

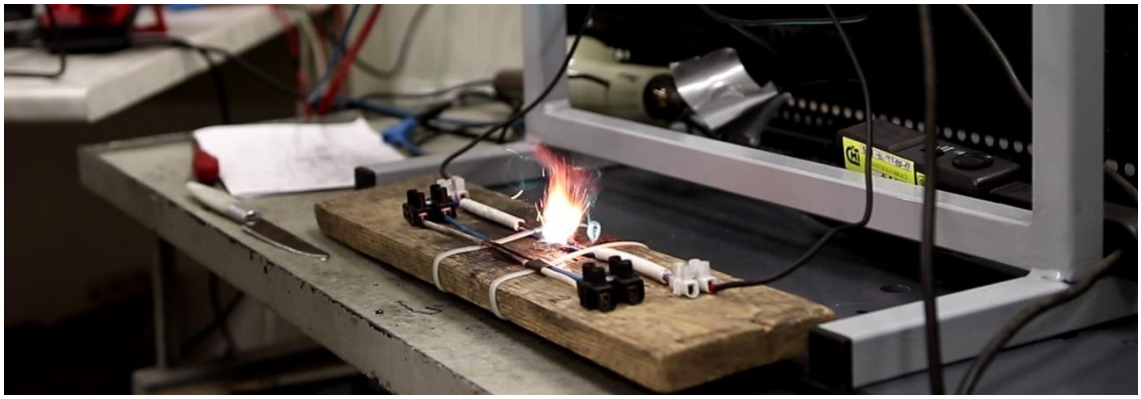
7.4 Zkušební obvod s připojeným jiskřištěm

Jiskřiště vyrobené dle kap. 6.2 bylo zapojeno do stejného zkušebního obvodu jako karbonizovaný vzorek kabelu na Obr. 7.7, kap. 7.3. Rovněž použité přístroje na měření veličin v obvodu byly totožné. Na obnažené vodiče byla za účelem vyvolání poruchového oblouku naškrábána grafitová tuha. Nastavení zkušebních proudů v obvodu bez vytvoření oblouku bylo dle normy [3] provedeno při sníženém napětí 180 V.

Na Obr. 7.13 je zachyceno měřící pracoviště a na Obr. 7.14 již zapálený sériový oblouk.



Obr. 7.13: Zkušební obvod s připojeným jiskřištěm

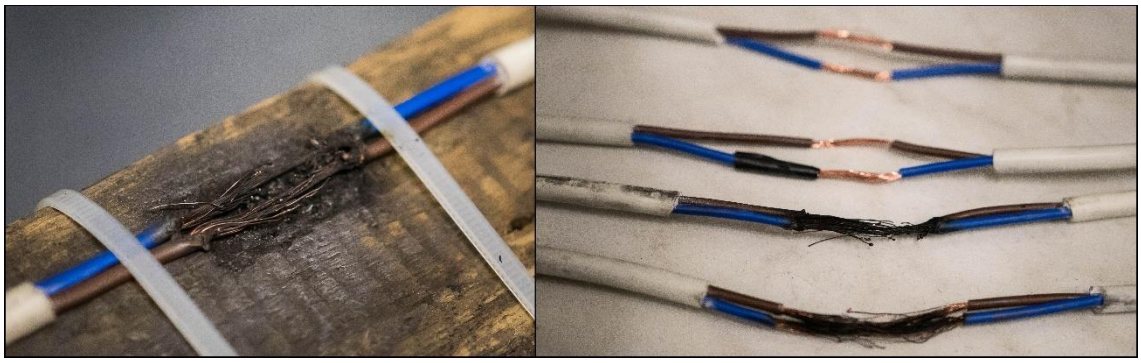


Obr. 7.14: Zapálený sériový oblouk v jiskřišti

Pro zkušební účely bylo nejprve provedeno jedenáct pokusů při zkušebním proudu 2,5 A a dvanáct pokusů při zkušebním proudu 5 A. AFDD bylo v provedení obloukové spouště ARC-16-1N-3M zapojené s jističem LTE B16. Zkoumal se vliv množství naškrábaného grafitu a vzdálenost vodičů na zapálení oblouku. Při těchto úvodních pokusech byl z celkových dvaceti dvou pokusů zapálen takový oblouk, který by již AFDD vyhodnotilo jako poruchu a obvod vyplo, jen třikrát. V ostatních pokusech docházelo jen pouze k slabému jiskření, nebo naopak ke svaření obou vodičů. K zapálení sérového oblouku s větší stabilitou docházelo vždy pouze v případě velmi malé vzdálenosti obou vodičů.

Všechny tři úspěšné pokusy byly realizovány na kabelu H05VV-F se dvěma vodiči s lankovým jádrem o průřezu 1,5 mm^2. Proto byl pro následující zkoušky využit právě tento kabel. Jedinou nevýhodou bylo jeho lankové jádro, které se poměrně rychle opalovalo a jednotlivá lanka ničila (Obr. 7.15). K zachování přibližně stejných vstupních podmínek pro všechny zkoušky byl po cca třech úspěšných pokusech kabel vyměněn za nový. Norma sice vyžaduje výměnu vzorku kabelu po každém měření, ale jelikož k následujícím zkouškám nebyl použit karbonizovaný vzorek (náchylnější k destrukci), nýbrž jiskřiště, nebyla tato činnost nutná.

V průběhu těchto pokusů začala použitá spoušť ARC signalizovat poruchu zařízení (LED ukazatel svítil červeno-oranžově). Spoušť se již nepodařilo uvést do provozu, a proto byla odeslána na reklamaci.



Obr. 7.15: Opálená lanka vodiče kabelu H05VV-F

V následujících podkapitolách jsou popsány realizované zkoušky pro ověření pracovních charakteristik při sériovém poruchovém oblouku. Tyto zkoušky byly provedeny dle normy [3] pouze se záměnou karbonizovaného vzorku kabelu za jiskřiště. Pro vybrané zkoušky byl u měřícího pracoviště umístěn fotoaparát na stativu, který z těchto zkoušek nahrával videozáznam. Veškeré pořízené videozáznamy lze nalézt v příloze této práce na DVD.

7.4.1 Náhlé objevení sériového oblouku v obvodu (ARC-16-1N-3M + LTE B16)

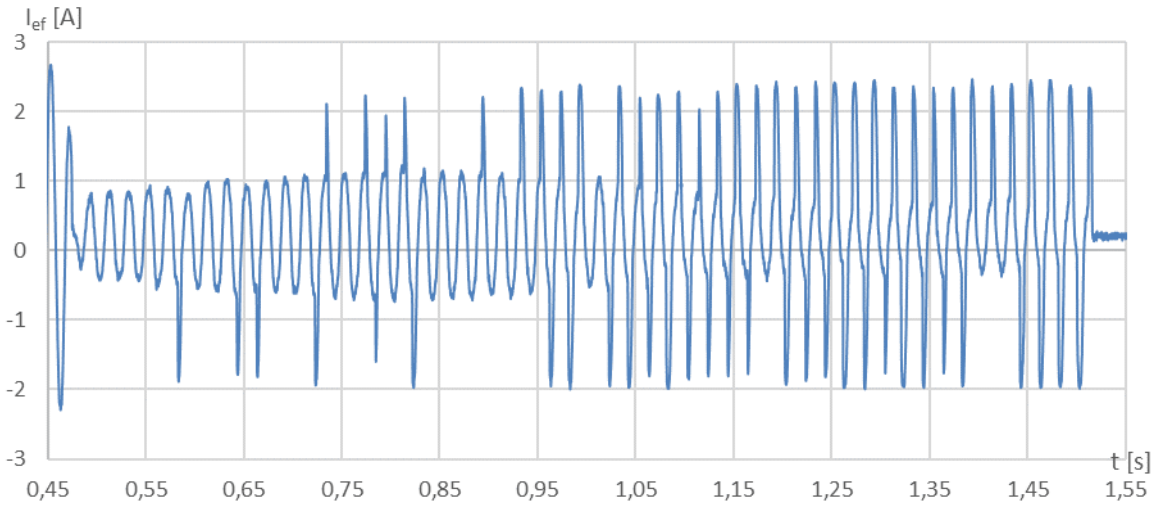
Tato zkouška byla provedena dle principu popsaném v kap. 5.2.1. Schéma zapojení pracoviště je stejné jako na Obr. 7.7. Použitá byla spoušť obloukové ochrany ARC-16-1N-3M s jističem LTE B16. Vypínací charakteristika pro tuto kombinaci dodaná výrobcem je v příloze na Obr. C 1.

Se zapnutými spínači S_4, S_5 a S_6 byl odporovou zátěží nastaven zkušební proud oblouku dle Tabulka 2 od nejnižší hodnoty proudu oblouku (2,5 A) do jmenovitého proudu AFDD (16 A) a poté spínač S_4 vypnut. Vypnutím spínače S_5 bylo jiskřiště připojeno do série se zátěží. Doba vypnutí se měřila třikrát.

Při jednotlivých pokusech nedocházelo k zapálení sériového oblouku s vyšší stabilitou v každém případě. Na tři úspěšné pokusy zapálení vycházely v průměru jeden až dva pokusy neúspěšné, kde docházelo většinou jen ke slabému jiskření. To bylo způsobeno zejména nedokonalostmi jiskřiště. Pro snahu zachovat stejné podmínky pro všechny po sobě jdoucí pokusy byl po každém jednotlivém pokusu spálený grafit odsán a naškrábán nový. Také po přepálení většího počtu lanek jádra vodiče byla provedena jeho výměna.

Doba vypnutí obvodu pro jednotlivé zkušební proudy nesmí překročit mezní hodnoty uvedené v Tabulka 2. Pro každý měřený pokus byl pomocí proudové sondy a osciloskopu zaznamenán průběh proudu obloukem, z kterého byl následně určen čas vypínání.

Na Obr. 7.16 je zaznamenán první úspěšný pokus při zkušebním proudu oblouku I_{ef} = 2,5 A. Tento proud obloukem by měla ochrana vypnout v čase menším nebo rovno času t = 1 s. Proud oblouku ve skutečnosti byl o něco nižší (cca 2,3 až 2,4 A) z důvodu napětí na oblouku v sérii se zátěží. Z tohoto průběhu lze určit, že k vypnutí došlo v čase t = 1,52 s. K první půlvlně oblouku s vyšším proudem došlo v čase t = 0,57 s. Celková doba vypínání je tedy t = 0,95 s. Tento vypínací čas splňuje čas daný normou [3] s jistou časovou rezervou, která je ještě nepatrně navýšena z důvodu nižšího zkušebního proudu.



Obr. 7.16: Průběh efektivní hodnoty proudu obloukem (první pokus; 2,5 A)

Všechny odečtené časy vypnutí určené stejným způsobem jsou v následující Tabulka 7. V tabulce je rovněž u každého pokusu odkaz na změřený průběh proudu a videozáznam nacházející se v příloze této práce.

Tabulka 7: Náhlé objevení sériového oblouku v obvodu (ARC-16-1N-3M + LTE B16)

Pokus	**Zkušební proud [A]** (efektivní hodnoty)	**Nejvyšší změřený proud obloukem [A]**	**Mezní doba vypínání [s]**	**Skutečná doba vypínání [s]**	**Vynesený průběh proudu - příloha:**	**Video-záznam - příloha:**
1.	**2,5**	2,38	1	0,95	Obr. B 1	001.mp4
2.		2,48		0,46	Obr. B 2	002.mp4
3.		2,25		0,94	Obr. B 3	003.mp4
1.	**5**	4,64	0,5	0,42	Obr. B 4	004.mp4
2.		4,53		0,49	Obr. B 5	005.mp4
3.		4,53		0,50	Obr. B 6	006.mp4
1.	**10**	9,39	0,25	0,22	Obr. B 7	007.mp4
2.		9,17		0,13	Obr. B 8	008.mp4
3.		9,28		0,2	Obr. B 9	009.mp4
1.	**16**	15,03	0,15	0,13	Obr. B 10	010.mp4
2.		14,58		**0,19**	Obr. B 11	011.mp4
3.		14,81		0,16	Obr. B 12	012.mp4

Ze zjištěných výsledků je patrné, že ochrana v některých případech vypnula obvod v době, kdy už byla překročená mezní doba popsaná v příslušné normě [3].

Ovšem je třeba zdůraznit fakt, že tyto časy jsou uvedeny pro konkrétní hodnotu proudu oblouku. V třetím sloupečku tabulky je uvedena skutečná maximální hodnota proudu, která obloukem tekla. Po provedení lineární interpolace nad a pod skutečným zkušebním proudem se mezní doba vypínání například pro třetí pokus při 16 A zvětší na 0,17 s, čemuž změřená doba již vyhoví. Pro druhý pokus při 16 A toto již neplatí, jelikož i po provedení lineární interpolace je změřený vypínací čas větší než mezní hodnota (0,174 s). Delší prodleva vypnutí sériového oblouku ochranou může být zaviněna také způsobem zapálení oblouku v samotném jiskřišti, které bohužel nesimuluje reálnou poruchu úplně přesně.

7.4.2 Zapojení zátěže se sériovým obloukem (ARC-16-1N-3M + LTE B16)

Tato zkouška byla provedena dle principu popsaném v kap.5.2.2. Schéma zapojení pracoviště je stejné jako na Obr. 7.7. Použitá byla spoušť obloukové ochrany ARC-16-1N-3M v kombinaci s jističem LTE B16.

Se zapnutým spínačem S_4 a spínači S_5 a S_6 ve vypnuté poloze byl odporovou zátěží nastaven zkušební proud na hodnotu I_{ef} = 2,5 A. Poté byl spínač S_4 vypnut. Zapojení zátěže do série s jiskřištěm bylo docíleno sepnutím spínače S_6. Doba vypnutí byla rovněž měřena třikrát. Po třech úspěšných pokusech bylo celé měření zopakováno pro jmenovitý proud připojeného AFDD I_{ef} = 16 A.

Pro zkušební proud 2,5 A proběhlo celkem 7 pokusů, přičemž jen tři z nich byly úspěšné a byl zapálen sériový oblouk s větší stabilitou, které AFDD vypnulo. U jmenovitého proudu 16 A byla situace poněkud příznivější, kde na tři úspěšné pokusy vycházel pouze jediný neúspěšný.

Odečet vypínacích časů proběhl obdobným způsobem jak v případě kap. 7.4.1 a nachází se v Tabulka 8.

Tabulka 8: Zapojení zátěže se ser. obloukem (ARC-16-1N-3M + LTE B16)

Pokus	**Zkušební proud [A]** (efektivní hodnoty)	**Nejvyšší změřený proud obloukem [A]**	**Mezní doba vypínání [s]**	**Skutečná doba vypínání [s]**	**Vynesený průběh proudu - příloha:**	**Videozáznam - příloha:**
1.	**2,5**	2,32	1	0,90	Obr. B 13	013.mp4
2.		2,39		0,84	Obr. B 14	014.mp4
3.		2,17		0,94	Obr. B 15	015.mp4
1.	**16**	14,59	0,15	0,14	Obr. B 16	016.mp4
2.		14,58		0,14	Obr. B 17	017.mp4
3.		15,25		**0,26**	Obr. B 18	018.mp4

Ochrana vypnula sériový oblouk téměř ve všech případech do mezní hodnoty s výjimkou pokusu č.3 při zkušebním proudu 16 A. Po provedení lineární interpolace tuto hodnotu ochrana překročila o 97,5 ms.

7.4.3 Zapnutí do sériového oblouku (ARC-16-1N-3M+ LTE B16)

Tato zkouška byla provedena dle principu popsaném v kap.5.2.3. Schéma zapojení pracoviště je stejné jako na Obr. 7.7. Použitá byla spoušť obloukové ochrany ARC-16-1N-3M v kombinaci s jističem LTE B16.

Se současně zapnutými spínači S_4 a S_6 a spínačem S_5 ve vypnuté poloze byl odporovou zátěží nastaven zkušební proud obvodem na hodnotu I_{ef} = 2,5 A. Poté byl vypnut jistič předřazený před AFDD a tím došlo k odpojení obvodu od zdroje. Následně byl vypnut i spínač S_4. Zapnutí do sériového oblouku bylo docíleno opětovným zapnutím předřazeného jističe. Doba vypnutí byla rovněž měřena třikrát obdobným postupem jak v předchozích zkouškách. Výsledky měření jsou zaznamenány v Tabulka 9.

Tabulka 9: Zapnutí do sériového oblouku (ARC-16-1N-3M + LTE B16)

Pokus	**Zkušební proud [A]** (efektivní hodnoty)	**Nejvyšší změřený proud obloukem [A]**	**Mezní doba vypínání [s]**	**Skutečná doba vypínání [s]**	**Vynesený průběh proudu - příloha:**	**Videozáznam - příloha:**
1.	**2,5**	2,12	1	0,91	Obr. B 19	019.mp4
2.		2,54		0,71	Obr. B 20	020.mp4
3.		2,41		0,83	Obr. B 21	021.mp4

Mezní doba vypínání v tomto případě překročena nebyla.

7.4.4 Náhlé objevení sériového oblouku v obvodu (ARC-16-1N-3M + OLI-16B-1N-030A)

Tato zkouška byla provedena dle principu popsaném v kap. 5.2.1. Schéma zapojení pracoviště je stejné jako na Obr. 7.7. Použitá byla spoušť obloukové ochrany ARC-16-1N-3M v kombinaci s proudovým chráničem OLI-16B-1N-030A. Vypínací charakteristika dodaná výrobcem je na Obr. C 2. Výsledky zkoušky jsou zpracované v Tabulka 10.

Tabulka 10: Náhlé objevené sér. oblouku v obvodu (ARC-16-1N-3M + OLI-16B-1N-030A)

Pokus	Zkušební proud [A] (efektivní hodnoty)	Nejvyšší změřený proud obloukem [A]	Mezní doba vypínání [s]	Skutečná doba vypínání [s]	Vynesený průběh proudu – příloha:
1.	**2,5**	2,28	1	0,38	Obr. B 22
2.		2,45		0,76	Obr. B 23
3.		2,17		0,77	Obr. B 24
1.	**5**	5,03	0,5	**0,57**	Obr. B 25
2.		4,69		0,44	Obr. B 26
3.		4,59		0,49	Obr. B 27
1.	**10**	9,39	0,25	0,19	Obr. B 28
2.		9,51		0,17	Obr. B 29
3.		9,5		0,21	Obr. B 30
1.	**16**	15,69	0,15	0,14	Obr. B 31
2.		14,81		0,15	Obr. B 32
3.		15,03		**0,61**	Obr. B 33

Mezní doba vypínání v prvním pokusu při proudu obloukem 5,03 A (Obr. B 25) byla překročena o 71,5 ms (po interpolaci v tomto případě měla mezní doba hodnotu 498,5 ms). Překročena byla i v třetím pokusu při proudu obloukem 15,03 A (Obr. B 33) a to o 16,17 ms.

7.4.5 Náhlé objevení sériového oblouku v obvodu (ARC-40-1N-3M + LTE B40)

Tato zkouška byla provedena dle principu popsaném v kap. 5.2.1. Schéma zapojení pracoviště je stejné jako na Obr. 7.7. Použitá byla spoušť obloukové ochrany ARC-40-1N-3M v kombinaci s jističem LTE B40. Vypínací charakteristika této kombinace je v příloze na Obr. C 3. Změřené hodnoty jsou v Tabulka 11.

Zkušební proudy pro testování této silnější verze ochrany byly zvoleny od hodnoty 10 A až po jmenovitý proud spouště ARC (40 A). Zkušební proudy 2,5 A a 5 A měřeny nebyly z důvodu předpokladu obdobných výsledků zjištěných u verze s nižším jmenovitým proudem.

Tabulka 11: Náhlé objevení sér. oblouku v obvodu (ARC-40-1N-3M + LTE B40)

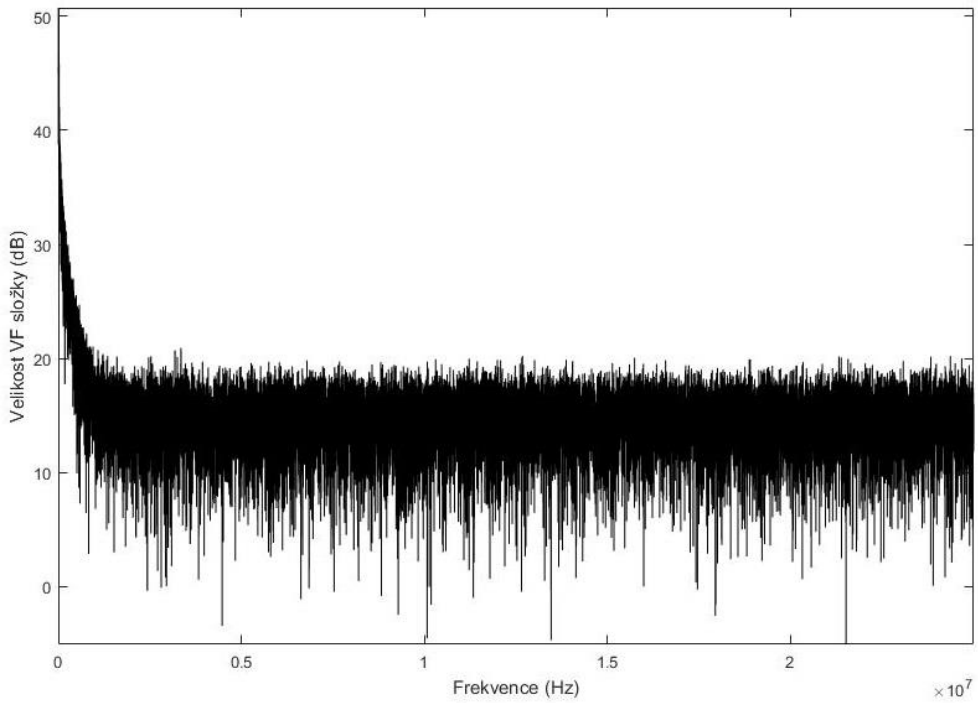
Pokus	Zkušební proud [A] (efektivní hodnoty)	Nejvyšší změřený proud obloukem [A]	Mezní doba vypínání [s]	Skutečná doba vypínání [s]	Vynesený průběh proudu - příloha:
1.	10	9,61	0,25	0,210	Obr. B 34
2.		9,39		0,200	Obr. B 35
3.		9,28		0,210	Obr. B 36
1.	16	15,03	0,15	0,093	Obr. B 37
2.		15,25		0,094	Obr. B 38
3.		14,81		0,138	Obr. B 39
1.	32	28,73	0,12	0,091	Obr. B 40
2.		29,83		0,069	Obr. B 41
3.		29,39		0,087	Obr. B 42
1.	40	38,67	0,12	0,117	Obr. B 43
2.		37,57		0,025	Obr. B 44
3.		38,67		0,065	Obr. B 45

Mezní doba vypínání v tomto případě překročena nebyla. Na Obr. B 34 lze vidět situaci, kdy následkem hoření oblouku došlo v čase t = 3,34 s ke svaření části lanek vodiče a následný průběh, již neměl typický průběh pro sériový oblouk. Ochrana obvod i přes tuto skutečnost po 78 ms od okamžiku svaření vypnula.

7.5 Analýza naměřených dat ve frekvenční oblasti

Vzhledem k vyhodnocovacímu frekvenčnímu pásmu, na kterém AFDD pracuje (22 až 24 MHz), nebylo pomocí dostupného osciloskopu Agilent DSO6054A toto frekvenční spektrum změřit. Zmíněný osciloskop pracuje s osmi-bitovým rozlišením A/D převodníku (256 kvantovacích úrovní), proto zůstávají při spektrální analýze některé složky pod šumovým prahem.

Pro snímání této VF složky proudu by bylo vhodné použít spektrální analyzátor s vhodnou sondou, který by umožňoval měřit s frekvenčním rozsahem od 15 MHz do 25 MHz s hodnotou útlumu -20 dBm.



Obr. 7.17: VF složka proudu oblouku při 9,39 A (ARC-16-1N-3M + OLI-16B-1N-030A)

Na Obr. 7.17 je zobrazena VF složka proudu oblouku 9,39 A (efektivní hodnota). Spektrum bylo vypočteno programem MATLAB pomocí FFT analýzy ze tří period proudu (uloženo 40 000 hodnot). Bohužel kvůli již zmíněnému 8bitovému rozlišení osciloskopu je toto spektrum velmi zkreslené.

8 ZÁVĚR

Tato diplomová práce byla zadána externě firmou OEZ s.r.o. Cílem práce bylo blíže představit možnosti detekce elektrického oblouku pomocí obloukových ochran AFDD, konkrétně typu ochrany od výše zmíněné firmy.

V úvodu této práce je teoretická část zabývající se elektrickým obloukem, na kterou navazuje kapitola zabývající se obecným principem funkce obloukové ochrany AFDD. Ve čtvrté kapitole je představen konkrétní typ ochrany AFDD spolu s uvedením jeho konstrukčních částí, konkrétní katalogové parametry této ochrany jsou k dispozici v příloze této práce.

Podle normy ČSN EN 62606 je v páté kapitole uveden přehled zkoušek ověřující pracovní charakteristiky AFDD. Tyto zkoušky simulují reálné poruchové stavy, které se mohou vyskytnout v běžné domovní elektroinstalaci. Jsou zde rozebrané také jednotlivé zkušební přípravky pro vytvoření jak sériového, tak paralelního poruchového oblouku.

Konkrétní použité přípravky použité v praktické části jsou popsány v šesté kapitole. Karbonizace testovacích vzorků kabelu proběhla v laboratoři velmi vysokých napětí, kvůli nutnosti připojení na obvod s napětím naprázdno 7 kV a zkratovým proudem 30 mA. Hotové vzorky bohužel při realizovaných pokusech nefungovaly, a proto byly následující zkoušky realizovány s vyrobeným jiskřištěm.

V sedmé kapitole jsou popsány realizované zkoušky, které proběhly v laboratoři spínacích přístrojů areálu CVVOZE a v laboratoři elektrických přístrojů T12/SC2.56. Pro veškeré měření byl použit osciloskop Agilent Technologies DS6054A, ke kterému byl přes UTP kabel připojen notebook se softwarem BenchVue od firmy Keysight pro ukládání dat.

Během úvodních pokusných měření došlo u dvou ARC spouští (16 i 40 A) k poruchovému stavu, který byl signalizován na LED ukazateli. Přístroje se nepodařilo uvést do provozu a byly odeslány na reklamaci. Porucha se nacházela pravděpodobně v části ukotvení vodičů pro spojení se spínacím prvkem.

Nejdříve byla ověřena schopnost AFDD vypínat sériové oblouky vytvořené generátorem oblouku. Na základě zkušebních měření bylo zjištěno, že generovaný oblouk pomocí dvou uhlíkových elektrod měl vysokou stabilitu a AFDD jej nevyhodnotilo jako poruchový stav a obvod nevyplo. Výměna jedné elektrody za měděný vodič tento problém odstranila a AFDD během všech pokusů detekovalo oblouk pod mezní hodnotou celkové doby vypínání stanovené normou.

S vyrobeným jiskřištěm byla provedena zkouška, která simuluje poruchu v elektroinstalaci, kdy se v obvodu náhle objeví sériový poruchový oblouk, dále zapojení zátěže se sériovým obloukem a zapnutí do sériového oblouku. Tyto tři zkoušky byly provedeny s 16 ampérovou verzí ARC spouště v kombinaci s jističem

LTE B16. Změřené průběhy proudu obloukem s následným vypnutím AFDD jsou vyneseny v příloze této práce, spolu s videozáznamem na DVD. Náhlé objevení oblouku v obvodu bylo pak dále zkoušeno i pro kombinaci s proudovým chráničem OLI-16B-1N-030A a také pro 40 ampérovou verzi ARC spouště v kombinaci s jističem LTE B40.

Kombinace ARC-16 a LTE B16 překročila mezní dobu vypínání pouze v jednom případě (Tabulka 9), kdy proud obloukem o velikosti 14,58 A vypnula v čase 190 ms. Mezní doba pro tento proud byla po provedení lineární interpolace 174 ms.

Kombinace ARC-16 a OLI-16B vyhověla zkoušce ve všech pokusech, kromě dvou případů (Tabulka 10), kdy při proudu obloukem 5,03 A byla překročena vypínací doba o 71,5 ms a při proudu 15,03 A byla doba překročena o 16,17 ms.

Kombinace ARC-40 a LTE B40 v žádném realizovaném pokusu mezní dobu vypínání nepřekročila.

Delší vypínací čas může být zaviněn způsobem hoření oblouku v jiskřišti, kde docházelo k poměrně rychlému odpařování grafitového prášku. Ostatní sériové oblouky ochrana detekovala v čase kratším než mezní hodnota.

Pokusy s paralelním obloukem realizovány nebyly, z důvodu ověření pouze hlavního přínosu obloukové ochrany, kterým je schopnost vypnout sériové poruchové oblouky. Dále by mohl vznikat problém s velikostí proudů nacházející se v oblasti vypínací charakteristiky jističů, u kterých by mohlo docházet často k vybavení zkratové nebo nadproudové spouště.

Pomocí dostupného osciloskopu pro tuto práci bohužel nebylo možné měřit VF složku proudu obloukem. Jelikož osciloskop pracuje s 8bitovým rozlišením A/D převodníku, tak některé VF složky při spektrální analýze zůstávají pod šumovým prahem. Pro snímání této VF složky by bylo vhodné použít spektrální analyzátor.

Literatura

[1] BUŠOV, Bohuslav. *Stejnosměrný a střídavý oblouk a jejich zhášení*, Elektronický učební materiály, Brno VUT.

[2] OEZ s.r.o. *Aplikační příručka: Obloukové ochrany AFDD* [online]. Brno: FEKT VUT, 2017 [cit. 2017-11-05]. Dostupné z: https://www.afdd.cz/files/MI02-2017-CZ.pdf

[3] *ČSN EN 62606: Obecné požadavky na obloukové ochrany*. Praha: ÚNMZ, 2014.

[4] *ČSN 33 2000-4-42 ed. 2: Elektrické instalace nízkého napětí – Část 4-42: Bezpečnost – Ochrana před účinky tepla*. Praha: ÚNMZ, 2014.

[5] OEZ s.r.o. *ARC Spoušť obloukové ochrany* [online]. Brno: FEKT VUT, 2017 [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ow/1277-web_cz_sk.jpg

[6] OEZ s.r.o. *Sestavení obloukové ochrany AFDD* [online]. Brno: FEKT VUT, 2017 [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: http://www.oez.cz/uploads/gallery/original/1208.jpg

[7] BAXANT, Petr; DRÁPELA, Jiří: Užití elektrické energie, Elektronický učební text, Brno 2007.

[8] HAVELKA, Oto. Elektrické přístroje I. Praha: SNTL, 1985.

[9] ELEKTRIKA.CZ. *Článek harmonické – část přednášky Doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.* [online]. Brno: FEKT VUT, 2018 [cit. 2018-4-20]. Dostupné z: https://elektrika.cz/data/clanky/harmonicke

[10] EATON. *Oblouková ochrana AFDD* [online]. Brno: FEKT VUT, 2018 [cit. 2018-4-25]. Dostupné z: http://eatonelektrotechnika.cz/cz/obloukova-ochrana-afdd.html

[11] EATON. *Oblouková ochrana AFDD* [online]. Brno: FEKT VUT, 2018 [cit. 2018-4-25]. Dostupné z: https://www.b2corporate.com/wp-content/uploads/Arc-Fault-Detection-Device-AFDD-min.jpg

[12] Elektroprumysl.cz. *Článek: Elektrické přístroje chránící před vznikem požáru od elektroinstalace* [online]. Brno: FEKT VUT, 2018 [cit. 2018-5-10]. Dostupné z: http://www.elektroprumysl.cz/elektroinstalace/elektricke-pristroje-chranici-pred-vznikem-pozaru-od-elektroinstalace

[13] SICHR. *Výpočtový program Sichr, OEZ. Dostupné vypínací charakteristiky.* Brno: FEKT VUT, 2018 [cit. 2018-5-16].

Seznam symbolů, veličin a zkratek

FEKT	-	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	-	Vysoké učení technické v Brně
AFCI	-	Arc Fault Circuit Interrupter
AFDD	-	Arc Fault Detection Device
ČSN	-	Česká technická norma
MCB	-	Malý jistič
FI	-	Proudový chránič
U_a (U_{obl})	-	Napětí na oblouku [V]
I_a, (I_{obl})	-	Proud, který prochází obloukem [A]
α, β, γ, δ	-	Konstanty závisející na tlaku a druhu plynu, na materiálu, tvaru a rozměrech elektrod
RSSI	-	Received Signal Strength Indication – Indikátor síly přijatého signálu
LED	-	Light-Emitting Diode – elektroluminiscenční dioda
I_{cu}	-	Jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost [kA]
I_{cn}	-	Jmenovitá zkratová schopnost [kA]
I_n	-	Jmenovitý proud [A]
PVC	-	Polyvinylchlorid
CVVOZE	-	Centrum výzkumu a využití obnovitelných zdrojů energie
U_z	-	Napětí zdroje [V]
I_z	-	Proud obvodem [A]
a_{obl}	-	Délka oblouku [mm]
FFT	-	Fast Fourier Transform – Rychlá Fourierova transformace
UTP	-	Kroucená dvojlinka – druh kabelu
t	-	Čas [s]
I_{ef}	-	Efektivní hodnota proudu [A]
U_{ef}	-	Efektivní hodnota napětí [A]

Seznam příloh

Příloha A: Katalogové parametry obloukové spouště ARC [2]

Příloha B: Vynesené průběhy efektivní hodnoty proudu obloukem při zkouškách s připojeným jiskřištěm

Příloha C: Vypínací charakteristiky obloukové spouště a spínacího prvku [13]

Příloha D: Přiložené DVD obsahující videozáznamy z realizovaných zkoušek a změřená data z osciloskopu

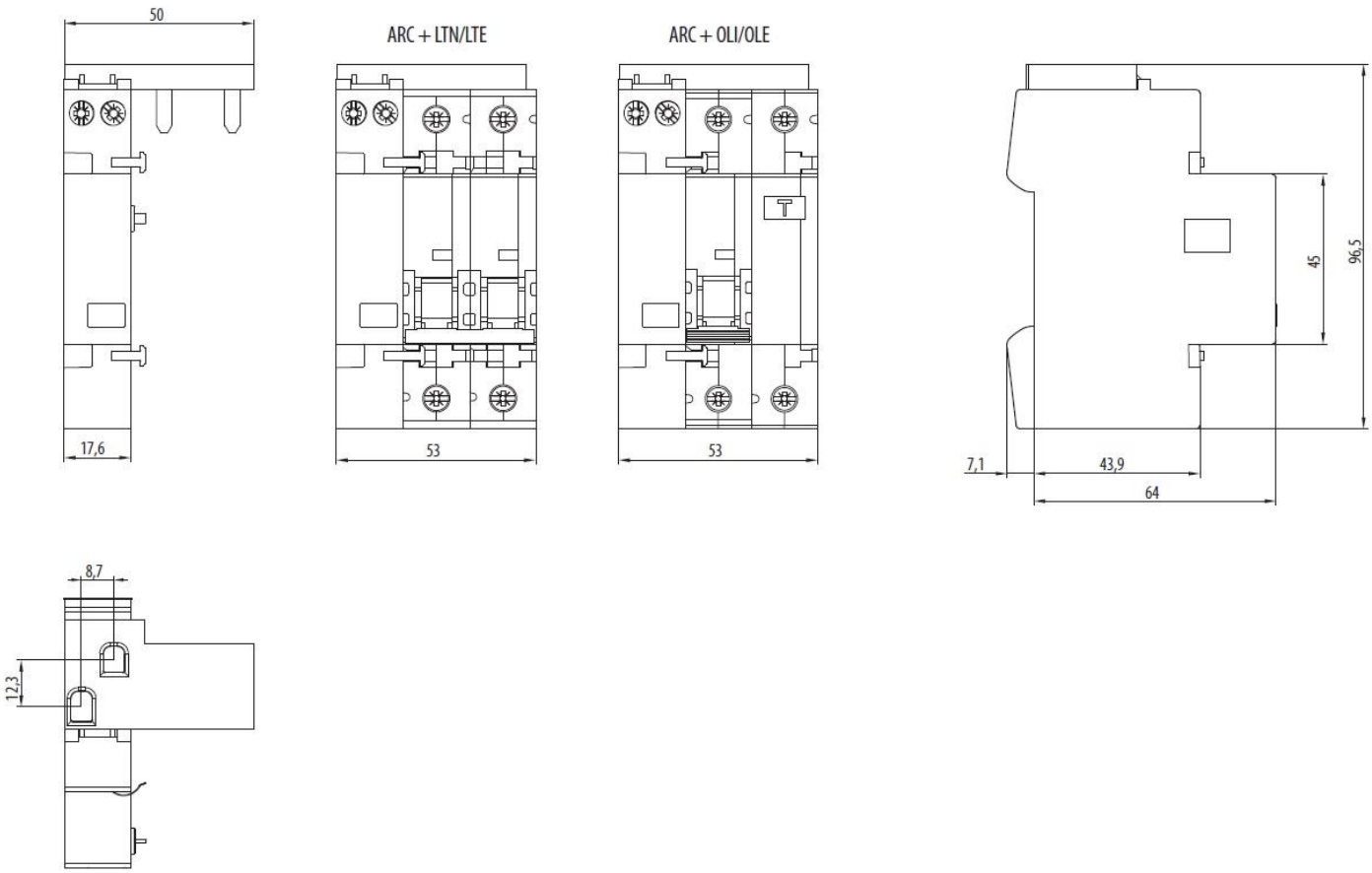
Parametry

Typ		ARC
Normy		IEC/ČSN EN 62606
Certifikační značky		CE
Počet pólů		1N
Jmenovitý proud [1]	ARC-16-1N-3M	1 ÷ 16 A
	ARC-40-1N-3M	1 ÷ 40 A
Jmenovité napětí		AC 230 V
Jmenovitý kmitočet		50 Hz
Vypnutí v případě nadpětí		> AC 275 V
Krytí		IP20 s připojenými vodiči
Mechanická trvanlivost		10 000 cyklů
Vypínací charakteristika		dle IEC/ČSN EN 62606
Ztráty		0,6 W / pól
Připojení		
Vodič Cu - tuhý (plný)		0,75 ÷ 16 mm²
Vodič Cu - ohebný s dutinkou		0,75 ÷ 10 mm²
Dotahovací moment		2 ÷ 2,5 Nm
Pracovní podmínky		
Teplota okolí		-25 ÷ +45 °C
Pracovní poloha		libovolná
Klimatická odolnost (IEC 60068-2-30)		28 cyklů (55 °C, 95 % relativní vlhkost)
Nároky na ostatní přístroje v instalaci na EMC (elektromagnetická kompatibilita)		musí vyhovovat CISPR 14-1 a ČSN EN 61000-6-3 (hodnoty třídy omezení B) [2]

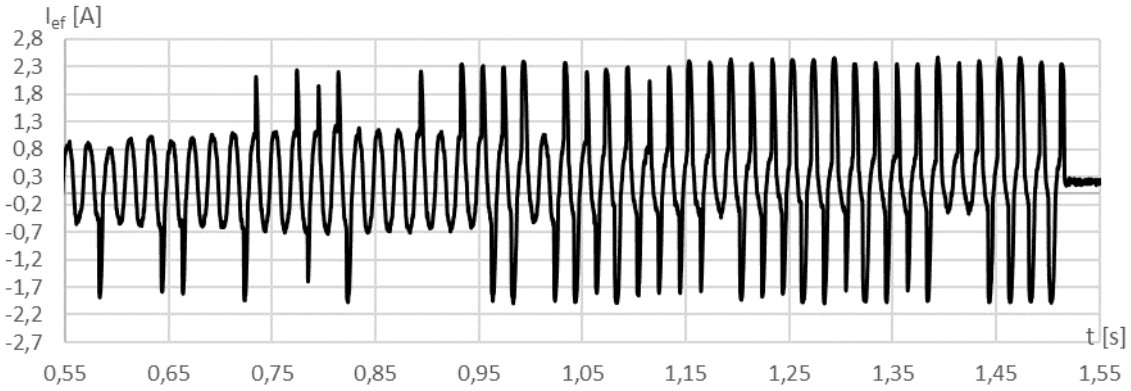
[1] Jmenovitý proud je hodnota proudu, kterou může spoušť obloukové ochrany ARC vést nepřetržitě. ARC je schopna vést nepřetržitě proudy do 16 A resp. do 40 A. Po spojení ARC s konkrétním jisticím prvkem je jmenovitý proud obloukové ochrany AFDD určen jmenovitým proudem jisticího prvku.

[2] U zařízení pracujících v elektrické instalaci musí být dodržovány požadavky na rušení definované v normě CISPR 14-1 a EN CSN 61000-6-3. Nepovolené nebo porouchané přístroje mohou způsobit rušení, které může mít vliv na citlivost spouště obloukové ochrany / obloukovou ochranu (ČSN EN 61000-6-3: Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 6-3: Kmenové normy – Emise – Prostředí obytné, obchodní a lehkého průmyslu. CISPR 14-1: Elektromagnetická kompatibilita – Požadavky na domácí zařízení, elektrická nářadí a podobné přístroje – Část 1: Emise).

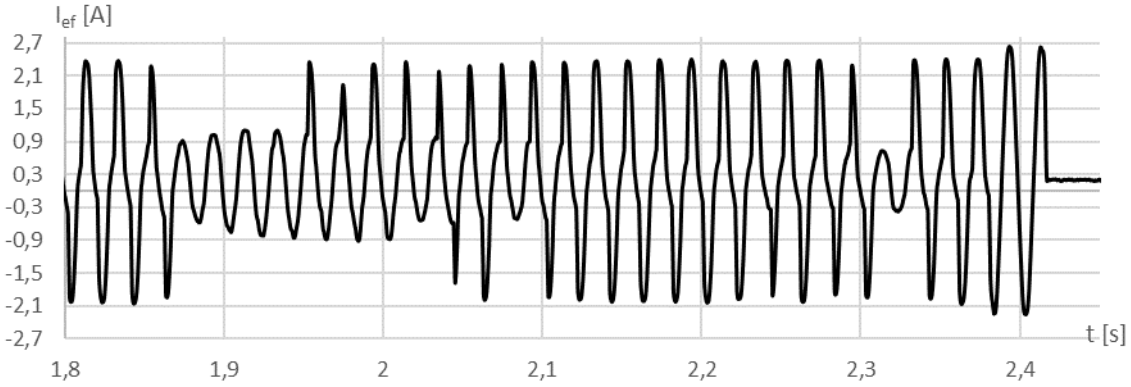
Rozměry



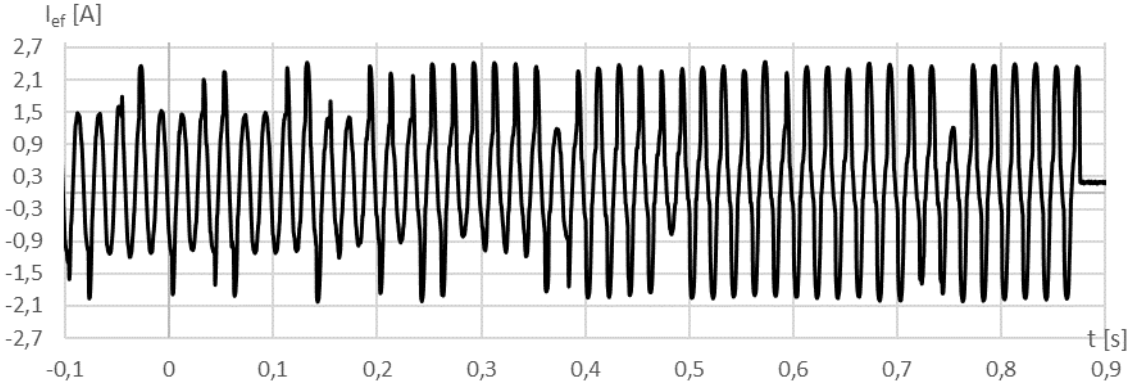
Obr. A 1:Katalogové parametry spouště ARC [2]



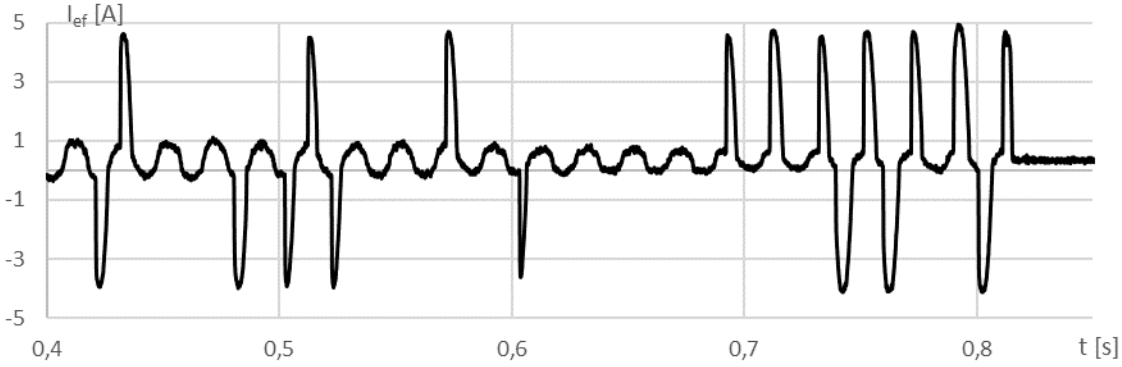
Obr. B 1: ARC 16 + LTE B16 Náhlé objevení ser. oblouku - 2,5 A - pokus 1



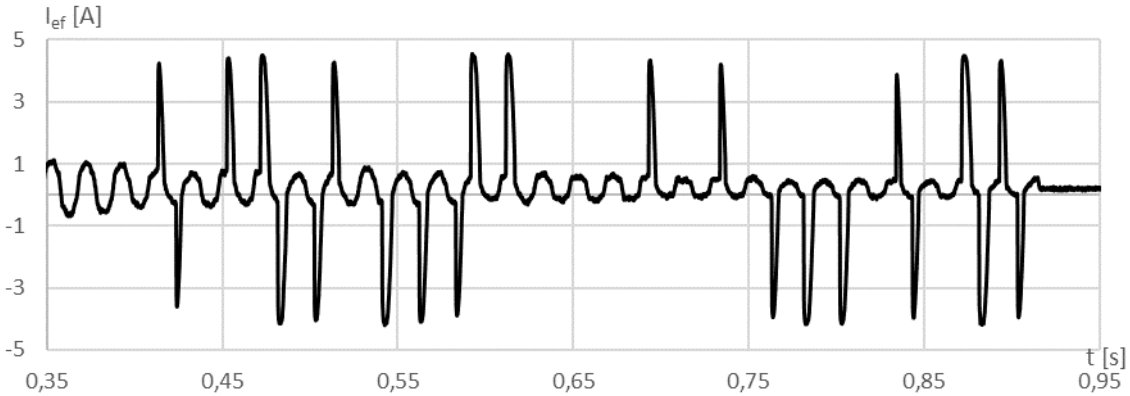
Obr. B 2: ARC 16 + LTE B16 Náhlé objevení ser. oblouku - 2,5 A - pokus 2



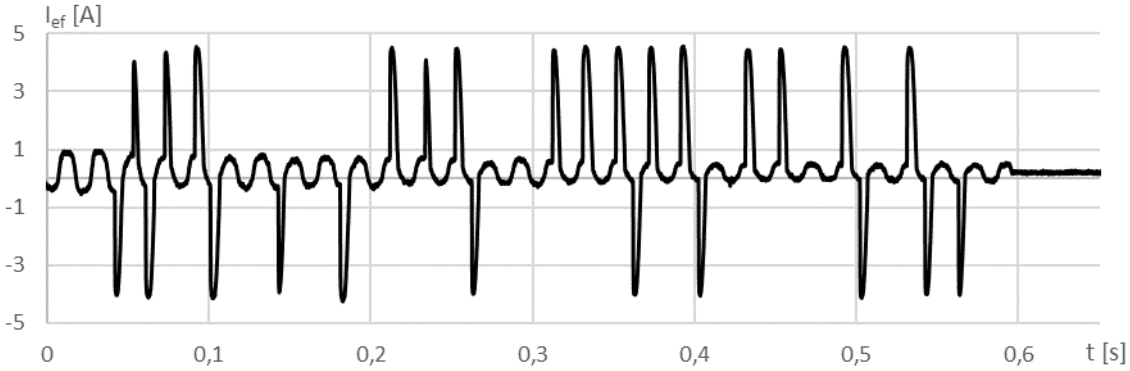
Obr. B 3: ARC 16 + LTE B16 Náhlé objevení ser. oblouku - 2,5 A - pokus 3



Obr. B 4: ARC 16 + LTE B16 Náhlé objevení ser. oblouku - 5 A - pokus 1



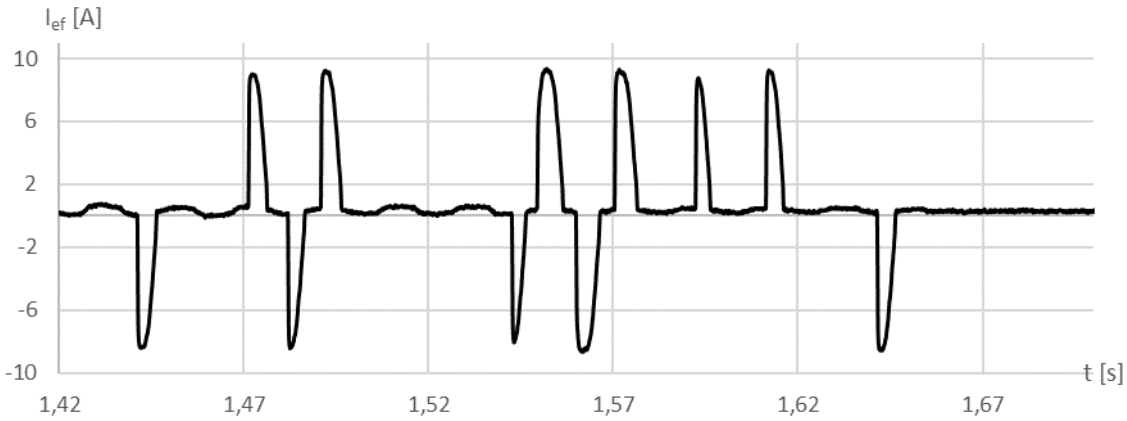
Obr. B 5: ARC 16 + LTE B16 Náhlé objevení ser. oblouku - 5 A - pokus 2



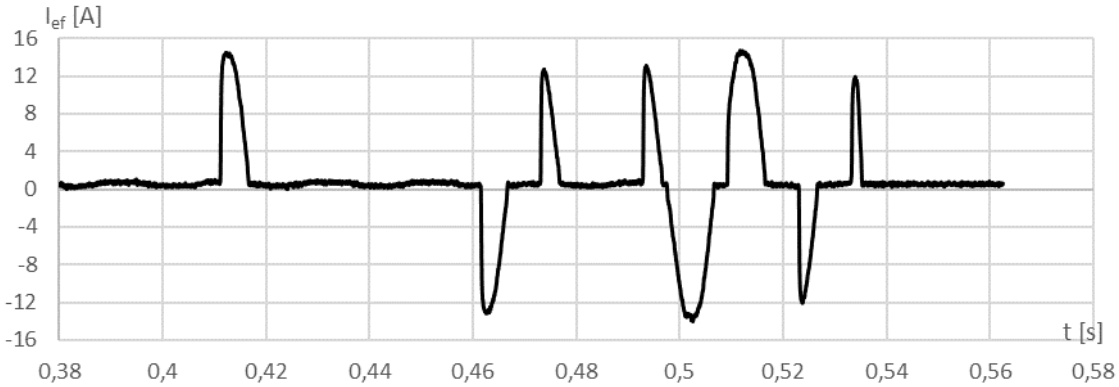
Obr. B 6: ARC 16 + LTE B16 Náhlé objevení ser. oblouku - 5 A - pokus 3

Obr. B 7: ARC 16 + LTE B16 Náhlé objevení ser. oblouku - 10 A - pokus 1

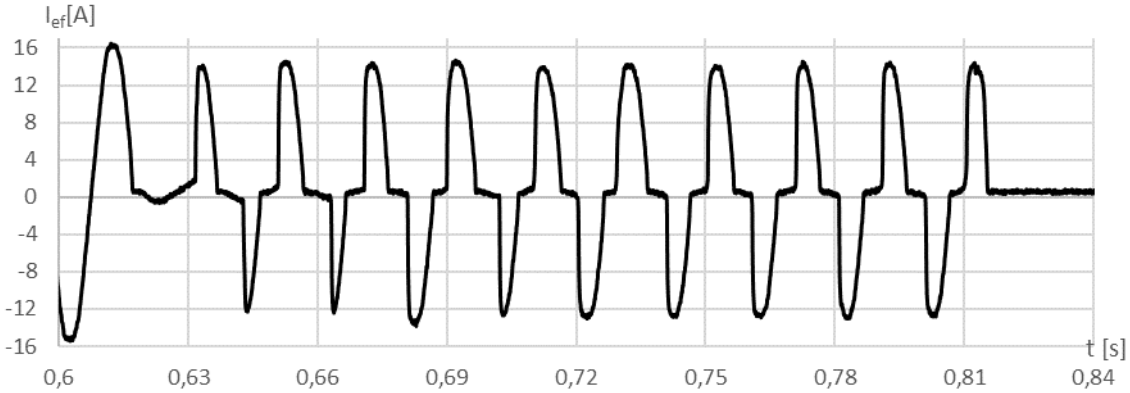
Obr. B 8: ARC 16 + LTE B16 Náhlé objevení ser. oblouku - 10 A - pokus 2



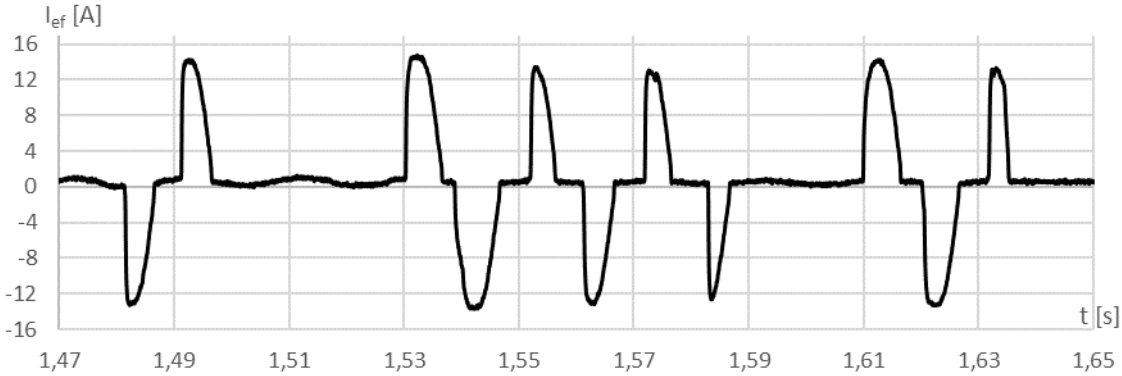
Obr. B 9: ARC 16 + LTE B16 Náhlé objevení oblouku 10 A - pokus 3



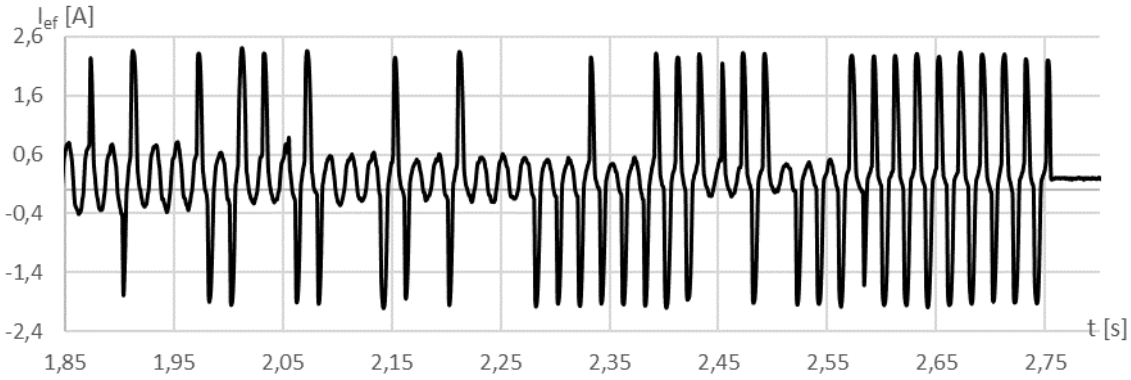
Obr. B 10: ARC 16 + LTE B16 Náhlé objevení oblouku 16 A - pokus 1



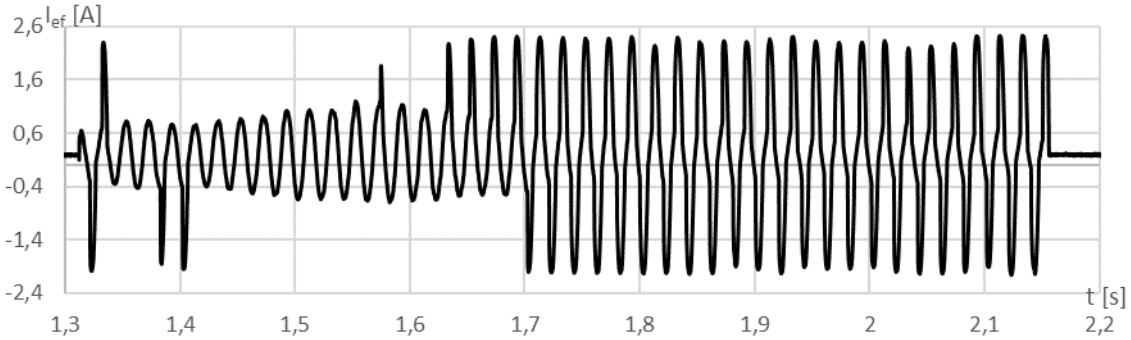
Obr. B 11: ARC 16 + LTE B16 Náhlé objevení oblouku 16 A - pokus 2



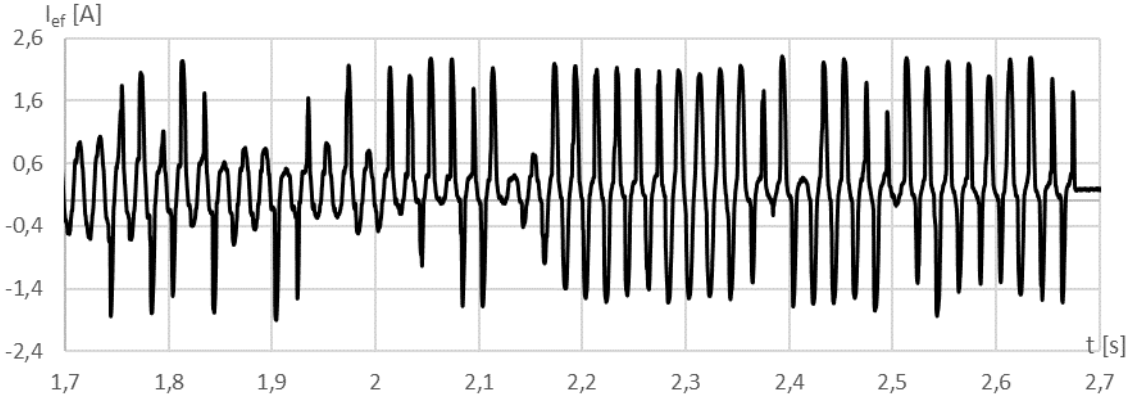
Obr. B 12: ARC 16 + LTE B16 Náhlé objevení oblouku 16 A - pokus 3



Obr. B 13: ARC 16 + LTE B16 Zapojení zátěže se ser. obloukem 2,5 A - pokus 1

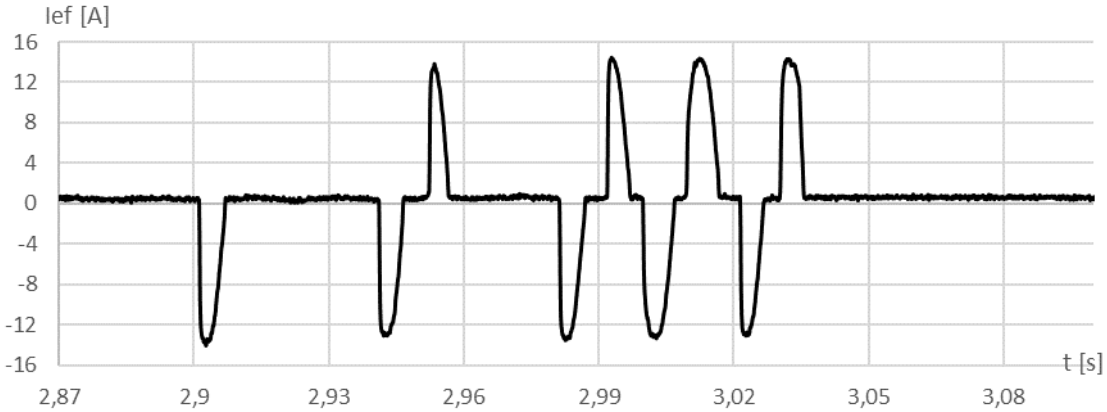


Obr. B 14: ARC 16 + LTE B16 Zapojení zátěže se ser. obloukem 2,5 A - pokus 2

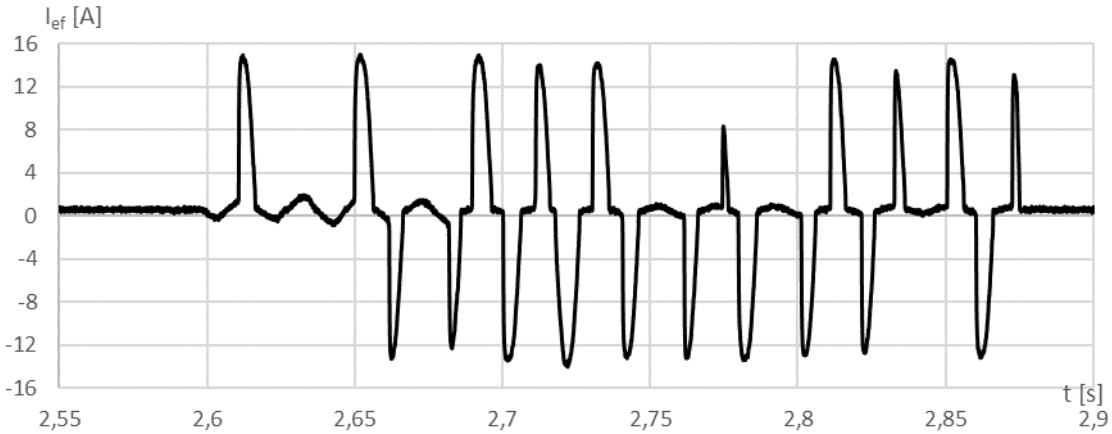


Obr. B 15: ARC 16 + LTE B16 Zapojení zátěže se ser. obloukem 2,5 A - pokus 3

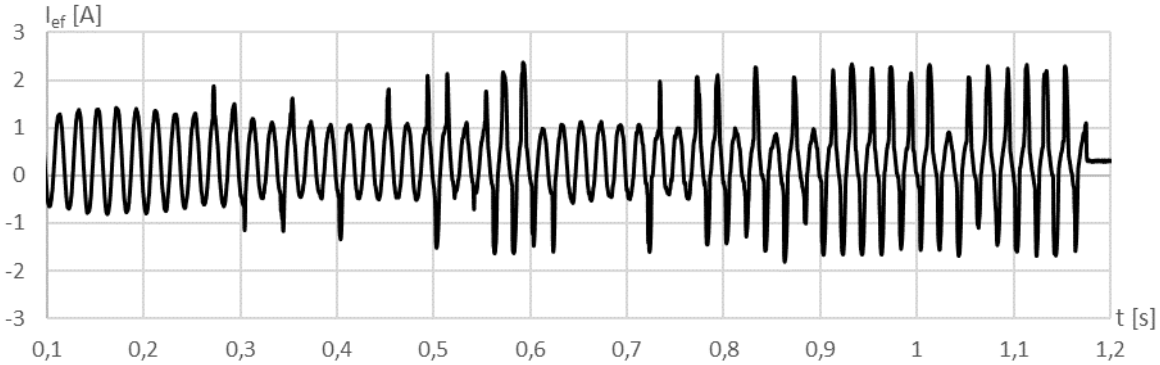
Obr. B 16: ARC 16 + LTE B16 Zapojení zátěže se ser. obloukem 16 A - pokus 1



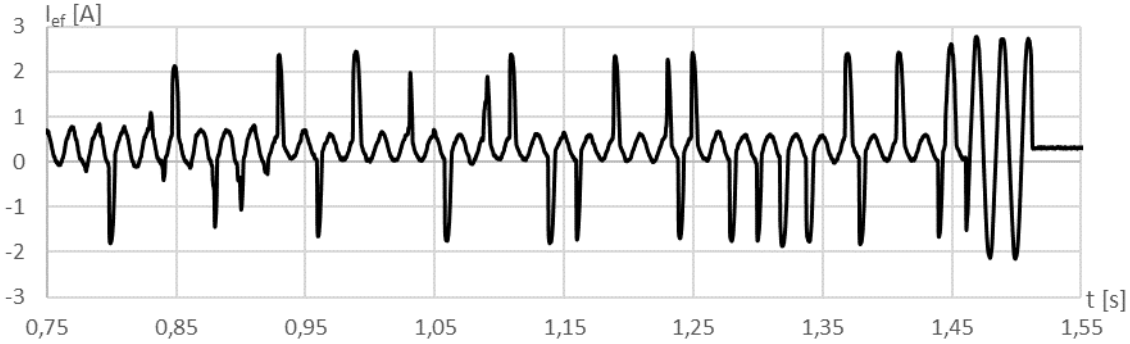
Obr. B 17: ARC 16 + LTE B16 Zapojení zátěže se ser. obloukem 16 A - pokus 2



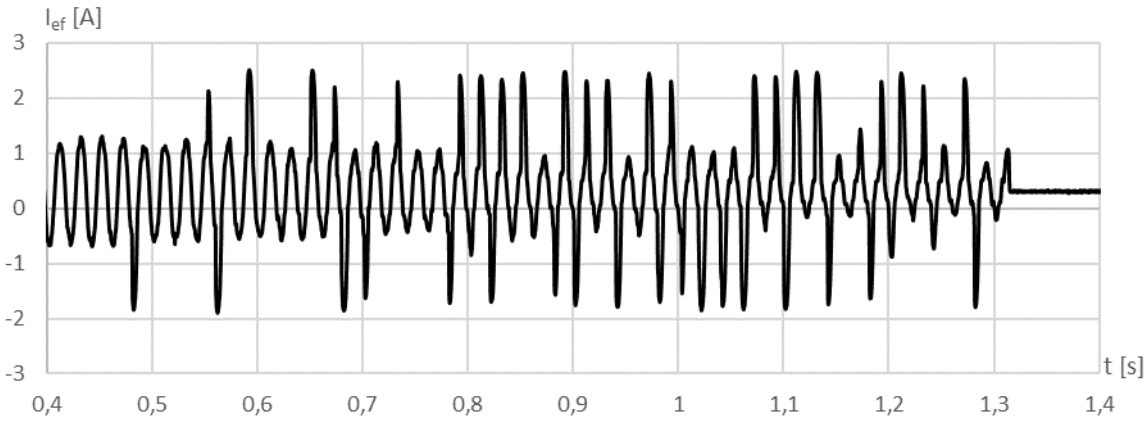
Obr. B 18: ARC 16 + LTE B16 Zapojení zátěže se ser. obloukem 16 A - pokus 3



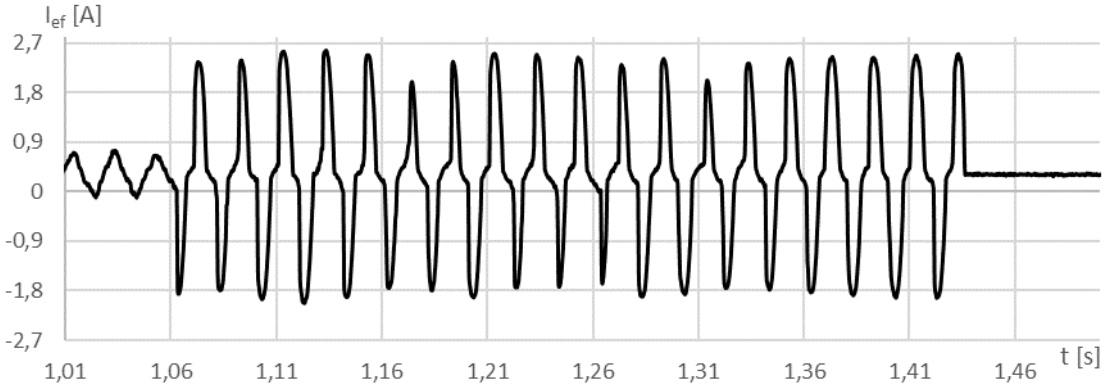
Obr. B 19: ARC 16 + LTE B16 Zapnutí do ser. oblouku 2,5 A - pokus 1



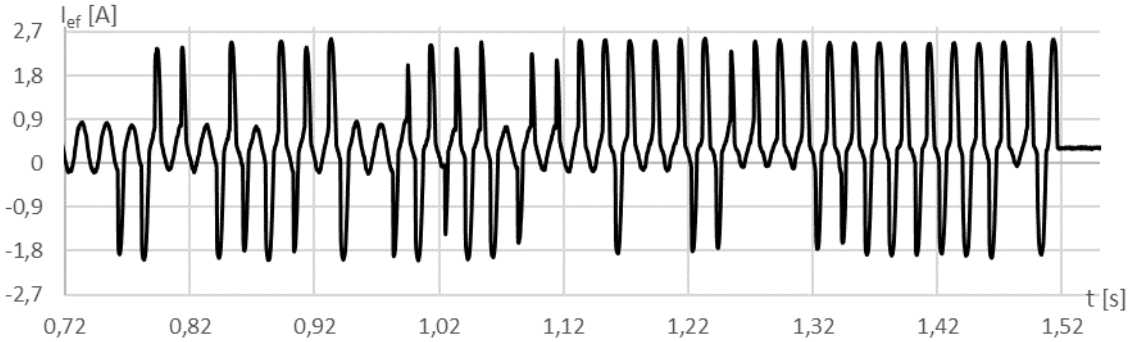
Obr. B 20: ARC 16 + LTE B16 Zapnutí do ser. oblouku 2,5 A - pokus 2



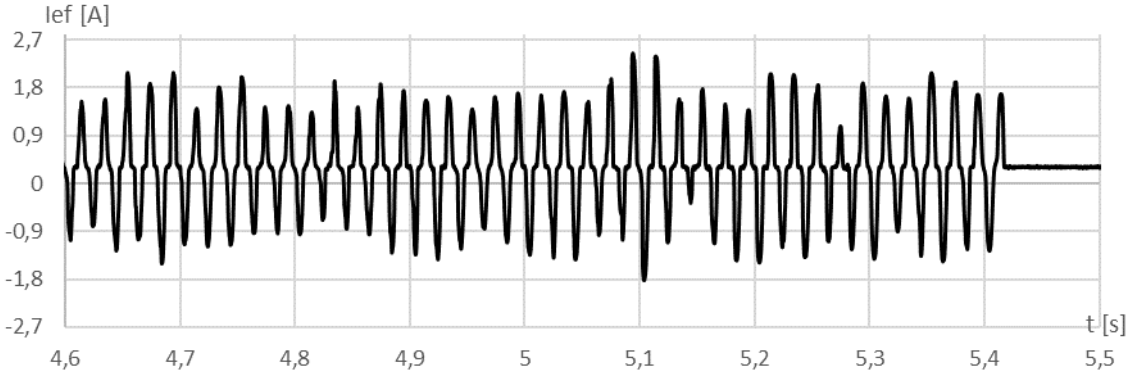
Obr. B 21: ARC 16 + LTE B16 Zapnutí do ser. oblouku 2,5 A - pokus 3



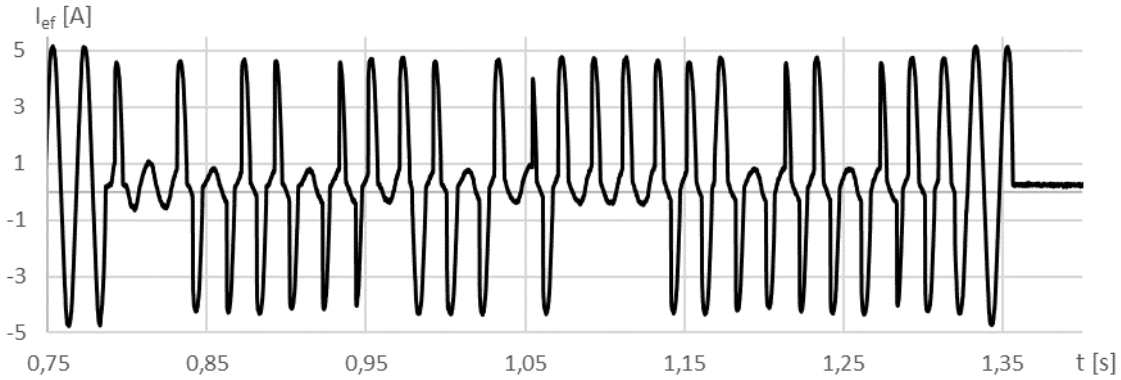
Obr. B 22: ARC 16 + OLI 16B Náhlé objevení ser. oblouku 2,5 A - pokus 1



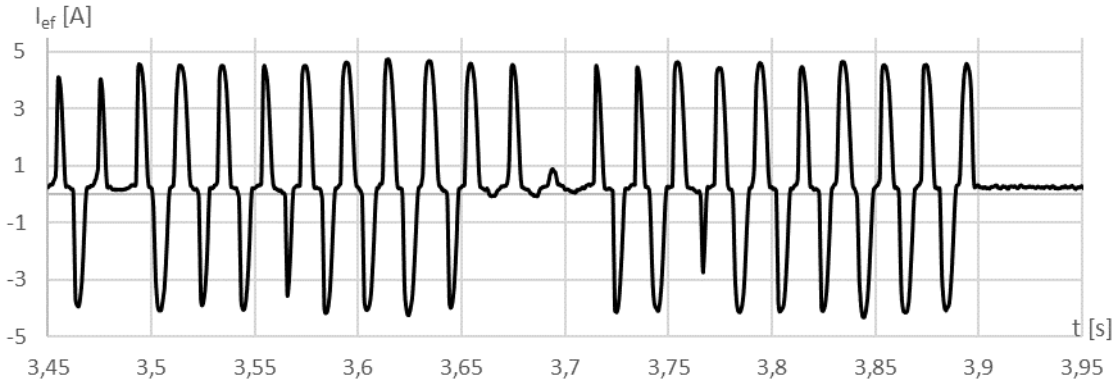
Obr. B 23: ARC 16 + OLI 16B Náhlé objevení ser. oblouku 2,5 A - pokus 2



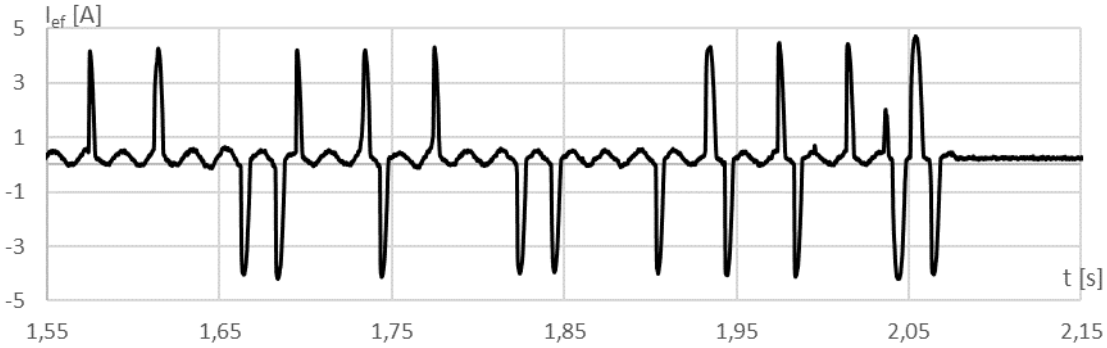
Obr. B 24: ARC 16 + OLI 16B Náhlé objevení ser. oblouku 2,5 A - pokus 3



Obr. B 25: ARC 16 + OLI 16B Náhlé objevení ser. oblouku 5 A - pokus 1

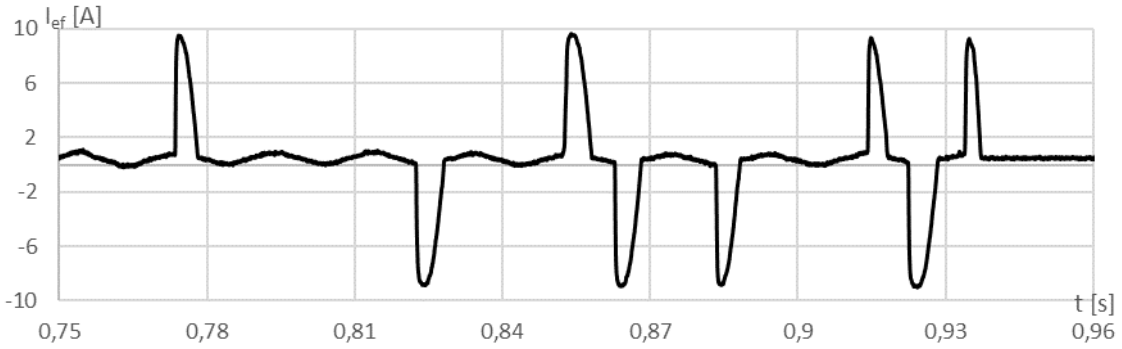


Obr. B 26: ARC 16 + OLI 16B Náhlé objevení ser. oblouku 5 A - pokus 2

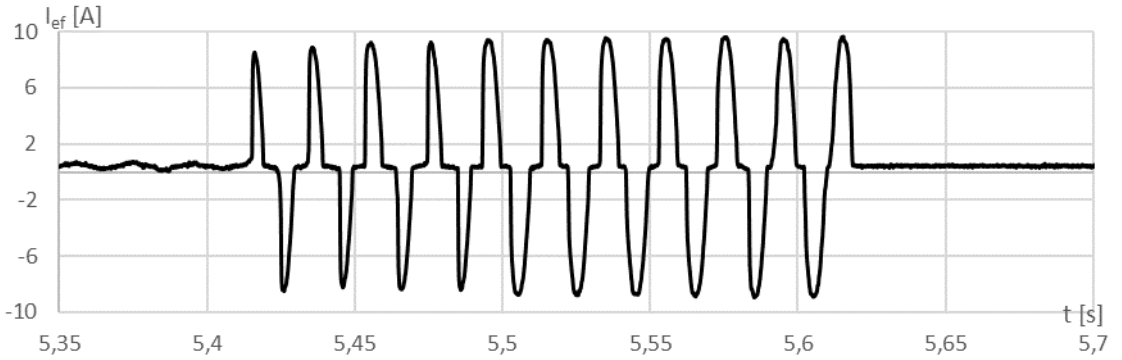


Obr. B 27: ARC 16 + OLI 16B Náhlé objevení ser. oblouku 5 A - pokus 3

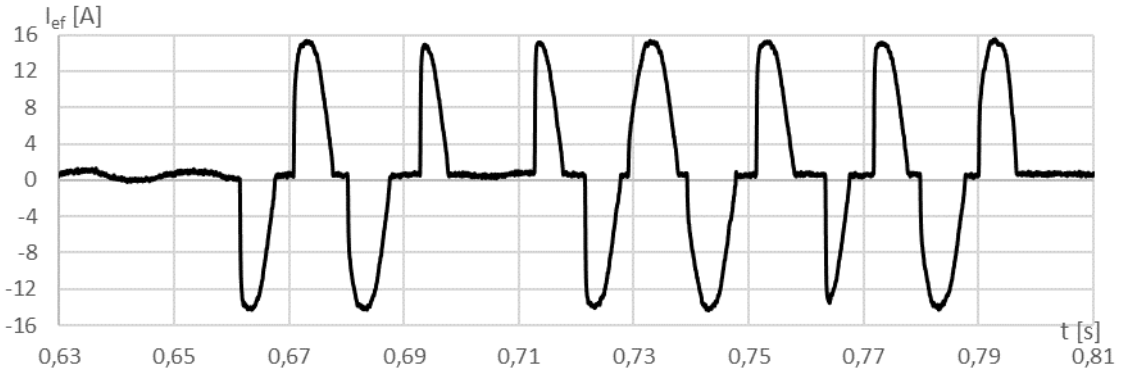
Obr. B 28: ARC 16 + OLI 16B Náhlé objevení ser. oblouku 10 A - pokus 1



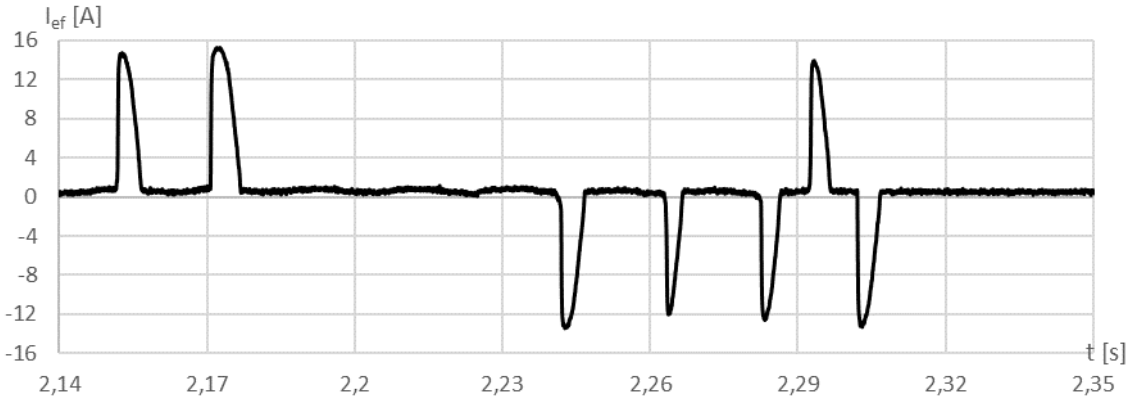
Obr. B 29: ARC 16 + OLI 16B Náhlé objevení ser. oblouku 10 A - pokus 2



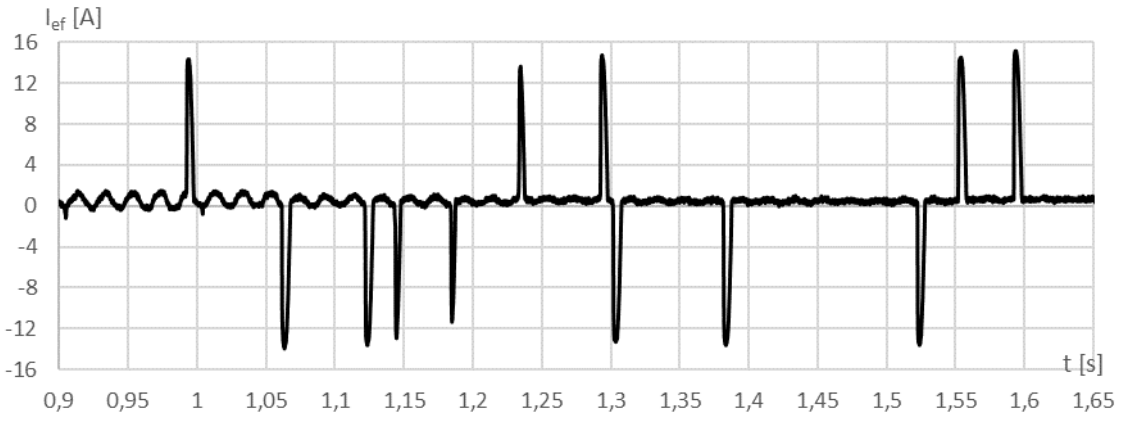
Obr. B 30: ARC 16 + OLI 16B Náhlé objevení ser. oblouku 10 A - pokus 3



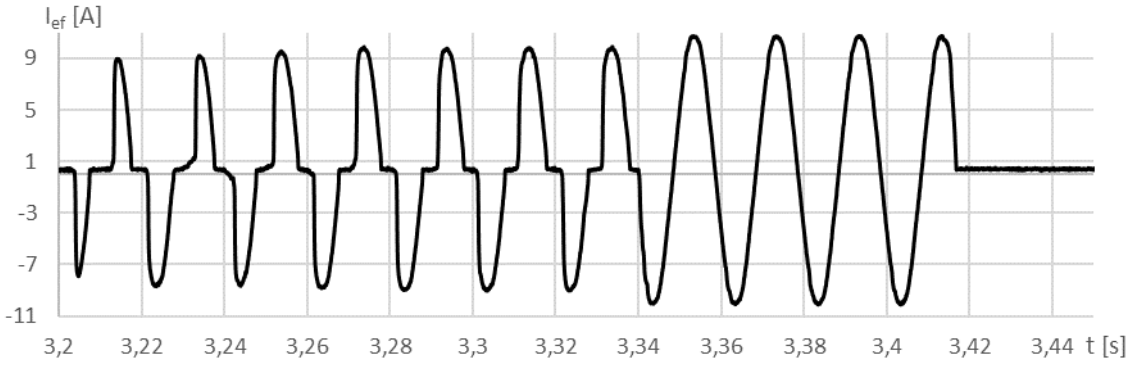
Obr. B 31: ARC 16 + OLI 16B Náhlé objevení ser. oblouku 16 A - pokus 1



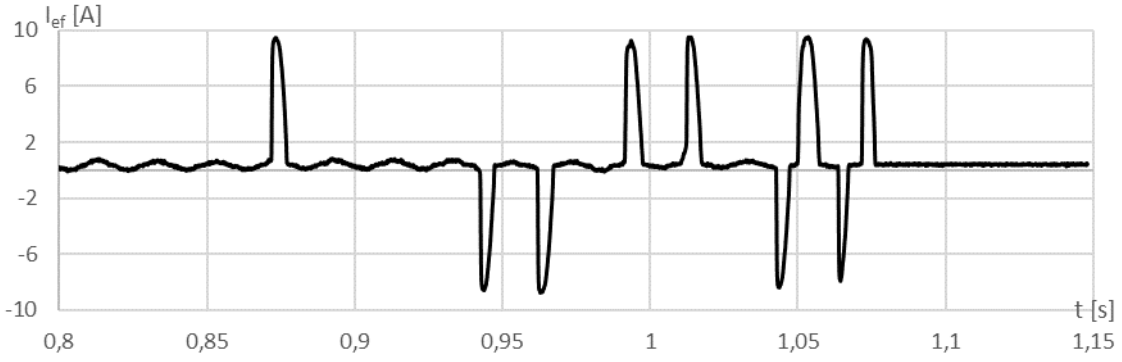
Obr. B 32: ARC 16 + OLI 16B Náhlé objevení ser. oblouku 16 A - pokus 2



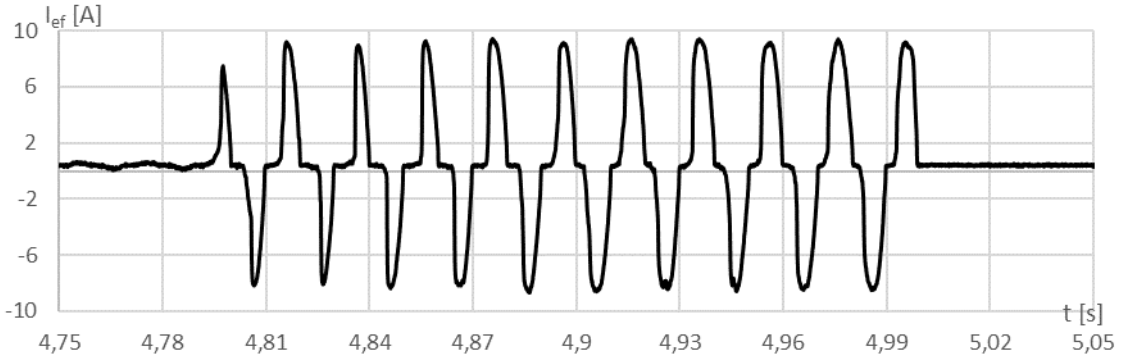
Obr. B 33: ARC 16 + OLI 16B Náhlé objevení ser. oblouku 16 A - pokus 3



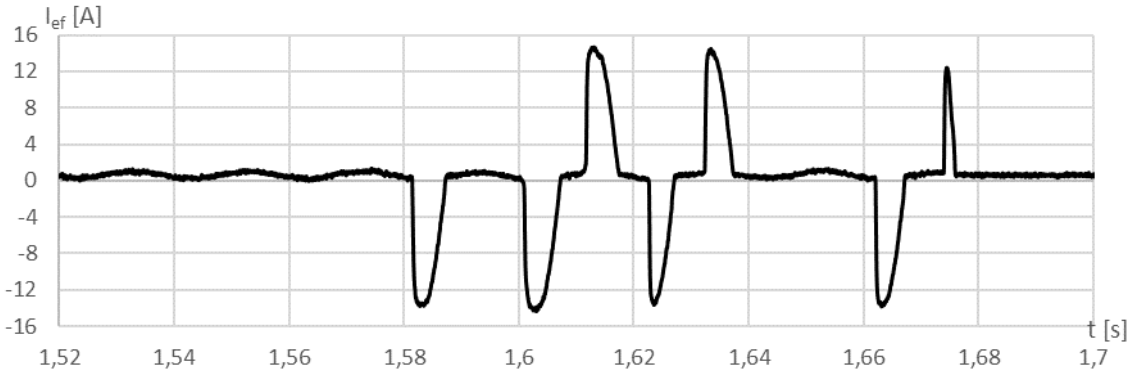
Obr. B 34 : ARC-40-1N-3M + LTE B40 Náhlé objevení ser. oblouku 10 A – pokus 1



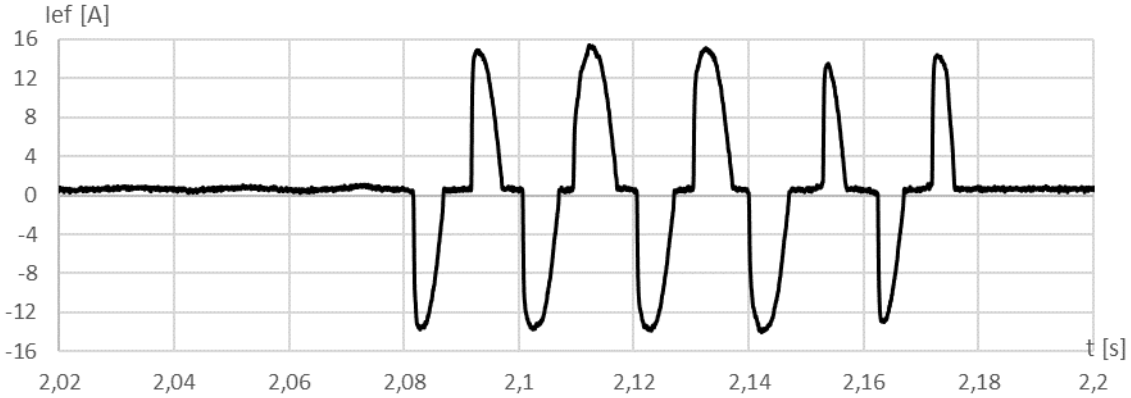
Obr. B 35: ARC-40-1N-3M + LTE B40 Náhlé objevení ser. oblouku 10 A – pokus 2



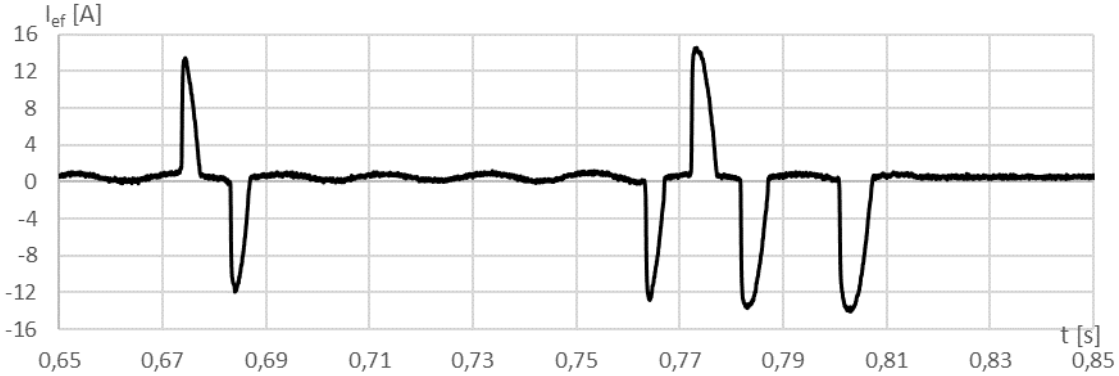
Obr. B 36: ARC-40-1N-3M + LTE B40 Náhlé objevení ser. oblouku 10 A – pokus 3



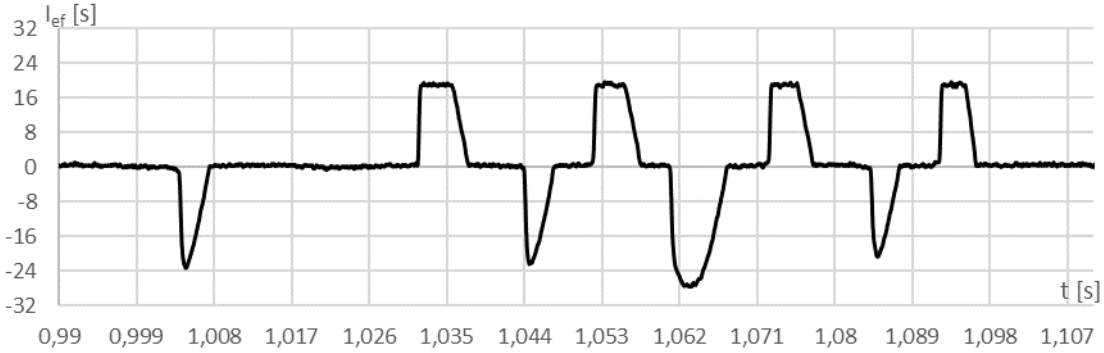
Obr. B 37: ARC-40-1N-3M + LTE B40 Náhlé objevení ser. oblouku 16 A – pokus 1



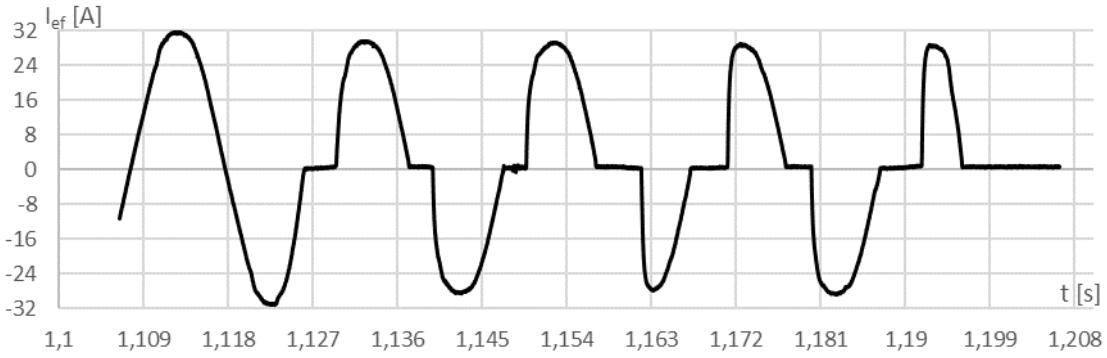
Obr. B 38: ARC-40-1N-3M + LTE B40 Náhlé objevení ser. oblouku 16 A – pokus 2



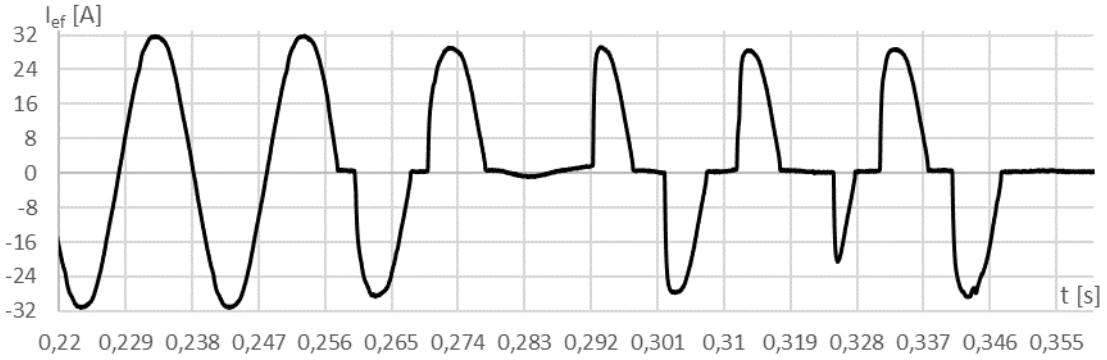
Obr. B 39: ARC-40-1N-3M + LTE B40 Náhlé objevení ser. oblouku 16 A – pokus 3



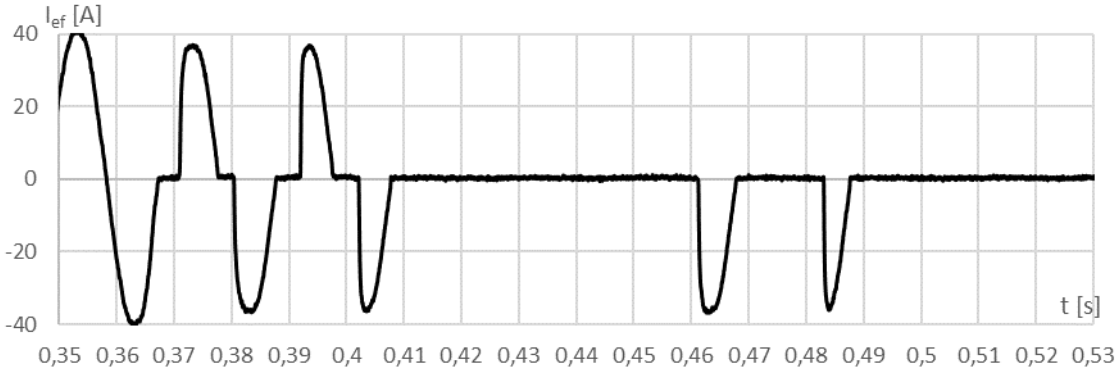
Obr. B 40: ARC-40-1N-3M + LTE B40 Náhlé objevení ser. oblouku 32 A – pokus 1



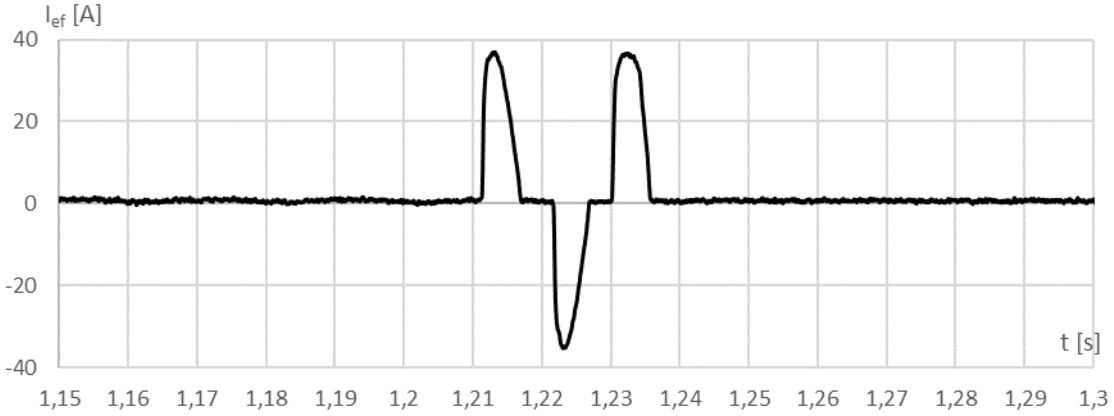
Obr. B 41: ARC-40-1N-3M + LTE B40 Náhlé objevení ser. oblouku 32 A – pokus 2



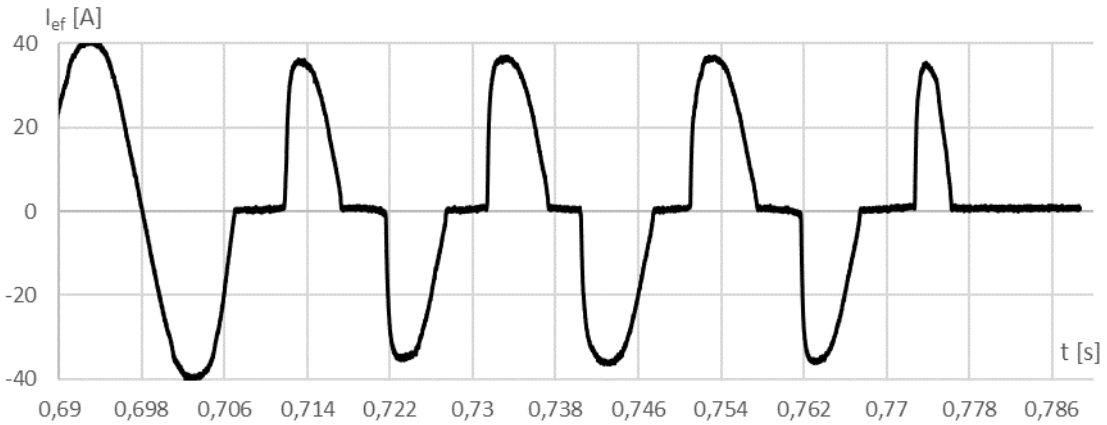
Obr. B 42: ARC-40-1N-3M + LTE B40 Náhlé objevení ser. oblouku 32 A – pokus 3



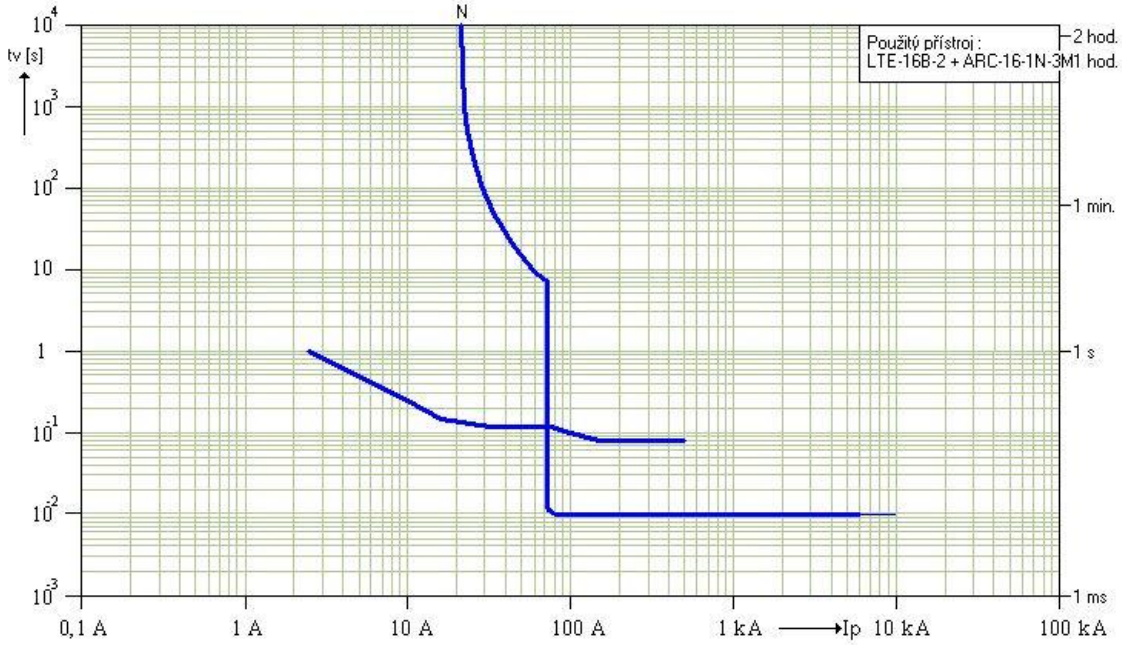
Obr. B 43: ARC-40-1N-3M + LTE B40 Náhlé objevení ser. oblouku 40 A – pokus 1



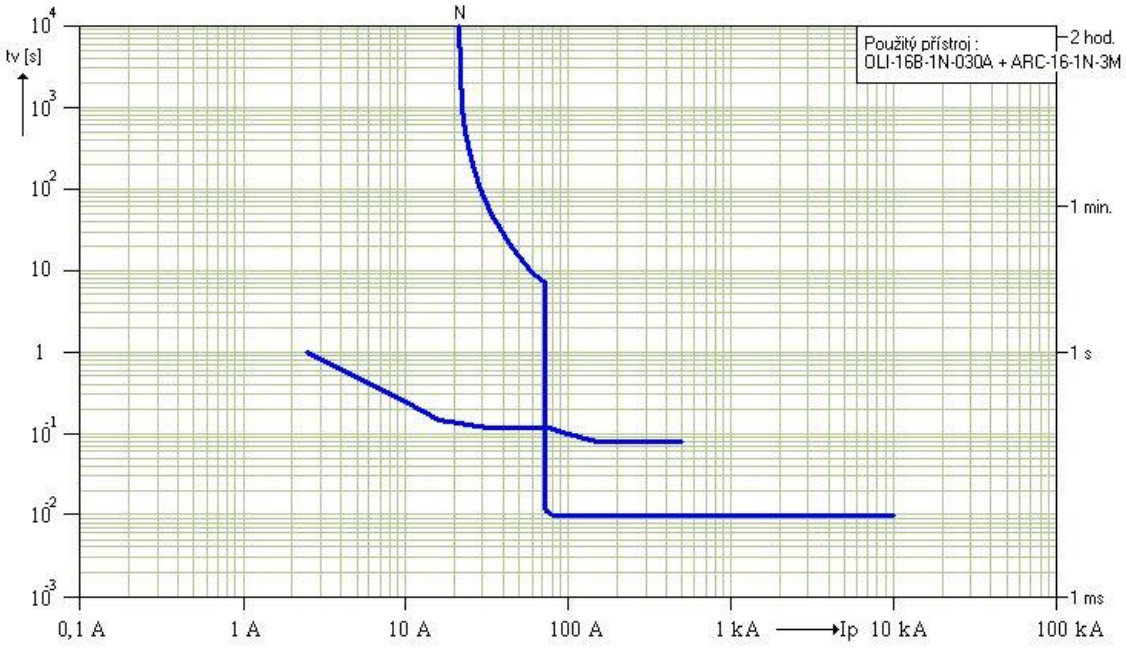
Obr. B 44: ARC-40-1N-3M + LTE B40 Náhlé objevení ser. oblouku 40 A – pokus 2



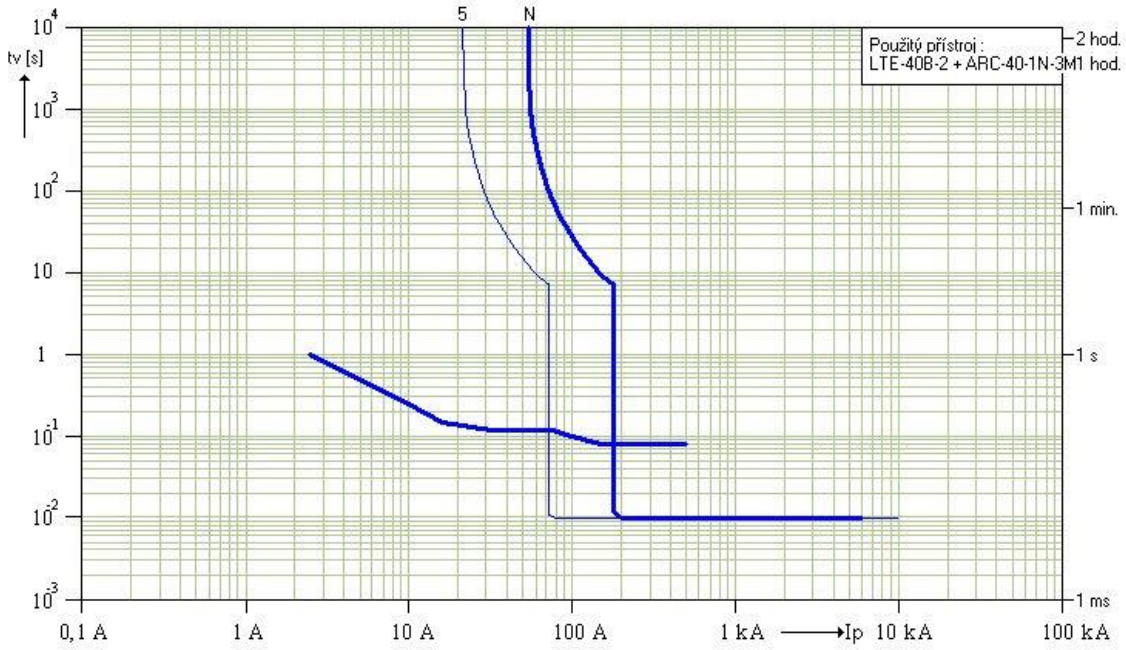
Obr. B 45: ARC-40-1N-3M + LTE B40 Náhlé objevení ser. oblouku 40 A – pokus 3



Obr. C 1: Vypínací charakteristika ARC-16-1N-3M [13]



Obr. C 2: Vypínací charakteristika ARC-16-1N-3M + OLI-16B-1N-030A [13]



Obr. C 3: Vypínací charakteristika ARC-40-1N-3M + LTE-40B-2 [13]