



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

TESTOVÁNÍ OBLOUKOVÉ OCHRANY AFDD ZA NORMÁLNÍCH A PORUCHOVÝCH PODMÍNEK

TESTING OF ARC PROTECTION AFDD DURING NORMAL AND FAULT CONDITIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

František Křepela

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub Kaser

BRNO 2022



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: František Křepela

ID: 220767

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Testování obloukové ochrany AFDD za normálních a poruchových podmínek

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Zpracujte podrobnou rešerši na obloukovou ochranu a její normativní požadavky.
2. Ověřte správnou funkci AFDD za normálních podmínek.
3. Vytvořte obvody s poruchovou smyčkou pro testování AFDD.
4. Opravte generátor oblouku s měděnými elektrodami jako další metodu.
5. Zpracujte vyhodnocení výsledků testování.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] HAVELKA, Otto. Elektrické přístroje. Praha: SNTL – Státní nakladatelství technické literatury, 1985. ISBN 04529-85
- [2] ČSN 33 2000-4-42 Bezpečnost – ochrana před účinky tepla, 1994, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
- [3] ČSN EN 62606 Obecné požadavky na obloukové ochrany, 2014, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 31.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Jakub Kaser

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.

předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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 bakalářská práce se zabývá obloukovou ochranou AFDD. AFDD je přístroj, který má za úkol chránit elektrické instalace nízkého napětí před vznikem požáru v důsledku sériového či paralelního poruchového oblouku. Při výskytu paralelního oblouku sice může ve většině případů vybavit i jistič nebo případně proudový chránič, detekce sériového oblouku je ale možná jen díky obloukové ochraně. AFDD však může být použito pouze jako ochrana doplňková. V teoretické části je popsán vznik elektrického oblouku, příčiny požárů v domácnostech a princip činnosti obloukové ochrany. Cílem praktické části je vytvořit reálné poruchy, při kterých může vzniknout sériový oblouk, a testovat při nich funkci obloukové ochrany. Dalším cílem práce je opravit generátor oblouku a ověřit funkci AFDD za použití různých materiálů elektrod.

Klíčová slova

oblouková ochrana AFDD, elektrický oblouk, sériový oblouk, paralelní oblouk, požár, jistič, proudový chránič, generátor oblouku

Abstract

The bachelor's thesis deals with AFDD, a device that protects the low voltage electrical installations against fire caused by a serial or parallel arc fault. Although MCB and RCD can mostly disconnect the circuit when the parallel arc appears, only AFDD can detect the series arc fault. AFDD can be used only as additional protection. The theoretical part of this thesis describes the creation of electric arc, causes of house fires, and explains the principle of the Arc Fault Detection Device. The purpose of the practical part is to create real malfunctions that cause a series arc in the circuit and to test the function of AFDD. The next purpose is to repair the arc generator and to verify the function of AFDD using different materials of electrodes.

Keywords

Arc Fault Detection Device (AFDD), electric arc, series arc fault, parallel arc fault, fire, Miniature Circuit Breaker (MCB), Residual Current Device (RCD), arc generator

Bibliografická citace

KŘEPELA, František. *Testování obloukové ochrany AFDD za normálních a poruchových podmínek*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142695>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Jakub Kaser.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>František Křepela</i>
VUT ID studenta:	220767
Typ práce:	<i>Bakalářská práce</i>
Akademický rok:	2021/22
Téma závěrečné práce:	<i>Testování obloukové ochrany AFDD za normálních a poruchových podmínek</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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: 31. května 2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jakubu Kaserovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 31. května 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	10
ÚVOD	11
1. ELEKTRICKÝ VÝBOJ V PLYNECH	12
1.1 VZNIK VÝBOJŮ	12
1.2 DRUHY VÝBOJŮ.....	12
1.2.1 <i>Townsendův temný výboj</i>	13
1.2.2 <i>Korónový výboj</i>	13
1.2.3 <i>Doutnavý výboj</i>	13
1.3 ELEKTRICKÝ OBLOUK	13
1.4 DYNAMICKÁ CHARAKTERISTIKA OBLOUKU.....	15
2. JEDNOTLIVÉ TYPY PORUCH ZPŮSOBUJÍCÍ POŽÁR	16
2.1 ZKRATY MEZI PRACOVNÍMI VODIČI A ZEMNÍ PORUCHY	17
2.2 PŘETÍŽENÍ	18
2.3 PORUCHOVÝ OBLOUK.....	18
2.3.1 <i>Paralelní oblouk</i>	18
2.3.2 <i>Sériový oblouk</i>	18
3. OCHRANNÉ A JISTICÍ PŘÍSTROJE	20
3.1 JISTIČ	20
3.2 PROUDOVÝ CHRÁNIČ.....	21
3.2.1 <i>Princip funkce</i>	21
3.2.2 <i>Rozdělení podle časové závislosti vypnutí</i>	21
3.2.3 <i>Rozdělení podle citlivosti na různé druhy reziduálních proudů</i>	21
3.3 PŘEHLEDOVÁ TABULKA	23
4. OBLOUKOVÁ OCHRANA AFDD.....	24
4.1 UMÍSTĚNÍ AFDD.....	25
4.2 DETEKCE PORUCHOVÉHO OBLOUKU.....	25
4.2.1 <i>Detekce sériového oblouku</i>	27
4.2.2 <i>Detekce paralelního oblouku</i>	28
4.3 NEVÝHODY AFDD.....	29
5. POŽADAVKY A ZKOUŠKY AFDD PODLE ČSN EN 62606	30
5.1 POŽADAVKY NA KONSTRUKCI A ČINNOST	30
5.2 OTEPLENÍ.....	30
5.3 OVĚŘENÍ OCHRANY PŘED ÚRAZEM ELEKTRICKÝM PROUDEM	30
5.4 ZKOUŠKY SÉRIOVÉHO PORUCHOVÉHO OBLOUKU	31
5.4.1 <i>Ověření správné činnosti v případě, že se v obvodu náhle objeví sériový oblouk</i>	31
5.4.2 <i>Ověření správné činnosti v případě zapojení zátěže se sériovým poruchovým obloukem</i> ..	32
5.4.3 <i>Ověření správné činnosti v případě zapnutí do sériového poruchového oblouku</i>	32
5.5 ZKOUŠKY PARALELNÍHO PORUCHOVÉHO OBLOUKU	32
5.5.1 <i>Ověření správné činnosti v případě paralelního oblouku s omezeným proudem</i>	32

6.5.2	<i>Ověření správné činnosti v případě poruchového oblouku proti zemi</i>	33
6.	TESTOVÁNÍ OBLOUKOVÉ OCHRANY	34
6.1	POPIS OBVODU	34
6.1.1	<i>Rozváděč</i>	34
6.1.2	<i>Oblouková ochrana AFDD+</i>	35
6.1.3	<i>Zátěž</i>	35
6.1.4	<i>Ampérmetr</i>	35
6.2	FUNKCE AFDD ZA NORMÁLNÍCH PODMÍNEK	35
6.2.1	<i>Provoz komutátorového motoru – elektrická úhlová bruska</i>	35
6.2.2	<i>Provoz vadného komutátorového motoru – vysavač</i>	36
6.2.3	<i>Provoz asynchronního motoru s frekvenčním měničem</i>	36
6.3	TESTOVÁNÍ PŘIROZENÝCH PORUCHOVÝCH STAVŮ	37
6.3.1	<i>Pomalé vytažení zástrčky ze zásuvky</i>	38
6.3.2	<i>Pomalé překlápění vypínače na prodlužovacím kabelu</i>	38
6.3.3	<i>Nedostatečně utažená šroubová svorka v zásuvce</i>	39
6.3.4	<i>Přerušený kabel CYKY (například hlodavcem)</i>	40
6.3.5	<i>Přerušený kabel CYSY</i>	41
6.4	TESTOVÁNÍ PORUCHOVÝCH STAVŮ POMOCÍ PŘÍPRAVKŮ	41
6.4.1	<i>Využití kontaktů stykače</i>	41
6.4.2	<i>Přerušený fázový vodič na izolační desce</i>	43
6.4.3	<i>Úprava a využití již vyrobeného generátoru oblouku</i>	43
6.5	GENERÁTOR OBLOUKU.....	43
6.5.1	<i>Mechanické úpravy generátoru</i>	43
6.5.2	<i>Testování s uhlíkovou a měděnou elektrodou</i>	45
6.5.3	<i>Testování se dvěma dutými měděnými elektrodami</i>	46
6.5.4	<i>Testování s jednou dutou a jednou plnou měděnou elektrodou</i>	46
6.6	SOUHRN VÝSLEDKŮ TESTOVÁNÍ.....	47
7.	ZÁVĚR	48
	LITERATURA	50
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	52
	SEZNAM PŘÍLOH	53

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1: Charakteristika elektrických výbojů (převzato z [1])	13
Obrázek 1.2: Znárodnění struktury jednotlivých částí oblouku (převzato z [1])	14
Obrázek 1.3: Rozložení úbytků napětí v elektrickém oblouku (převzato z [1])	14
Obrázek 1.4: Časový průběh napětí a proudu střídavého oblouku (převzato z [1])	15
Obrázek 1.5: Dynamická charakteristika elektrického oblouku (převzato z [1])	15
Obrázek 2.1: Statistika příčin požárů v Německu pro rok 2020 podle IFS	16
Obrázek 2.2: Statistika příčin požáru způsobených elektřinou (převzato z [9])	17
Obrázek 3.1: Příklad vypínacích charakteristik jističe (převzato z [12])	20
Obrázek 3.2: Schéma popisující činnost proudového chrániče (převzato z [13])	22
Obrázek 4.1: Oblouková ochrana AFDD od firmy Eaton (převzato z [14])	24
Obrázek 4.2: Porovnání AFDD a AFCI od firmy Siemens (převzato z [18])	24
Obrázek 4.3: Porovnání AFDD určených na jeden nebo dva moduly v rozváděči (Siemens a Hager) (převzato z [16])	25
Obrázek 4.4: Ilustrační schéma uspořádání obloukové ochrany v obvodu s výskytem poruchového oblouku (převzato z [18])	26
Obrázek 4.5: Signalizace příčiny vypnutí AFDD	27
Obrázek 4.6: Analýza signálu pro detekci sériového poruchového oblouku	28
Obrázek 4.7: Analýza signálu pro detekci paralelního poruchového oblouku	28
Obrázek 5.1: Zkouška sériového poruchového oblouku (převzato z [15])	32
Obrázek 5.2: Zkouška paralelního poruchového oblouku (převzato z [15])	33
Obrázek 6.1: Zapojení rozváděče	34
Obrázek 6.2: Jiskření komutátorového motoru se zkratem v rotoru	36
Obrázek 6.3: Zapojení AFDD s asynchronním motorem a frekvenčním měničem	37
Obrázek 6.4: Štítek asynchronního motoru	37
Obrázek 6.5: Oblouk při pomalém vytahování zásuvky ze zástrčky	38
Obrázek 6.6: Pomalé překlápění vypínače na prodlužovacím kabelu	39
Obrázek 6.7: Nedostatečně utažená šroubová svorka	39
Obrázek 6.8: Vznik oblouku kvůli nedostatečně utažené šroubové svorce	40
Obrázek 6.9: Zásuvka po destrukci	40
Obrázek 6.10: Přerušovaný fázový i nulový vodič kabelu CYKY 2,5	41
Obrázek 6.11: Přerušovaný kabel CYSY před a po testování, ochrana nevybavila	41
Obrázek 6.12: Stykač upravený pro vznik oblouku mezi jeho kontakty	42
Obrázek 6.13: Oblouk mezi kontakty stykače	42
Obrázek 6.14: Oblouk mezi přerušeným fázovým vodičem	43
Obrázek 6.15: Rozložený generátor oblouku před mechanickými úpravami	44
Obrázek 6.16: Vysoustružená redukce a původní šroub M16x30	44
Obrázek 6.17: Upravený generátor, vpravo je vidět vyložkování	45
Obrázek 6.18: Oblouk v generátoru s uhlíkovou a měděnou elektrodou	46
Obrázek 6.19: Oblouk v generátoru se dvěma dutými měděnými elektrodami	46
Obrázek 6.20: Oblouk v generátoru s dutou a plnou měděnou elektrodou	47

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 3.1: Schopnost přístrojů vypínat oblouk</i>	<i>23</i>
<i>Tabulka 5.1: Hodnoty maximálního oteplení pro jednotlivé části AFDD.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka 5.2: Maximální doba vypínání pro dané proudy oblouku (převzato z [15])</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 5.3: Počet půlperiod, při kterém musí AFDD odstranit oblouk (převzato z [15])</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 6.1: Souhrn výsledků testování</i>	<i>47</i>

ÚVOD

V Evropě je asi 30 % všech požárů způsobeno poruchou elektrické instalace, to je až 280 000 požárů ročně. Z toho více než polovina vznikla z důvodu poruchy elektrických spotřebičů. Tyto poruchy jsou velmi často způsobeny poruchovým obloukem, který vzniká například jako důsledek ohýbání vodičů, povolených kontaktů v zásuvkách, neopatrného vytahování zástrček ze zásuvek nebo přitlačení kabelů ke zdi těžkými domácími spotřebiči. V důsledku vzniku oblouku může dojít ke zuhelnatění izolace a následně k požáru. V případě výskytu paralelního oblouku je pravděpodobné, že požáru zabrání vybavení jističe nebo proudového chrániče. Ještě před několika lety ale bylo v podstatě nemožné včas detekovat sériový poruchový oblouk a zabránit tak požáru. Od konce devadesátých let probíhal výzkum v této oblasti a v roce 2008 vznikla v Americe první oblouková ochrana s názvem AFCI. V roce 2014 se následně dostala do Evropy pod názvem AFDD a v dnešní době už ji má ve svém výrobním programu většina firem, které vyrábějí přístroje do rozváděčů.

V teoretické části práce jsou popsány druhy elektrických výbojů v plynech, vznik elektrického oblouku a jeho dynamická charakteristika. Další část je věnována jednotlivým typům poruch způsobujících požár. Poté je vysvětlena funkce jističe a proudového chrániče a je vysvětleno, proč mohou detekovat poruchový oblouk jen v určitých případech. Dále je představena oblouková ochrana AFDD, princip její činnosti a vhodné umístění AFDD v elektroinstalaci. Na závěr jsou popsány vybrané zkoušky obloukové ochrany podle výrobní normy.

Praktická část je věnována ověření funkce obloukové ochrany. Toto ověření má tři části. V první z nich je testováno, zda oblouková ochrana nebude vypínat za normálních podmínek, tedy například i při provozu komutátorových motorů. Poté byl vytvořen obvod, ve kterém se nacházela ochrana AFDD, odporová zátěž a poruchová smyčka. Cílem bylo vytvořit takovou poruchu, která by se co nejvíce blížila skutečné poruše v elektroinstalaci. Závěrem byla testována funkce AFDD při použití generátoru oblouku, který byl před tím upraven pro účely této bakalářské práce, aby bylo možné použít různé materiály elektrod.

1. ELEKTRICKÝ VÝBOJ V PLYNECH

Aby mohl plynem procházet elektrický proud, je k tomu nutná existence volných nosičů, které se díky působení elektrického pole mohou přesouvat mezi elektrodami. Výboj můžeme dělit na samostatný a nesamostatný. U nesamostatného musí být pohyb nosičů způsoben nějakým vnějším zásahem. Pro průběhy na elektrických kontaktech jsou důležité především výboje samostatné. Dále můžeme výboje dělit na stacionární a nestacionární. [1]

1.1 Vznik výbojů

V plynu se jednotlivé molekuly pohybují všemi možnými směry různou rychlostí (od téměř nulové až do tisíců metrů za sekundu). Tyto molekuly do sebe narážejí a srážky mohou být buď pružné, nebo nepružné. [2]

Při pružných srážkách dochází k přeměně kinetické energie v jinou a díky tomu dochází k disociaci molekul, tedy jejich rozpadu na radikály nebo atomy. [2]

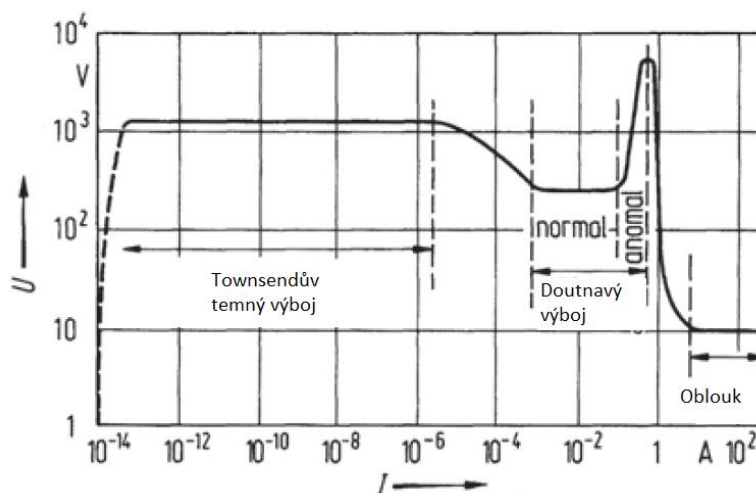
Při srážkách nepružných se energie mění na energii ionizační nebo budicí. Při nabuzení se okrajový elektron dostane do nestabilní dráhy. Po návratu zpět dojde k vyzáření uvolněné potenciální energie ve formě fotonu. Během ionizace se oddělí elektron z atomového obalu. Z neutrálního atomu tedy vznikne kladný a záporný iont. Pokud nedojde k rekombinaci, tyto ionty jsou urychlovány elektrickým polem. [2]

Rychlost iontu je menší než rychlost elektronu, elektron ale získá dostatek energie k nabuzení nebo ionizaci a celý postup se opakuje. Díky ionizačním pochodům se tedy vytváří volné nosiče nábojů (elektrony nebo ionty) a plyn má schopnost vést elektrický proud. V plynu vzniká plazma elektrického výboje. [2]

Pro vznik výboje je třeba, aby ionizační pochody převažovaly nad rekombinačními. Aby výboj nadále existoval, tyto pochody musí být v rovnováze. Při zániku potom převládají rekombinační pochody. [2]

1.2 Druhy výbojů

V následujícím grafu vidíme hodnoty napětí a proudů při vzniku jednotlivých druhů výbojů. V tomto grafu není znázorněn korónový výboj, který se nachází v oblasti mezi temným a doutnavým výbojem. [1]



Obrázek 1.1: Charakteristika elektrických výbojů (převzato z [1])

1.2.1 Townsendův temný výboj

Townsendův temný výboj můžeme pozorovat mezi studenými elektrodami při tlaku 10^1 až 10^3 Pa při napětí cca 1000 V a hodnotách proudu asi 10^{-7} – 10^{-13} A. Je to výboj nesamostatný, protože pro jeho existenci je nutný zdroj nabitých částic. Tento výboj nevydává žádné viditelné záření. Vzhledem k nízkému tlaku, při kterém vzniká, a zejména nízké hodnotě proudu, nehraje pro elektrické výboje v přístrojích významnou roli. I kdyby se ale případně vyskytl, není nebezpečný, pokud je průrazné napětí nižší než průrazné napětí daného plynu (vzduchu). [1] [2]

1.2.2 Korónový výboj

Pokud se intenzita elektrického pole blíží elektrické pevnosti prostředí, temný výboj přejde do stavu korónového výboje. Tento výboj je samostatný. Ionizační pochody v korónovém výboji probíhají zejména v blízkosti elektrod. Jedná se o výboj neizotermický. [2]

1.2.3 Doutnavý výboj

Doutnavý výboj většinou existuje při nízkém tlaku, asi mezi 1 Pa a 1 kPa. Jedním z jeho hlavních znaků je neizotermické plazma. To znamená, že různé složky plazmatu, které tvoří různé druhy částic, mají rozdílnou kinetickou energii, a tudíž i rozdílnou teplotu. [2]

1.3 Elektrický oblouk

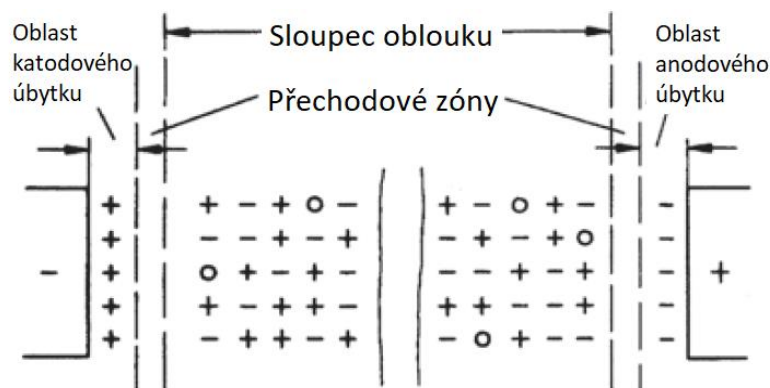
Doutnavý a temný výboj mohou existovat pouze při tlaku nižším, než je tlak atmosférický, kdežto jiskra a oblouk vznikají při tlaku stejném nebo vyšším. [2]

Jiskra a oblouk jsou výboje s největším procházejícím proudem mezi elektrodami. Oba tyto výboje jsou samostatné. Rozdíl mezi jiskrou a obloukem je ten, že jiskra trvá

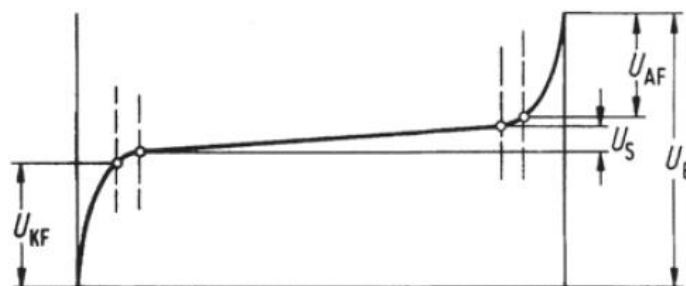
velmi krátkou dobu, a pokud nepřejde v elektrický oblouk, zanikne sama. K uhasnutí oblouku je potřeba vnější zásah, jinak hoří libovolně dlouhou dobu. [2]

Poznávacím znakem oblouku volně hořícího ve vzduchu je nízká hodnota katodového úbytku napětí. Proudová hustota u paty oblouku je naopak velmi vysoká, dosahuje hodnot 10^2 - 10^7 A/cm². Standartní hodnoty proudu jsou větší než 1 A. Dalším znakem je malé napětí mezi elektrodami vzhledem k napětí zdroje. Pro elektrický oblouk je charakteristické intenzivní vyzařování světla z plazmatu a z elektrod. Elektrický oblouk může být stejnosměrný nebo střídavý, podle druhu napětí v obvodu. Tato práce se zabývá pouze obloukem střídavým. Oblouk vždy vzniká přechodem z koróny. Doba jeho vzniku je řádově v jednotkách μ s, je tedy velmi krátká. [1] [2]

Struktura oblouku je popsána na obrázku 1.2. Ve střední části, ve sloupci oblouku, je intenzita elektrického pole velmi malá. Na oblast sloupce oblouku můžeme nahlížet jako na oblast nacházející se v termické rovnováze, tedy jako na slabě ionizované plazma, ve kterém se vyskytuje přibližně stejný počet iontů a atomů nebo molekul. Teplota této části se u hořícího oblouku pohybuje mezi 10^3 a 20^3 K. Čím více se přibližujeme k elektrodám, tím více se teplota oblouku snižuje. Vzrůst potenciálu je ve sloupci oblouku pomalý a lineární. Naopak v oblastech blízkých elektrodám roste potenciál velmi rychle. Tyto oblasti se nazývají katodový a anodový úbytek. Tato vlastnost oblouku je vidět na obrázku 1.3. [1] [2]



Obrázek 1.2: Znárodnění struktury jednotlivých částí oblouku (převzato z [1])

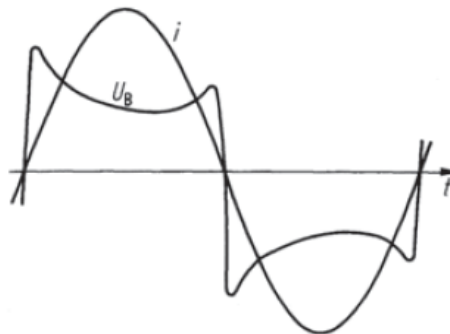


Obrázek 1.3: Rozložení úbytků napětí v elektrickém oblouku (převzato z [1])

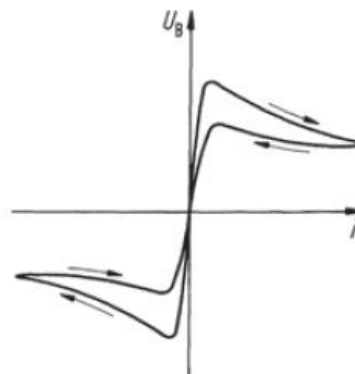
1.4 Dynamická charakteristika oblouku

U střídavého oblouku se hodnoty napětí a proudu periodicky mění s časem, je tedy mnohem méně stabilní než oblouk stejnosměrný. Na obrázku 1.4 vidíme průběh napětí a proudu v čase. Na začátku půlperrody napětí stoupá shodně se síťovým napětím, to až do chvíle, kdy dosáhne hodnoty potřebné k zapálení oblouku. Toto napětí nazýváme zapalovací napětí a bod v grafu nazýváme zapalovací špička. Po zapálení oblouku napětí rychle klesá a po dobu hoření se mění velmi málo. Před koncem půlperrody se hodnota napětí opět zvýší, i když na menší hodnotu, než byla hodnota zapalovací špičky. Tato hodnota se nazývá zhášecí špička. Tvar proudu je téměř sinusový, ale můžeme vidět, že průběh je mírně zdeformovaný. [2]

Pokud z obou těchto průběhů eliminujeme čas, dostaneme tzv. dynamickou charakteristiku, kterou vidíme na obrázku 1.5. Z charakteristiky je vidět, že hodnoty napětí při vytváření oblouku jsou vyšší než při jeho zhášení. Při vytváření oblouku musí být elektrický příkon do oblouku takový, aby kromě krytí ztrát stačil i na dodávání energie ionizačním pochodům. Během uhasínání oblouku jsou ke krytí ztrát využívány i elektrony v plazmatu, které nejsou potřebné pro transport proudu. Hodnota napětí je tedy při uhasínání nižší. Tuto skutečnost nazýváme hysterezní pochody. Na tvar dynamické charakteristiky má dále vliv například materiál elektrod, délka oblouku nebo frekvence napájecího napětí. [2]



Obrázek 1.4: Časový průběh napětí a proudu střídavého oblouku (převzato z [1])

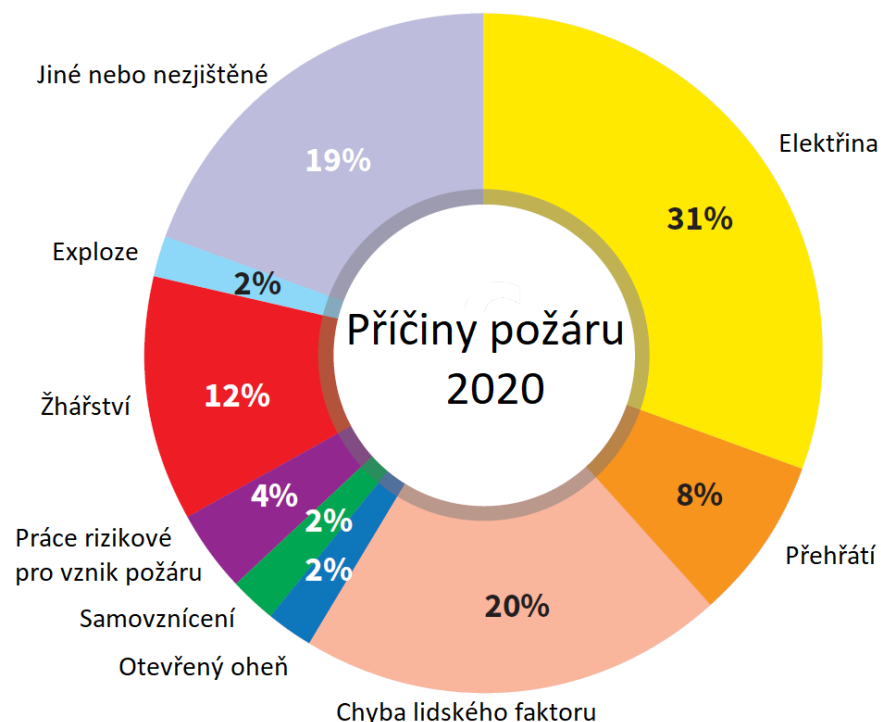


Obrázek 1.5: Dynamická charakteristika elektrického oblouku (převzato z [1])

2. JEDNOTLIVÉ TYPY PORUCH ZPŮSOBUJÍCÍ POŽÁR

Podle statistiky EFSA (European Fire Safety Alliance) z roku 2017 [3] bylo 20 až 30 % všech požárů v Evropě způsobeno elektrickými poruchami, to znamená asi 280 000 požárů během jednoho roku. V Německu to potom v roce 2020 bylo dokonce 31 % (viz obrázek 2.1) a mezi lety 2002-2020 32 %, jak uvádí IFS (Institut für Schadenverhütung und Schadenforschung). [4] Ze statistik Hasičského záchranného sboru ČR sice nelze přesné procento zjistit, protože závady v elektroinstalaci jsou zde zahrnuty pod pojmem „technické závady“, ale z dostupných dat můžeme odhadnout, že číslo bude podobné jako v Německu. [5]

Příčinou požárů způsobených elektroinstalací je vznik elektrického oblouku, který může nastat jako důsledek zkratu a dále pak nadproudů, které mohou být způsobeny například špatně zvolenou nadproudovou ochranou nebo starou či poškozenou izolací vedení elektroinstalace. [7] Pokud se kvůli poškození uvnitř vodiče vyskytne část s menším průřezem, začne se více zahřívat a dojde k oxidaci žhavé mědi. Při zvyšování teploty se měď taví. Ustálí se oblouk a při teplotě cca 6000 °C dochází k uhelnatění izolace. To může mít nakonec za následek požár. [11]

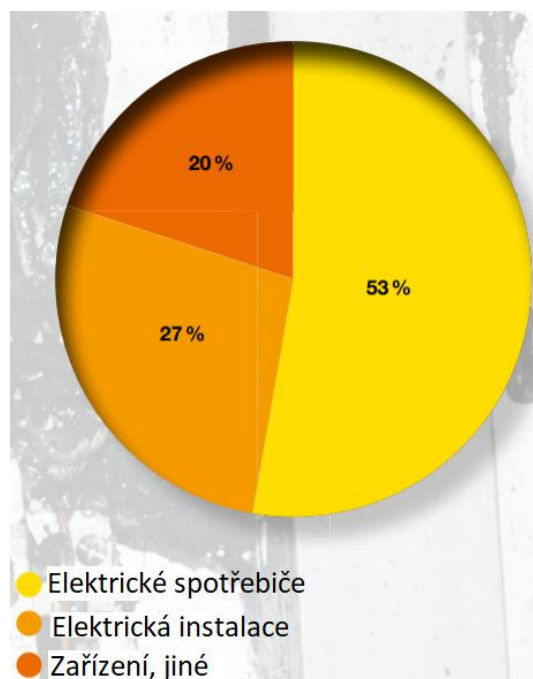


Obrázek 2.1: Statistika příčin požárů v Německu pro rok 2020 podle IFS

(převzato z [4])

Z požárů způsobených elektřinou je až 53 % způsobeno elektrickými spotřebiči a 27 % poruchami v elektroinstalaci. [9] IFS zveřejnila statistiku z roku 2009, podle které

je pro vznik požáru u spotřebičů několik rizikových faktorů. Prvním z nich je oteplení při provozu, ať už jako nevyhnutelný efekt (sporák, pračka, sušička) nebo jako vedlejší efekt (např. televizor). Dalším rizikovým faktorem je přítomnost vody nebo vlhkost vzduchu. Pokud se tyto oba faktory vyskytnou zároveň, riziko požáru je velké. Ze statistiky tím pádem nejhůř vyšly sušičky, potom následovaly televizory, ledničky, myčky a pračky. [10]



Obrázek 2.2: Statistika příčin požáru způsobených elektřinou (převzato z [9])

Příčinou požáru může být nadproud. Nadproudy dělíme podle velikosti na zkraty nebo přetížení. Při zkratu je hodnota proudu alespoň zhruba desetkrát větší než proud jmenovitý, menší hodnoty nadproudu můžeme označit jako přetížení. Jednotlivé druhy nadproudů jsou popsány níže.

2.1 Zkraty mezi pracovními vodiči a zemní poruchy

Za nejčastější příčiny poškození spínacích zařízení můžeme označit zkraty mezi pracovními vodiči a zemní poruchy. Podle normy ČSN EN 60909 je zkrat definován jako „náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodivými částmi vedoucí k tomu, že rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito vodivými částmi je roven nule nebo má hodnotu blízkou nule“. [19] Zkraty mezi vodiči i zemní poruchy mají nízkou hodnotu odporu. Tyto poruchy mohou mít různé příčiny, například chyby při montáži, údržbě nebo obsluze. Při zkratu je procházející proud mnohonásobkem proudu jmenovitého. [6]

2.2 Přetížení

Další nebezpečí spočívá v přetížení zařízení, tedy když zařízením protéká větší proud, než na který je dimenzován. Tento jev může nastat při příliš velkém odběru. Důsledkem je potom nepřiměřené oteplení z důvodu růstu tepelných ztrát ve vodičích. Při přetížení by měla vybavit nadproudová ochrana, tedy pojistka nebo jistič. Pokud by ochrany nevybavily, mohlo by to vést k poškození izolace a v krajním případě ke zkratu. Existuje ale i přetížení, které se vyskytuje běžně a kvůli kterému by ochrana neměla vybavit. K tomuto přetížení dochází například při spouštění motorů.

Pro jistění motorů proti zkratu se používají pojistky aM, které nereagují na krátká přetížení až do čtyřnásobku proudu. Při přetížení je možné použít kombinaci stykače a tepelného relé. Další možností je použít motorový spouštěč. Protože motory jsou citlivé i na malé přetížení, motorovým spouštěčem nebo tepelným relé se přesně nastaví proud motoru a dojde k vybavení po jeho překročení. Jistič nebo pojistka gG by v tomto případě nezareagovaly s takovou citlivostí na tak malá přetížení jako tyto přístroje. [6][22]

2.3 Poruchový oblouk

U poruchového oblouku je hodnota procházejícího proudu blízká jmenovité hodnotě proudu obvodu nebo jisticího přístroje, popřípadě může být v závislosti na impedanci a místě výskytu i větší. [6]

2.3.1 Paralelní oblouk

Paralelní oblouk může vzniknout mezi dvěma pracovními vodiči (tedy mezi dvěma fázovými nebo fázovým a nulovým vodičem), nebo mezi fázovým a zemním vodičem. [6]

Důvodem vzniku paralelního oblouku může být například stárnutí izolačního materiálu. [11]

Pro detekci oblouku mezi pracovními vodiči není možné použít proudový chránič, protože žádný proud neteče zemnicím vodičem. Nadproudová ochrana ale vybaví. Na oblouk mezi pracovním a zemním vodičem může zareagovat proudový chránič (s citlivostí 300 mA), ale nadproudová ochrana nemusí vybavit z důvodů vyšší možné impedance. [11]

2.3.2 Sériový oblouk

Ke vzniku sériového oblouku dochází kvůli uvolněnému spojení, přetržení nebo poškození kabelu z důvodu tahového zatížení, přestřížení nebo tepelného přetížení. Příčinou vzniku může být nesprávná konstrukce, chybná montáž nebo nepřípustné proudové zatížení. [6]

Na základě svých vlastností představuje sériový oblouk velké nebezpečí pro elektrickou instalaci. Proud sériového oblouku je omezen připojením spotřebiče. Hoří jen tak dlouho, dokud je připojen spotřebič. Maximální proud obloukem je shodný s proudem zátěží. Protože sériový oblouk hoří mezi hroty přetržených částí jednoho vodiče, jeho maximální napětí je 230 V. Nebezpečí sériového oblouku spočívá právě v malé hodnotě protékajícího proudu, protože kvůli tomu není možné jej s pomocí standartních ochran detekovat. Výjimkou je oblouková ochrana AFDD, kterou však vždy můžeme použít pouze jako ochranu doplňkovou. [6]

Ani jistič ani pojistka nemůže vybavit, protože proud nepřekročí jmenovitou hodnotu. Proudový chránič nemůže poruchu rozpoznat, protože žádný proud neuniká mimo obvod (do země). [7]

Sériový oblouk může často vznikat jako důsledek poruchy ve spotřebičích, resp. kabelech, které k nim vedou. Příčinou může být například poškozená izolace z důvodu stárí, uvolněné kontakty v zásuvce nebo špatné zacházení s kabelem (neopatrné vytahování ze zásuvky) způsobující velké mechanické namáhání, poškodit se izolace může i při vrtání šroubů do zdi nebo přehryzáni kabelu hlodavci, zároveň ale třeba i kvůli ohýbání vodičů do zásuvek nebo kvůli tomu, že kabel je často u spotřebičů přitlačen silně ke zdi, například u praček. Na izolaci může působit i teplo nebo vlhkost. [9]

3. OCHRANNÉ A JISTICÍ PŘÍSTROJE

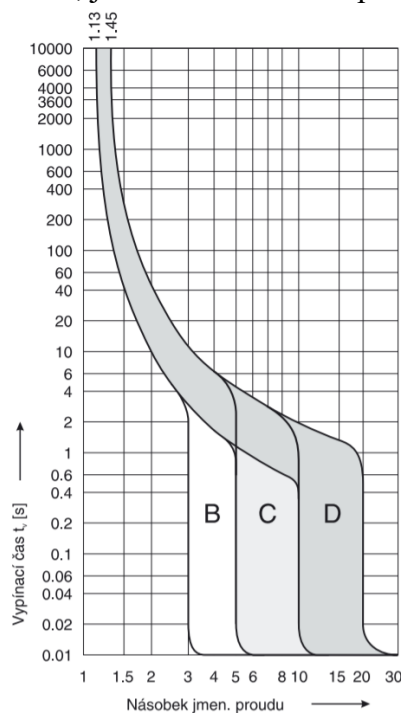
V této kapitole jsou uvedeny základní informace o nejčastějších přístrojích, které se vyskytují v elektroinstalaci, tedy o jističích a proudových chráničích. Chrání před nadproudem nebo dotykovým napětím a ve většině případů také před paralelním obloukem.

3.1 Jistič

Jistič je přístroj, jehož funkcí je ochrana proti nadproudu. Jeho označení je MCB (Miniature Circuit Breaker). Jeho velkou výhodou proti pojistce je, že při vybavení nedojde k jeho poškození a je možné ho opět zapnout. [2]

Jistič má velkou vypínací schopnost, ale není vhodný k častému spínání. Jeho vypínání zajišťuje pružina. Ta je standartně zajištěna západkou a k jejímu uvolnění dojde po dosažení podmínek k vypnutí na popud jedné ze spouští. [2]

Jistič má dvě různé spouště, a to elektromagnetickou a tepelnou. Spoušť elektromagnetická zajišťuje ochranu proti zkratu a je časově nezávislá. Po překročení určité hodnoty nadproudu tedy vypíná téměř okamžitě. Tepelná spoušť chrání proti přetížení a je časově závislá, to znamená, že doba vybavení závisí na velikosti nadproudu. Je tvořena bimetalem, který se díky rozdílné tepelné roztažnosti obou kovů ohýbá a po určitém čase uvolní západku. Celková vypínací charakteristika jističe je složena z obou těchto charakteristik a je polozávislá, jak můžeme vidět například na obrázku 3.1. [2]



Obrázek 3.1: Příklad vypínacích charakteristik jističe (převzato z [12])

Existují tři základní typy vypínací charakteristiky, B, C a D. Charakteristika B je vhodná pro jištění kabelů a vedení v domovních instalacích, například světelné a zásuvkové obvody. Vypínací charakteristika C se používá pro jištění kabelů a vedení s vyššími proudovými rázy, tedy například pro jištění motorů. Vypínací charakteristika D je vhodná pro jištění obvodů se zařízeními způsobujícími vysoké proudové rázy, například transformátory nebo motory s těžkým rozběhem. [12]

3.2 Proudový chránič

Proudový chránič je přístroj, jehož funkcí je odpojit obvod, pokud je v něm překročena hodnota jmenovitého reziduálního proudu. Označení pro proudový chránič je RCB (Residual Current Device). První použitelný proudový chránič si nechal patentovat v roce 1957 Gottfried Biegelmeier (technický ředitel společnosti Felten&Guillaume). [14]

Existují tři druhy ochrany, ochrana proti požáru s citlivostí 300 mA, doplňková s citlivostí 30 mA na zásuvkové a světelné okruhy, kam mají přístup laici, a třetí typ jako automatické odpojení od zdroje. [14]

3.2.1 Princip funkce

Proudový chránič má tři základní části, a to součtový proudový transformátor, vybavovací relé s permanentním magnetem a spínací mechanismus. Součtový transformátor má většinou tvar prstence. [13]

Pro správnou funkci je třeba, aby přístrojem procházely všechny fázové vodiče a nulový vodič. Vodič ochranný přístrojem ale procházet nesmí. To je důvod, proč není možné používat proudový chránič v sítích TN-C. Proudový chránič porovnává proudy v pracovních vodičích, které procházejí součtovým transformátorem. Pokud v obvodu není porucha, jejich součet by měl být nulový. Při zemní poruše reziduální proud vybudí v součtovém transformátoru magnetický tok, v důsledku toho je uvedeno do činnosti vybavovací relé, a to dá popud k vypnutí kontaktů proudového chrániče. [13]

Každý proudový chránič obsahuje zkušební mechanismus, jehož prvky jsou testovací tlačítko a předradný odpor. Stisknutím testovacího tlačítka se přes zkušební odpor vyvolá v proudovém chrániči reziduální proud. Ověřování funkce by se mělo provádět asi jednou za měsíc. [13]

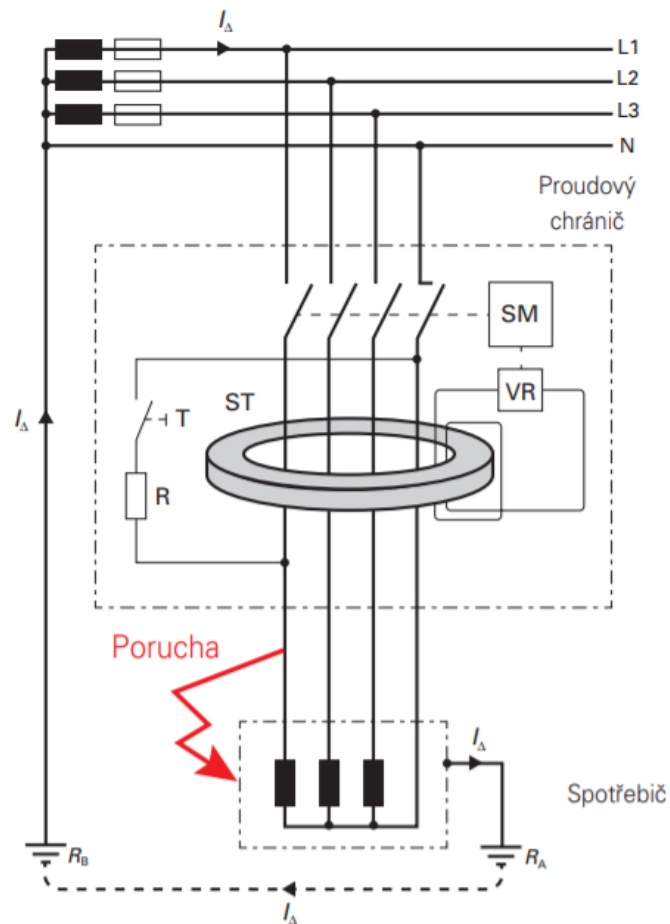
3.2.2 Rozdělení podle časové závislosti vypnutí

Proudové chrániče se podle rychlosti reakce na reziduální proud dělí na typy bez zpoždění a se zpožděným vypínáním (typy G a S). U typu G je doba nepůsobení minimálně 10 ms, u typu S 40 ms. Díky zpoždění dochází daleko méně k nežádoucímu vybavení. Mají větší odolnost vůči proudovým rázům. [13]

3.2.3 Rozdělení podle citlivosti na různé druhy reziduálních proudů

Nejčastěji používané typy proudového chrániče jsou AC, A a B. Chrániče typu AC jsou

určeny pouze pro střídavé reziduální proudy. Chrániče typu A se používají pro střídavé a pulzující stejnosměrné reziduální proudy, případně i s malou složkou hladkého stejnosměrného reziduálního proudu (do 6 mA). Typ B je pro všechny druhy reziduálních proudů, tedy střídavé, pulzující stejnosměrné i hladké stejnosměrné reziduální proudy. Ty se mohou vyskytovat tam, kde se používají výkonové polovodičové prvky (frekvenční měniče, fotovoltaické elektrárny apod.). [13]



- SM spínací mechanismus
- VR vybavovací relé s permanentním magnetem (PMR)
- ST součtový proudový transformátor
- T testovací tlačítko
- R předřadný odpor
- I_{Δ} reziduální proud
- R_A odpor uzemnění spotřebiče
- R_B odpor uzemnění zdroje

Obrázek 3.2: Schéma popisující činnost proudového chrániče (převzato z [13])

3.3 Přehledová tabulka

V následující tabulce 3.1 je uvedeno, které ochranné přístroje jsou schopny zareagovat na určitý typ poruchového oblouku. Z tabulky je vidět, že AFDD jako jediná z ochran dokáže reagovat na všechny tři typy oblouku. U paralelního oblouku však pouze v krajních situacích doplňuje vlastnosti jističe nebo proudového chrániče. U vybavení jističe při paralelním oblouku L-PE záleží na podmínkách zkratu, pokud je ale zkrat přímo mezi vodiči, jistič vybaví.

Může přístroj zareagovat při daném typu poruchového oblouku?			
	Paralelní oblouk L-N	Paralelní oblouk L-PE	Sériový oblouk
MCB	Ano	Spíše ano	Ne
RCD	Ne	Ano	Ne
AFDD	Ano	Ano	Ano

Tabulka 3.1: Schopnost přístrojů vypínat oblouk

4. OBLOUKOVÁ OCHRANA AFDD

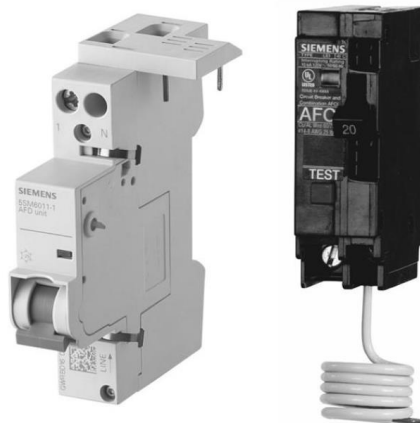
Podle definice v ČSN EN 62606 je AFDD „přístroj k omezení vlivů poruchových oblouků odpojením obvodu, jakmile je zjištěn poruchový oblouk“. Zkratka AFDD znamená Arc Fault Detection Device (zařízení pro detekci elektrického oblouku). [15]



Obrázek 4.1: Oblouková ochrana AFDD od firmy Eaton (převzato z [14])

Oblouková ochrana AFDD je zatím jediný přístroj, který nás dokáže chránit před sériovými poruchami. Při vzniku sériového oblouku totiž ochranným vodičem neteče žádný poruchový proud, a proto nemůže vybavit proudový chránič. Také se při sériovém oblouku nezvyšuje impedance vedení, tudíž nevzrůstá proud a nadproudová ochrana tedy také nemůže vybavit. Teprve až když začne doutnat plastová izolace vodiče, může nadproudová ochrana nebo proudový chránič vybavit. V takovém případě už je ale riziko vzniku požáru velmi vysoké. [16]

Kvůli vysokému počtu požárů způsobených elektrickým obloukem byl v 90. letech minulého století v Severní Americe zahájen vývoj ochranných přístrojů pro detekci poruchových oblouků. S prvním řešením přišla firma Siemens. V roce 2008 byl představen přístroj AFCI (Arc fault circuit interrupter). V USA je podle normy povinné umisťovat AFCI do elektroinstalací od roku 2014, v Kanadě pak od roku 2015. V roce 2014 se podobné přístroje začaly objevovat v Evropě již pod názvem AFDD. [18]



Obrázek 4.2: Porovnání AFDD a AFCI od firmy Siemens (převzato z [18])

4.1 Umístění AFDD

Tento přístroj je možné použít v elektrických instalacích nízkého napětí. Většinou se vyrábí zároveň ve spojení s nadproudovou ochranou i proudovým chráničem (např. Eaton). Vyrábí se ale i samostatně nebo pouze v kombinaci s jističem (např. ABB). Pro úsporu místa v rozváděči se vyrábí přístroj, který je kombinací AFDD a jističe, a přitom zabírá pouze jeden modul v rozváděči, může se ale vyrábět i standardně jako dvoumodulový. [16]



Obrázek 4.3: Porovnání AFDD určených na jeden nebo dva moduly v rozváděči (Siemens a Hager) (převzato z [16])

Podle normy z roku 2016 byla instalace AFDD v Německu u určitých koncových jednofázových obvodů povinná. Po úpravě normy v roce 2019 už je instalace AFDD proti tepelným účinkům poruchového oblouku i v Německu pouze doporučovaná. Definice v této normě přispěla mezi projektanty a staviteli spíše k nejistotě než k objasnění, v mnoha případech není jasné, zda je nutné AFDD instalovat či ne. [16]

Obloukovou ochranu má smysl používat pouze na koncových obvodech. Zejména v ložnicích, odpočinkových místnostech nebo mateřských školách a domovech pro seniory. Také je vhodné je instalovat do míst s větší pravděpodobností výskytu požáru, například kvůli uloženým hořlavým materiálům nebo hořlavým stavebním materiálům. Dále také v místech, kde jsou uloženy hodnotné předměty, například v muzeích nebo galeriích. [14][16]

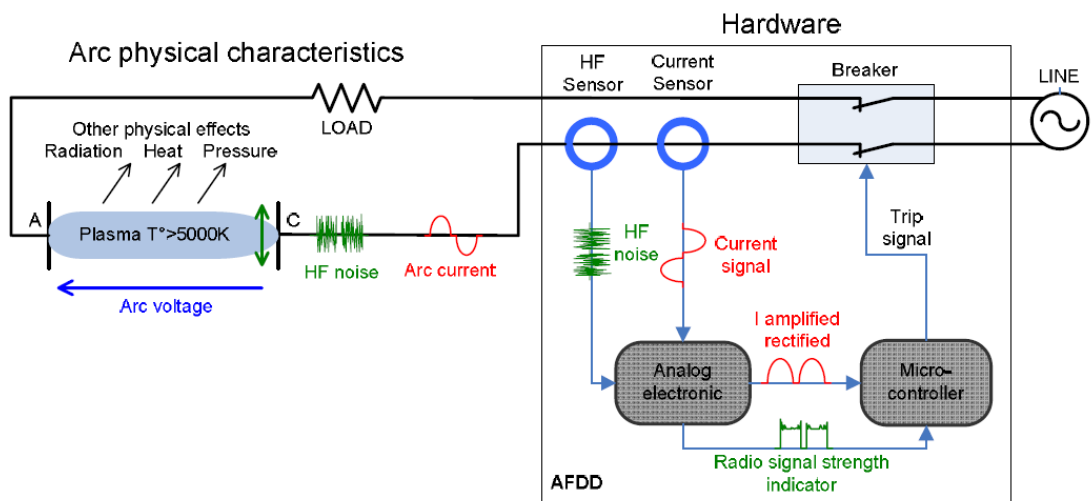
4.2 Detekce poruchového oblouku

Pro proud při výskytu elektrického oblouku je charakteristická přítomnost vyšších harmonických. AFDD tedy neustále měří pracovní proud v obvodu dvěma oddělenými senzory. Prostřednictvím analogového elektronického obvodu je rozdělen na vysokofrekvenční a nízkofrekvenční část. [11]

Nízkofrekvenční signál má frekvenci nižší než 1 kHz a při výskytu oblouku je kvůli jeho impedanci a kvůli přítomnosti vyšších harmonických jeho průběh značně odlišný od harmonického, jak je vidět na obrázku 4.6. Nízkofrekvenční signál je potom zesílen

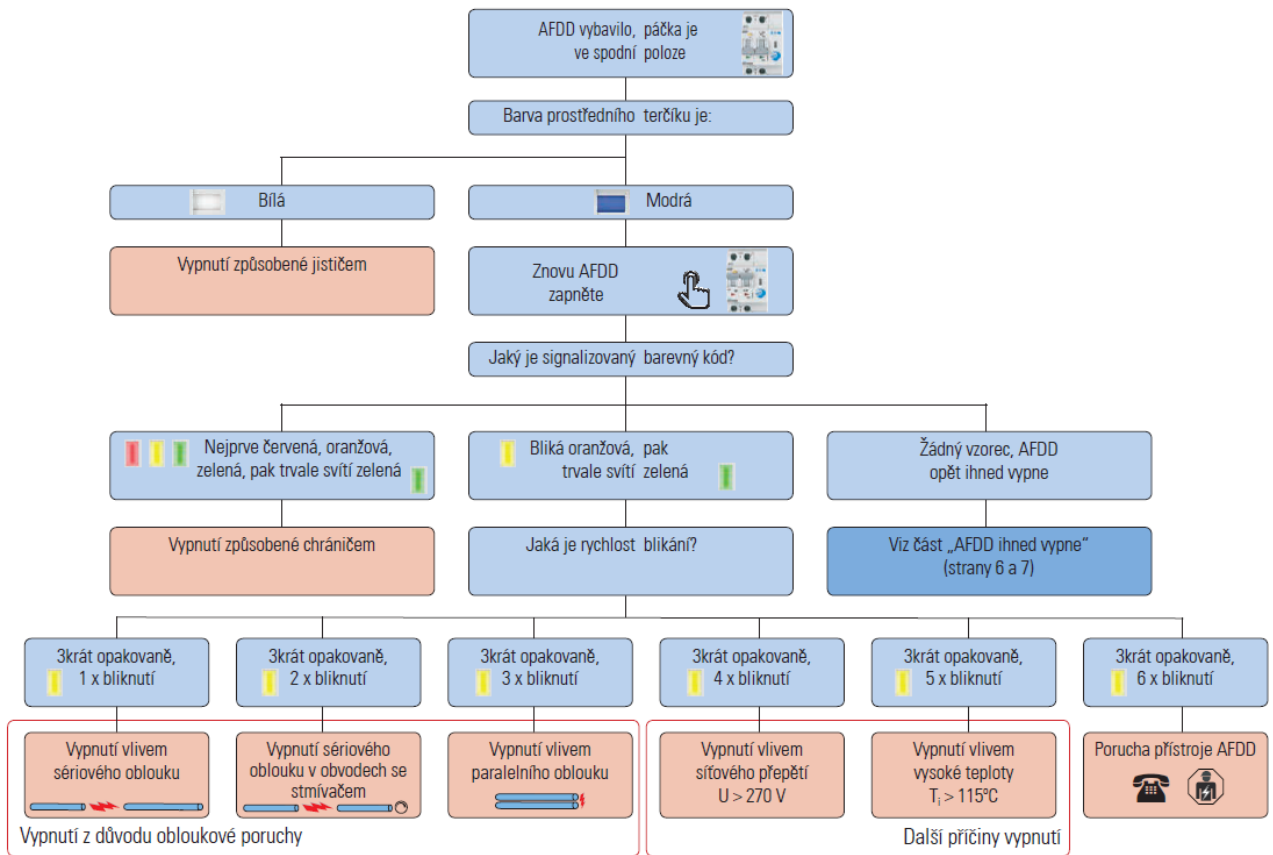
a usměrněn. Vysokofrekvenční signál, který je snímán v pásmu 22-24 MHz, je transformován na RSSI signál (Received Signal Strength Indication – ukazatel síly přijatého signálu). Tento signál znázorňuje výkon oblouku při dané frekvenci. Takto upravené signály jsou analyzovány mikroprocesorem. Ten potom dokáže analyzovat, zda se jedná o vysokofrekvenční signál charakteristický pro sériový nebo paralelní poruchový oblouk. Asi 80 % detekovaných poruch jsou oblouky sériové, zbytek oblouky paralelní. [11][18]

Je důležité, že mikroprocesor musí rozlišit pomocí analýzy vysokofrekvenční složky rozdíl mezi poruchovým obloukem a vysokofrekvenčním šumem, který vytváří například komutátorové motory nebo výkonová elektronika. AFDD nesmí vypnout při výskytu tohoto šumu. Na následujícím obrázku můžeme vidět ekvivalentní obvod přístroje AFDD a poruchového oblouku v obvodu. [11][18]



Obrázek 4.4: Ilustrační schéma uspořádání obloukové ochrany v obvodu s výskytem poruchového oblouku (převzato z [18])

Při opětovném zapnutí po vybavení obloukové ochrany AFDD signalizuje barevným světelným kódem, jaká byla příčina vypnutí. Díky tomu můžeme snadněji identifikovat a odstranit závadu. Přehled signalizací je uveden na obrázku 4.5.

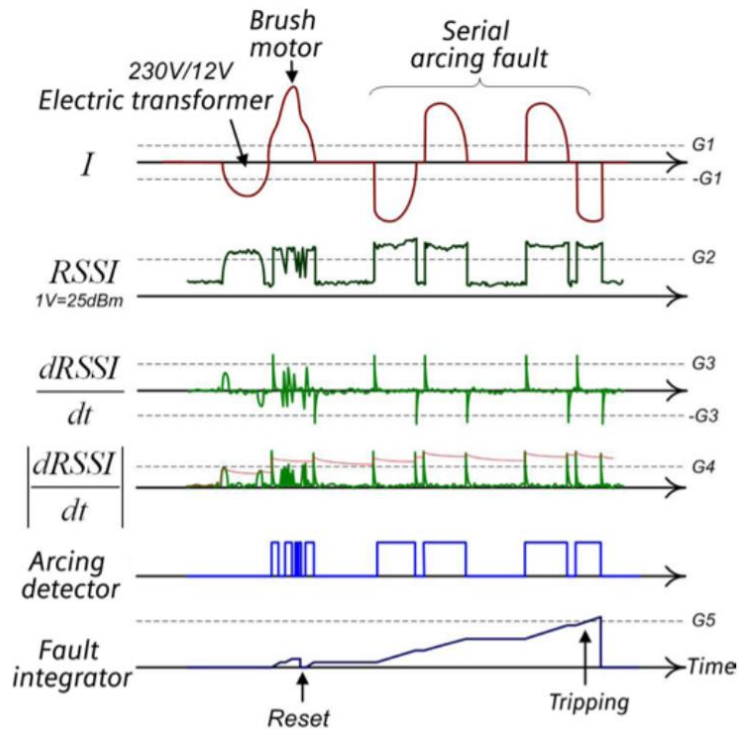


Obrázek 4.5: Signalizace příčiny vypnutí AFDD

(převzato z [20])

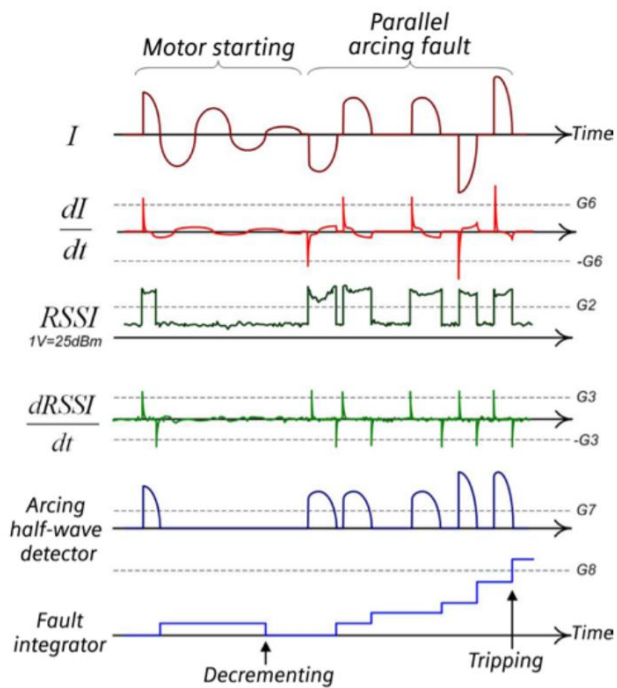
4.2.1 Detekce sériového oblouku

Pokud se v obvodu vyskytne sériový oblouk, očekáváme výskyt vysokofrekvenčního šumu po celou dobu existence oblouku. Při průchodu proudu nulou oblouk uhasne a hodnota RSSI značně poklesne. Existence oblouku tedy způsobuje periodicky generovaný vysokofrekvenční šum synchronizovaný s průběhem proudu v nízkofrekvenční oblasti. Vznik a zánik oblouku trvá jednotky mikrosekund, je tedy velmi krátký. Hodnota derivace RSSI podle času je tím pádem vysoká. Její absolutní hodnotu měří mikroprocesor. Analýzu popisuje obrázek 4.6. Pokud RSSI překročí hodnotu G2 a absolutní hodnota $dRSSI/dt$ hodnotu G4, systém vyhodnotí signál jako oblouk. Po definovaném počtu půlvln chybový integrátor překročí hodnotu G5 a řídicí jednotka pošle signál spínacímu přístroji, který vypne. Pokud řídicí jednotka odhalí vysokofrekvenční šum, který není oblouk, okamžitě dojde k resetování chybového integrátoru. [18]



Obrázek 4.6: Analýza signálu pro detekci sériového poruchového oblouku
(převzato z [17])

4.2.2 Detekce paralelního oblouku



Obrázek 4.7: Analýza signálu pro detekci paralelního poruchového oblouku
(převzato z [17])

Způsob analýzy vzniku paralelního oblouku se od předchozího liší, protože oba druhy oblouku mají různé vlastnosti. Detekci paralelního oblouku znázorňuje obrázek 4.7. Nepočítá se tu pouze hodnota derivace $dRSSI/dt$, ale i derivace proudu dI/dt . Pokud dI/dt překročí hodnotu $G6$, je aktivována funkce pro detekci paralelních oblouků. Když signál $RSSI$ překročí hodnotu $G2$, řídicí jednotka identifikuje proud oblouku a poruchový integrátor skokově zvýší svou hodnotu. Když se ale v blízké době neobjeví další půlplna, hodnota poruchového integrátoru je opět snížena. Pokud se objeví dostatečný počet půlpln a poruchový integrátor překročí hodnotu $G8$, dojde k vypnutí. [17]

4.3 Nevýhody AFDD

Dosud existují pouze jednofázové obloukové ochrany. Nebezpečí vzniku poruchového oblouku se vyskytuje ale i v třífázových sítích. Je ale velmi pravděpodobné, že v budoucnu budou existovat i třífázové přístroje, jsou ve fázi vývoje. [16]

Na začátku vývoje AFDD byl velký problém s nechtěným vybavováním z důvodu detekce vysokofrekvenčních signálů, které ale nezpůsobovaly oblouk. V dnešní době je už jen velmi málo zátěží lineárních, takže se v síti vyskytuje vysokofrekvenčního rušení poměrně hodně, toto však nezpůsobuje žádnou poruchu. To je pro AFDD značná komplikace a může to vést k nechtěnému vybavení. Kvůli oběma výše uvedeným důvodům se zatím AFDD poměrně málo používá v průmyslu. [16]

Další nevýhodou jsou vysoké náklady. Pořizovací maloobchodní cena se pohybuje kolem 5 000,- Kč. Náklady na instalaci se odvíjí i od toho, zda je AFDD umístěováno do novostavby, kde je už při návrhu s přístrojem počítáno, nebo jestli se jedná o dovybavení již stávající instalace. Navíc vzhledem k tomu, že se oblouková ochrana může umíšťovat pouze do koncových obvodů a nemůže být použita pro více obvodů najednou, při stavbě rodinného domu se mohou kvůli použití AFDD náklady na elektroinstalaci značně navýšit. [16][20]

Jednou z největších nevýhod je, že se AFDD může použít pouze v sítích typu TN-S nebo TN-C-S. Starší instalace jsou často typu TN-C, ale v těch ochranu použít nemůžeme, i když je u nich bohužel pravděpodobnost vzniku poruchového oblouku největší. [16]

5. POŽADAVKY A ZKOUŠKY AFDD PODLE ČSN EN 62606

5.1 Požadavky na konstrukci a činnost

Oblouková ochrana AFDD musí být navržena tak, aby bylo její chování při obvyklém provozu bezpečné a spolehlivé. Nesmí způsobit nebezpečí pro uživatele nebo okolní prostředí. Jednotka AFD nesmí vytvářet proud mezi fázovým a nulovým nebo ochranným vodičem za účelem vypnutí jiného přístroje. Dále jednotka AFD nesmí snižovat hlavní pracovní charakteristiky daného ochranného zařízení. Toto zařízení musí být od stejného výrobce jako jednotka AFD. [15]

„Nesmí být možné pracovní charakteristiky AFDD změnit vnějšími zásahy.“ [15]
Také se nesmí stát, že by bylo možné vyřadit nebo zablokovat funkci AFDD. Musí být možnost zapnout a vypnout AFDD rukou. Činnost AFDD musí být nezávislá na jakékoliv odstranitelné části a nesmí být ovlivňována polohou krytů. Ovládací část, čelní deska nebo kryt mohou být umístěny pouze tak, aby byla možná správná indikace polohy kontaktů. Na to musí být brán zřetel při návrhu. [15]

5.2 Oteplení

Oteplení jednotlivých částí AFDD nesmí překročit hodnoty uvedené v následující tabulce 5.1. [15]

V případě, že je AFDD smontováno s jinými ochrannými zařízeními, která mají přísnější kritéria pro oteplení, musí platit vždy nejpřísnější norma. [15]

Části	Oteplení [K]
Svorky pro vnější spoje	65
Vnější části, kterých je možné se dotknout během ručního ovládní AFDD, včetně ovládacích prostředků z izolačního materiálu a kovových prostředků pro spojení izolovaných ovládacích prostředků několika pólů	40
Vnější kovové části ovládacích prostředků	25
Jiné vnější části, včetně čelní plochy AFDD, která je v přímém kontaktu s montážním povrchem	60

Tabulka 5.1: Hodnoty maximálního oteplení pro jednotlivé části AFDD

(převzato z [15])

5.3 Ověření ochrany před úrazem elektrickým proudem

Tento požadavek musí splnit ty části zařízení, u kterých může dojít ke kontaktu s obsluhou, pokud jsou namontovány jako pro obvyklé užívání. Zkouška se provádí

s normalizovaným zkušebním prstem. AFDD musí být při zkoušce opatřeno vodiči nejmenšího a největšího průřezu, které se k němu mohou připojit. Zkušební prst musí být navržen tak, aby každá jeho kloubová část mohla být natočena o 90° vzhledem k ose prstu. Zkušební prst se přiloží v každé možné poloze skutečného prstu. Při tom se použije indikátor kontaktu s živými částmi. Jako ten se doporučuje použít žárovka a aby minimální napětí bylo 40 V. AFDD s vnějšími kryty nebo kryty z termoplastického materiálu se podrobují i zkoušce, kdy po dobu 1 minuty na přístroj působí síla 75 N pomocí rovného bezkloubového zkušebního prstu, který má stejné rozměry jako normalizovaný zkušební prst. Tento prst se přikládá na ta místa, kde by deformace izolačních materiálů mohla zhoršit bezpečnost AFDD. Nepřikládá se na vylamovací otvory. Během této zkoušky se kryty nesmí deformovat do té míry, aby bylo možno se bezkloubovým zkušebním prstem dotknout živých částí. [15]

5.4 Zkoušky sériového poruchového oblouku

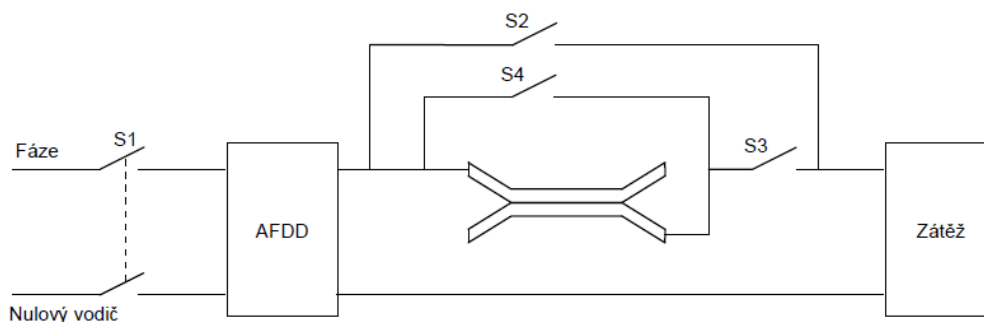
Následující tabulka 5.2 uvádí, za jaký čas musí AFDD odstranit sériový oblouk o daném proudu. Zkoušky je třeba provádět do hodnoty jmenovitého proudu AFDD. Zkouška se provádí při jmenovitém napětí. Zkušební proudy ve vzorku kabelu se nastavují při napětí o 50 V nižším oproti jmenovitému, aby byla vzata v úvahu hodnota napětí oblouku během zkoušky. [15]

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

Tabulka 5.2: Maximální doba vypínání pro dané proudy oblouku (převzato z [15])

5.4.1 Ověření správné činnosti v případě, že se v obvodu náhle objeví sériový oblouk

Nejdříve se nastaví hodnota proudu, od nejnižší hodnoty proudu obloukem až po jmenovitou hodnotu proudu AFDD. Potom se vypne vypínač S2 a následně S4, čím se do obvodu zapojí upravený vzorek kabelu, který je v sérii se zátěží. Od toho okamžiku se měří doba do vybavení. Celková doba vypínání se měří třikrát a nesmí přesáhnout hodnotu určenou v tabulce 5.2. [15]



Obrázek 5.1: Zkouška sériového poruchového oblouku (převzato z [15])

5.4.2 Ověření správné činnosti v případě zapojení zátěže se sériovým poruchovým obloukem

Spínače S3 a S4 jsou vypnuté, spínač S1 a AFDD jsou zapnuté. Proud je nastaven na nejnižší možnou hodnotu proudu oblouku. Potom je vypnut spínač S2 a zapnutím spínače S3 dojde k napájení zátěže sériovým poruchovým obloukem. Poté se zkouška opakuje ještě pro hodnotu jmenovitého proudu AFDD. Doba vypínání se opět měří třikrát a nesmí překročit hodnotu uvedenou v tabulce 5.2. [15]

5.4.3 Ověření správné činnosti v případě zapnutí do sériového poruchového oblouku

Spínače S1, S3 a AFDD jsou zapnuté. Odporovou zátěží je nastavena nejnižší možná hodnota proudu obloukem. Po vypnutí S1 je vypnut i spínač S2. Poté je S1 opět náhle zapnut a dojde k napájení AFDD a zátěže se sériovým poruchovým obloukem. Zkouška je provedena i pro hodnotu jmenovitého proudu. Doba vypínání se měří vždy třikrát a nesmí překročit hodnotu uvedenou v tabulce 5.2. [15]

5.5 Zkoušky paralelního poruchového oblouku

5.5.1 Ověření správné činnosti v případě paralelního oblouku s omezeným proudem

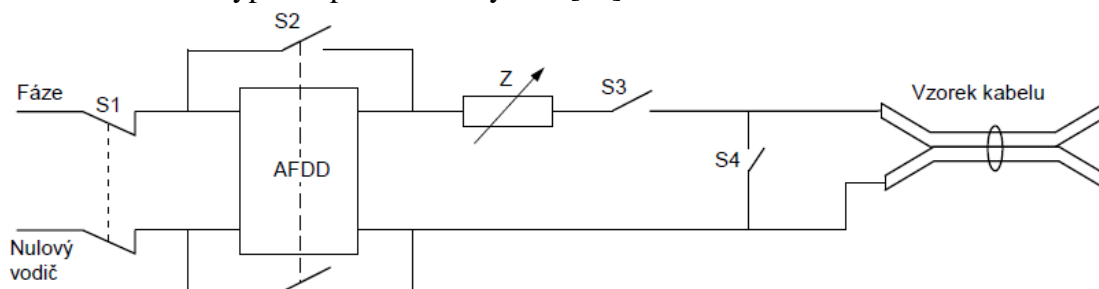
Zkušební proud oblouku ^a (efektivní hodnoty)	75 A	100 A	150 A	200 A	300 A	500 A
N^b	12	10	8	8	8	8

^a Tento zkušební proud je předpokládaný proud před hořením oblouku ve zkušebním obvodu.
^b N je počet půlperiod při jmenovitém kmitočtu.

Tabulka 5.3: Počet půlperiod, při kterém musí AFDD odstranit oblouk (převzato z [15])

Pokud během 0,5 s dojde k takovému počtu půlperiod hoření poruchového oblouku, jaký je uveden v tabulce 5.3, AFDD musí tento oblouk odstranit. Půlperioda v tomto případě zahrnuje všechny proudové dráhy, které se vyskytují v době 10 ms (pro přístroj dimenzovaný na 50 Hz). Během tohoto času nemůže proud protékat po celou dobu.

Před každou dobou průtoku a po ní nastane doba bez proudu nebo s proudem velmi sníženým (takový, který buď dosahuje 5 % amplitudy, nebo trvá 5 % půlperrody). Zkoušky se provádí při hodnotách poruchového proudu 75 A a 100 A. Zkouška je znázorněna na obrázku 5.2. Na začátku zkoušky jsou všechny 4 spínače v zapnuté poloze. Potom se vypnou S2, S3 a S4, zapnutý zůstane spínač S1 a AFDD. Poté je náhle zapnut S3 a AFDD musí vypnout podle tabulky 5.3. [15]



Obrázek 5.2: Zkouška paralelního poruchového oblouku (převzato z [15])

5.5.2 Ověření správné činnosti v případě poruchového oblouku proti zemi

Postup zkoušky je téměř totožný jako v předchozí části, ale tak, aby byl vytvořen oblouk proti zemi. Zkouška je prováděna pro hodnoty 5 A a 75 A. Pro 5 A musí AFDD vypnout podle tabulky 5.2, pro 75 A podle tabulky 5.3. [15]

6. TESTOVÁNÍ OBLOUKOVÉ OCHRANY

V posledních letech bylo o obloukové ochraně napsáno již několik bakalářských nebo diplomových prací. V podstatě všechny z nich se ale zabývaly testováním vypínání elektrického oblouku v laboratorních podmínkách. Cílem této práce však bylo vytvořit takové poruchy, ke kterým může dojít při reálném provozu elektroinstalace rodinného domu. V první části byla ověřena funkce AFDD za normálních podmínek, tedy že AFDD nebude falešně vybavovat například při provozu komutátorového motoru. V další části byly vytvořeny přípravky, které představovaly reálné poruchy v instalaci, například přerušeny fázový vodič nebo nedostatečně utažená svorka v zásuvce. Poté byl po úpravách využit již existující generátor oblouku. Při všech testech obloukové ochrany byly použity dostupné ochranné prostředky, například rukavice a ochranné štíty.

6.1 Popis obvodu

6.1.1 Rozváděč

Pro upevnění obloukové ochrany AFDD byl použit samostatně stojící oceloplechový rozváděč Schneider A-868. Na DIN liště je umístěn jistič Eaton B16 a oblouková ochrana Eaton AFDD+ 16/2/B/003. Dále se v rozváděči nachází ekvipotenciální svorka, na které se sbíhají všechny ochranné vodiče. Prívod je proveden kabelem CYSY 3x2,5. V rozváděči jsou použity vodiče CY 1x2,5. Jako vývod jsou použity dvě zásuvky do panelu, jedna je chráněna jističem B 16 a druhá ochranou AFDD+. Díky tomu je možné připojit reálný spotřebič do obvodu s AFDD i bez něj. Zapojení rozváděče je vidět na obrázku 6.1.



Obrázek 6.1: Zapojení rozváděče

6.1.2 Oblouková ochrana AFDD+

Pro testování byla použita oblouková ochrana od firmy Eaton s následujícími parametry.

Typ: AFDD-10/2/B/003

Délka: 80 mm

Výška: 73 mm

Šířka: 52,5 mm

Hmotnost: 277 g

Počet pólů: 2

Vypínací charakteristika: B

Jmenovitý proud: 10 A

Jmenovitý reziduální proud: 0,03 A

Typ citlivosti: AC (střídavý proud)

Jmenovité napětí: 230 V

Šířka (počet modulů): 3

Tento přístroj je kombinací jističe, proudového chrániče a jednoty AFD pro detekci elektrického oblouku.

Pro zapojení ochrany je definován vstup a výstup, které nelze zaměnit. Do AFDD se zapojuje fázový a nulový vodič.

6.1.3 Zátěž

Pro co možná nejlepší napodobení skutečných podmínek byly použity odporové zátěže. Ve většině případů to byla rychlovarná konvice o příkonu 2 kW, potom svářečka na plastové trubky o příkonu 800 W a pájka na měkké pájení o příkonu 200 W.

6.1.4 Ampérmetr

Aby bylo možné monitorovat průchod proudu obvodem a orientačně měřit jeho velikost, byl do obvodu zapojen analogový elektromagnetický ampérmetr Tracon ACAM96-10.

6.2 Funkce AFDD za normálních podmínek

Při provozu elektroinstalace vzniká v některých přístrojích přirozeně jiskření nebo elektrický oblouk a na tyto stavy oblouková ochrana nesmí reagovat. V této části bylo na několika případech ověřeno, zda ochrana falešně nevybaví.

Před zahájením samotných zkoušek byla úspěšně ověřena funkce vybavení ochrany pomocí testovacího tlačítka.

6.2.1 Provoz komutátorového motoru – elektrická úhlová bruska

Jako zátěž byla použita elektrická úhlová bruska Narex EBU 15-16 o příkonu 1 600 W, obvodem tekla proud 3,7 A. I přes patrné jiskření na komutátoru při rozběhu ochrana nevybavila.

6.2.2 Provoz vadného komutátorového motoru – vysavač

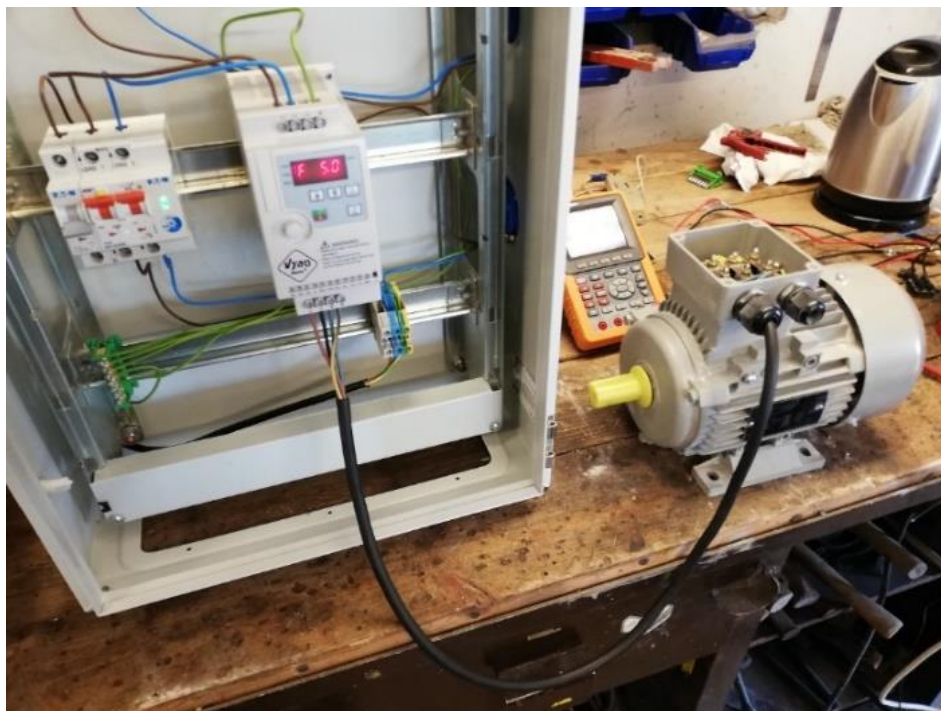
Při této zkoušce byl jako zátěž záměrně použit vadný komutátorový motor z vysavače s mezizávitovým zkratem v rotoru. Jeho jmenovitý příkon je 1 200 W. Již při rozběhu komutátor silně jiskřil tak, že plamen byl po celém obvodu komutátoru. Jiskření trvalo asi 5 vteřin až do destrukce motoru. Přesto ochrana nevybavila. V příloze je krátké video pořízené během zkoušky.



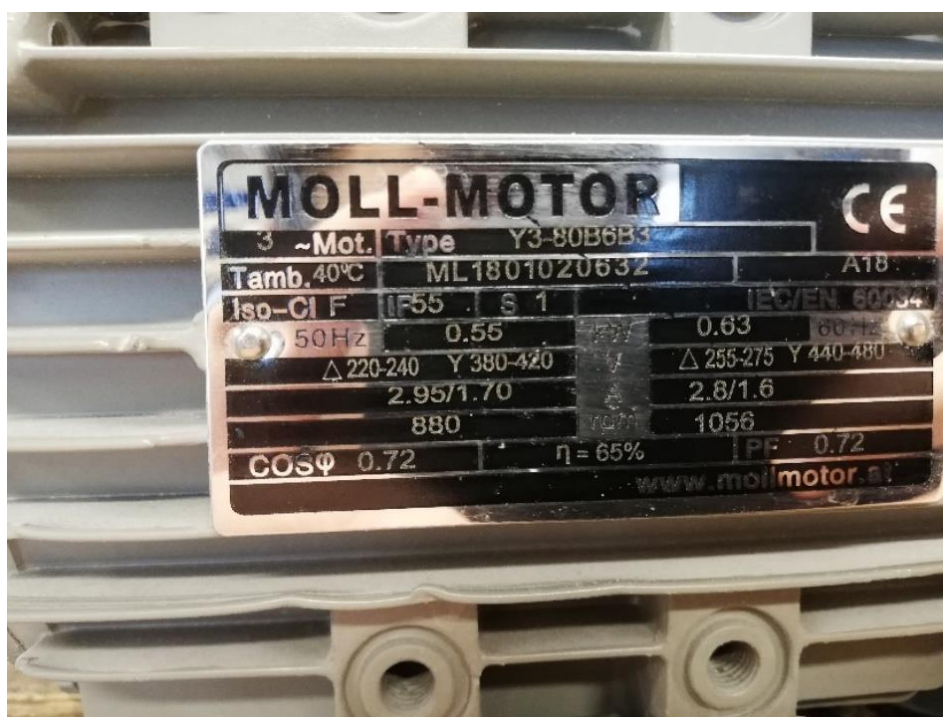
Obrázek 6.2: Jiskření komutátorového motoru se zkratem v rotoru

6.2.3 Provoz asynchronního motoru s frekvenčním měničem

Stále častěji se v domácích spotřebičích (pračky, myčky, sušičky) jako elektrický pohon používají asynchronní motory s frekvenčním měničem. Proud odebíraný ze sítě frekvenčním měničem má velké harmonické zkreslení, proto bylo ověřeno, jestli toto zkreslení neovlivní vybavení obloukové ochrany. Pro zkoušku byl použit frekvenční měnič Vybo electric A 550 – 4T0015 a třífázový elektromotor Moll motor 0,55 kW, 230/400 V, 2,95/1,70 A. Do frekvenčního měniče byl přiveden fázový a nulový vodič, na výstupu z něj bylo 3x230 V. Motor byl tedy zapojen do trojúhelníka a vinutí jedné fáze bylo napájeno 230 V. Provoz byl ověřen pro napájecí frekvenci 0-70 Hz. Ochrana během zkoušky nevybavila.



Obrázek 6.3: Zapojení AFDD s asynchronním motorem a frekvenčním měničem



Obrázek 6.4: Štítek asynchronního motoru

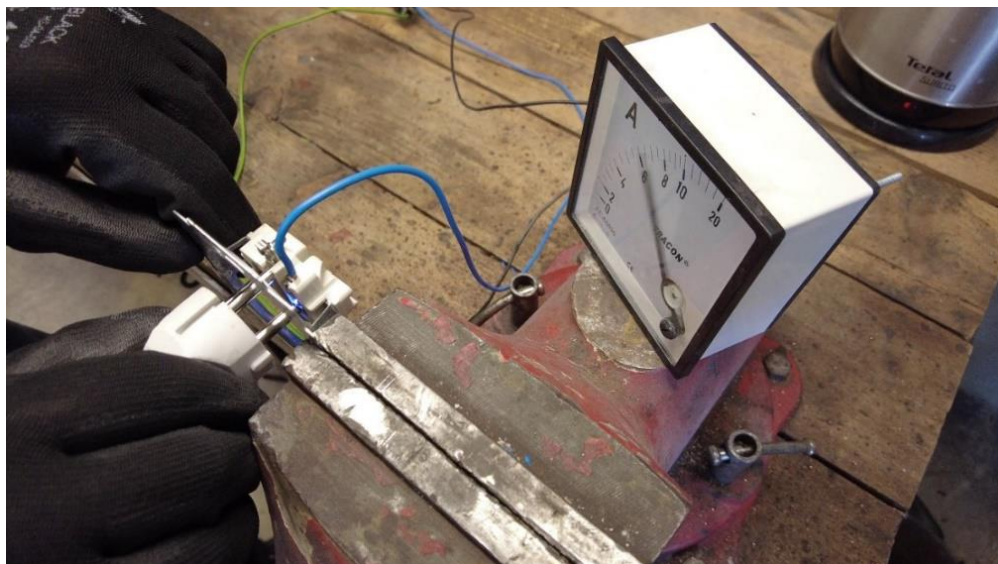
6.3 Testování přirozených poruchových stavů

Každá testovaná situace s danou poruchou a zátěží se vždy dvacetkrát zopakovala a zjišťovala se četnost vybavení ochrany. Výsledky zkoušek jsou uvedeny souhrnně

v tabulce 6.1. Na obrázku 4.5 je uvedena signalizace příčin vypnutí AFDD. Ve většině případů se po opětovném zapnutí objevila dvě žlutá bliknutí, která mají značit vypnutí sériového oblouku v odvodech se stmívačem. V ojedinělých náhodných případech se objevilo jedno bliknutí, které signalizuje vypnutí sériového oblouku. Při vzniku paralelního oblouku se objevil bílý terčik, protože zareagoval jistič.

6.3.1 Pomalé vytažení zástrčky ze zásuvky

Cílem této zkoušky bylo ověření, zda ochrana zafunguje při špatné manipulaci uživatele se zástrčkou (například povytažení za kabel). Objektivita zkoušky je diskutabilní, protože nebylo možné zajistit pokaždé stejný průběh vytažení zástrčky. Ochrana reagovala asi v polovině případů, avšak pouze u proudu 9 A. Video, na kterém ochrana vybaví, je v příloze.



Obrázek 6.5: Oblouk při pomalém vytahování zásuvky ze zástrčky

6.3.2 Pomalé překlápění vypínače na prodlužovacím kabelu

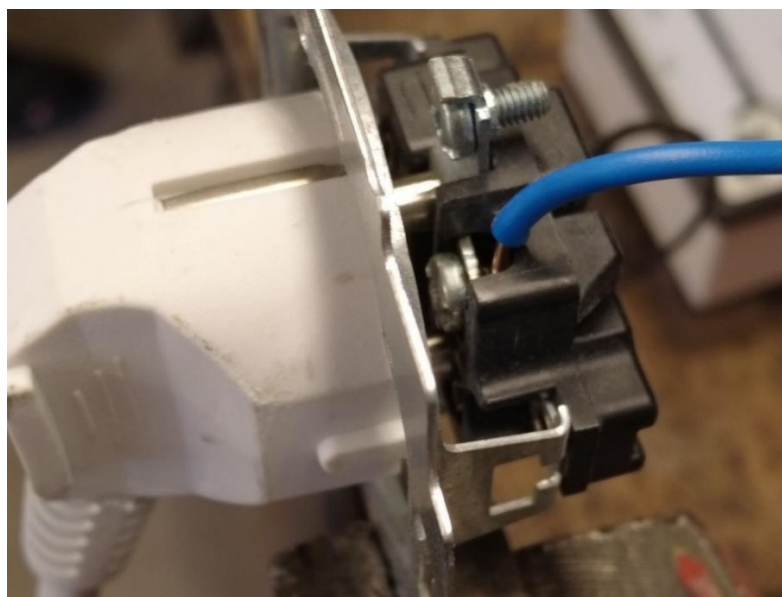
Prodlužovací kabely s vypínačem (zvláště ty, které neprošly certifikací, a přesto jsou v prodeji) představují značné riziko požáru, zejména pak ve spojení s jejich přetížením. Ochrana AFDD reagovala poměrně spolehlivě (16 z 20 případů), ale až při proudu 9 A. V příloze je video s úspěšným vybavením.



Obrázek 6.6: Pomalé překlápění vypínače na prodlužovacím kabelu

6.3.3 Nedostatečně utažená šroubová svorka v zásuvce

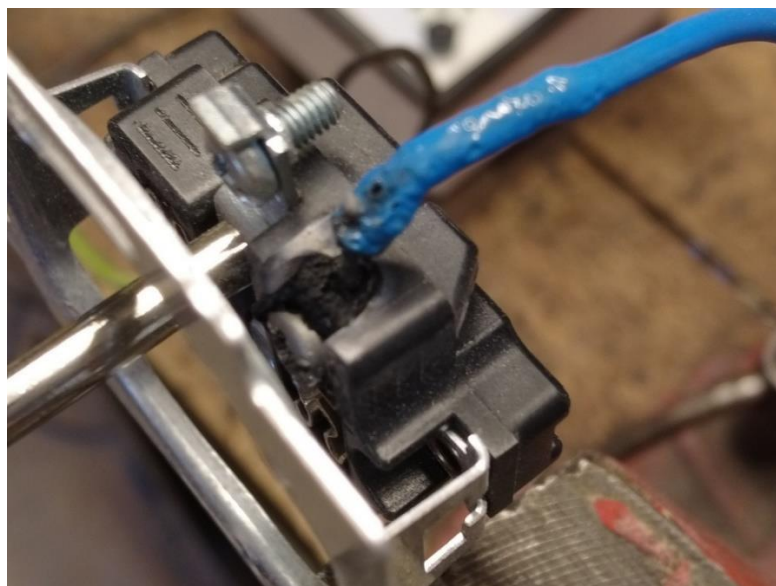
Potenciálním zdrojem požáru zejména v dřevostavbách může být nadměrné oteplení vzniklé na přechodovém odporu nedotažené svorky. Během testování bylo relativně obtížné vytvořit stabilní oblouk. Při proudu 2 A ochrana nereagovala, což se shoduje s normou ČSN EN 62606, ve které je uveden minimální proud pro vybavení AFDD 2,5 A. Při proudu 9 A ochrana reagovala v 9 z 20 případů. Během posledního testování ochrana nevybavila, protože nevznikl oblouk. Avšak při proudu 9 A bylo oteplení tak velké, že vedlo k roztavení izolace kabelu a destrukci zásuvky. Testování i destrukce zásuvky jsou na videích v příloze.



Obrázek 6.7: Nedostatečně utažená šroubová svorka



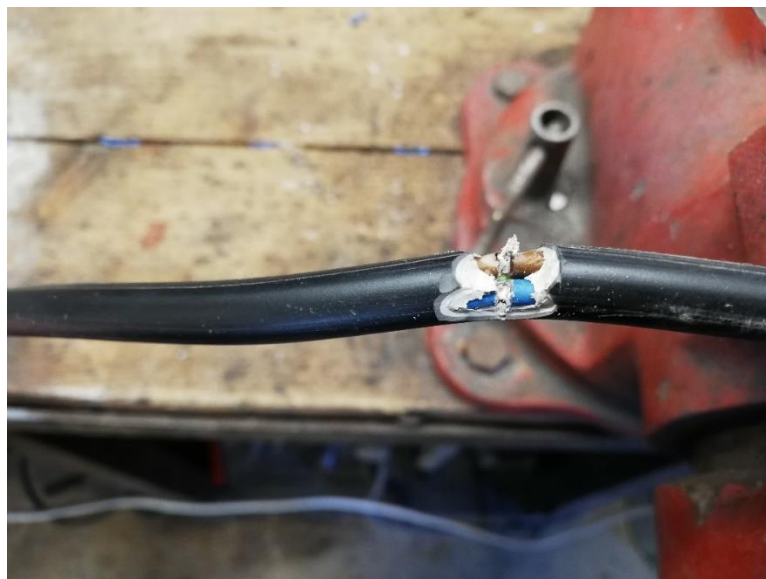
Obrázek 6.8: Vznik oblouku kvůli nedostatečně utažené šroubové svorce



Obrázek 6.9: Zásuvka po destrukci

6.3.4 Přerušný kabel CYKY (například hlodavcem)

Pokud je kabel veden v prostorech, kam se mohou dostat myši, nebo kuny, hrozí riziko jeho přerušení. Pokusně byl použit kabel CYKY 3 x 2,5 a naříznut tak, aby byl přerušen pouze fázový vodič. Jeho konce byly následně k sobě přibližovány. Přestože se mezi konci vodičů podařilo vytvořit stabilní oblouk a docházelo k silnému jiskření (video viz příloha), ochrana nikdy nevybavila. Při další zkoušce byl přerušen i nulový vodič. Při jiskření došlo zřejmě k ionizaci prostředí a následnému paralelnímu oblouku, který vedl k vybavení zkratové spouště kombinované ochrany.



Obrázek 6.10: Přerušný fázový i nulový vodič kabelu CYKY 2,5

6.3.5 Přerušný kabel CYSY

Předchozí test byl zopakován s kabelem CYSY 3 x 2,5 pro srovnání, jestli se lanko nebude chovat jinak než pevný vodič. Test měl však stejný výsledek jako předchozí s kabelem CYKY.



Obrázek 6.11: Přerušný kabel CYSY před a po testování, ochrana nevybavila

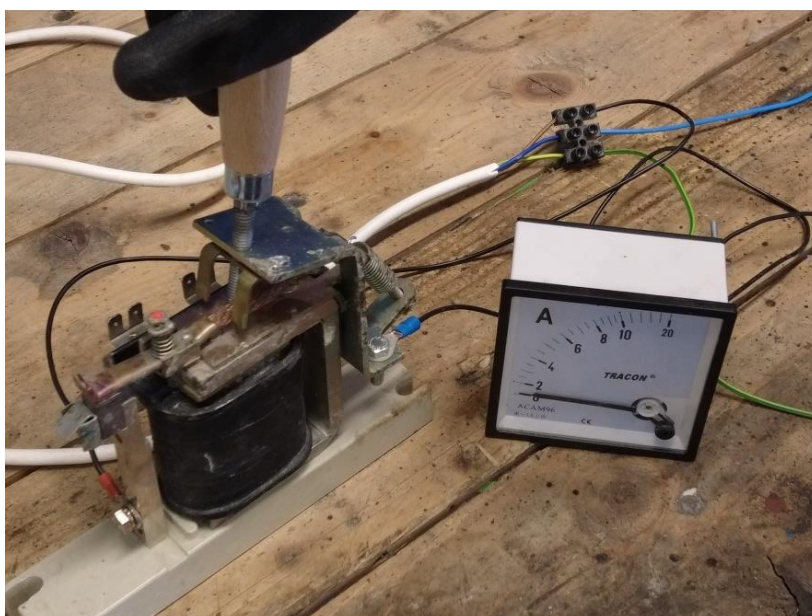
6.4 Testování poruchových stavů pomocí přípravků

6.4.1 Využití kontaktů stykače

Pro účel experimentu byl mechanicky upraven stykač výrobce Alfa Union typ SE 11, 750 V DC, 16 A. Těleso stykače bylo opatřeno vnitřním závitem M8 pro šroub s izolovanou rukojetí, pomocí kterého lze plynule přibližovat a oddalovat kontakty stykače.

Tento přípravek umožňoval i zapínání do poruchy, kdy bylo možné vzdálenost kontaktů předem nastavit pomocí multimetru ve funkci ohmmetru. Tím bylo ověřováno, že jsou kontakty rozpojeny, ale zároveň bylo možné nastavit vzdálenost kontaktů co nejmenší, aby se oblouk mohl objevit ihned po připojení napětí.

Oblouk vytvořený mezi kontakty stykače při proudech 4 A a 9 A ochrana AFDD spolehlivě vypínala. Bylo při tom také možné pozorovat, že při větším proudu se doba vybavení zkracuje, tak jak to udává norma (viz tabulka 5.2). Bylo možné testovat tři různé stavy, při kterých může zareagovat oblouková ochrana, a to vznik poruchy za provozu, připojení zátěže do poruchy a zapnutí ochrany do poruchy. Ochrana vypínala ve všech těchto případech (viz video v příloze).



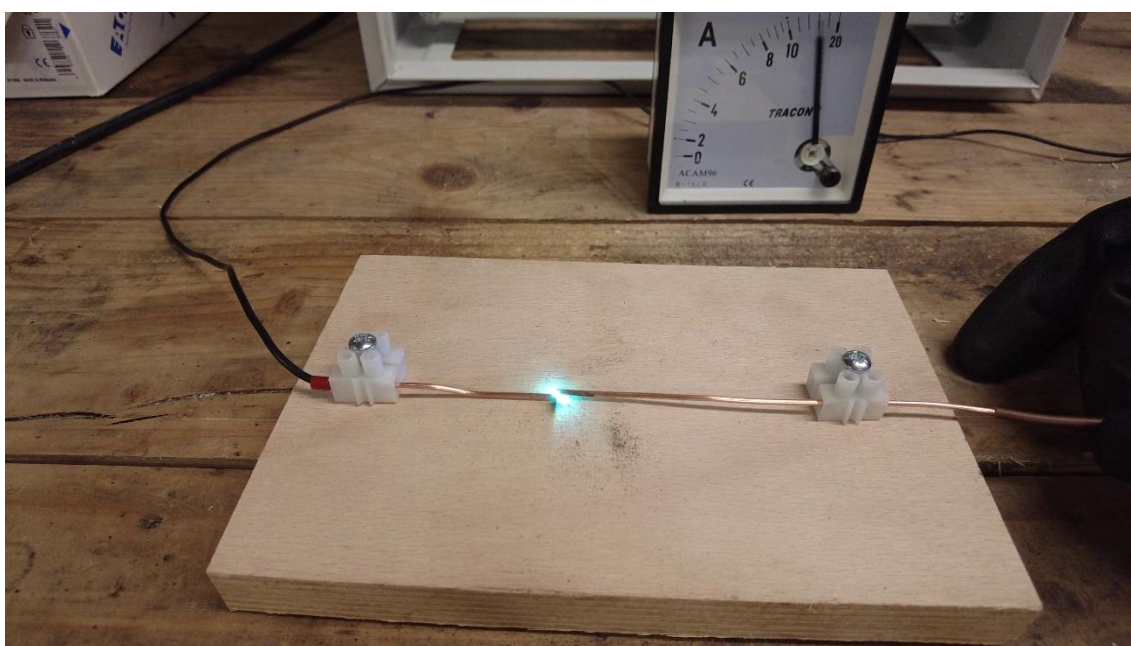
Obrázek 6.12: Stykač upravený pro vznik oblouku mezi jeho kontakty



Obrázek 6.13: Oblouk mezi kontakty stykače

6.4.2 Přerušný fázový vodič na izolační desce

Byl vyroben přípravek (viz obrázek 6.14), kde je na překližkové desce upevněn pomocí dvou lámacích svorek přerušný fázový vodič. Svorky jsou provedeny tak, aby se dalo jedním koncem vodiče pohybovat. Pro testování byl použit vodič CY 1x1,5 a CY 1x2,5. Snaha o vytvoření elektrického oblouku byla realizována jak čelním, tak bočním dotykem. Jelikož ochrana nereagovala, test se opakoval i při proudu zvýšeném na 13 A (jako zátěž byla použita zároveň rychlovarná konvice a svářečka na plasty). Přestože se podařilo vytvořit stabilní oblouk, ochrana nikdy nevybavila. Bylo ale patrné, že oblouk byl intenzivnější jak při zvýšení proudu, tak při zvětšení průřezu vodiče. Video jedné ze zkoušek je v příloze.



Obrázek 6.14: Oblouk mezi přerušným fázovým vodičem

6.4.3 Úprava a využití již vyrobeného generátoru oblouku

Dále byl pro testování AFDD použit generátor oblouku, jehož úpravy a zkoušky jsou popsány v následující kapitole.

6.5 Generátor oblouku

6.5.1 Mechanické úpravy generátoru

Původní přípravek vytvořil v rámci své bakalářské práce s názvem Návrh a realizace laboratorního přípravku pro ověření vlastností AFDD v roce 2017 Ing. Jakub Kaser. Tento generátor měl dvě uhlíkové elektrody o průměru 13 mm. Jedna pevná, druhá posuvná pomocí šroubu. Mezi nimi vznikal stabilní oblouk, který však ochrana nevypínala.

Proto byla na doporučení vedoucího této bakalářské práce Ing. Kasera pohyblivá uhlíková elektroda nahrazena dutou měděnou o průměru 10 mm. Aby bylo možné měděnou elektrodu v generátoru upevnit a zároveň případně vrátit zpět uhlíkovou, byly na generátoru provedeny následující úpravy.

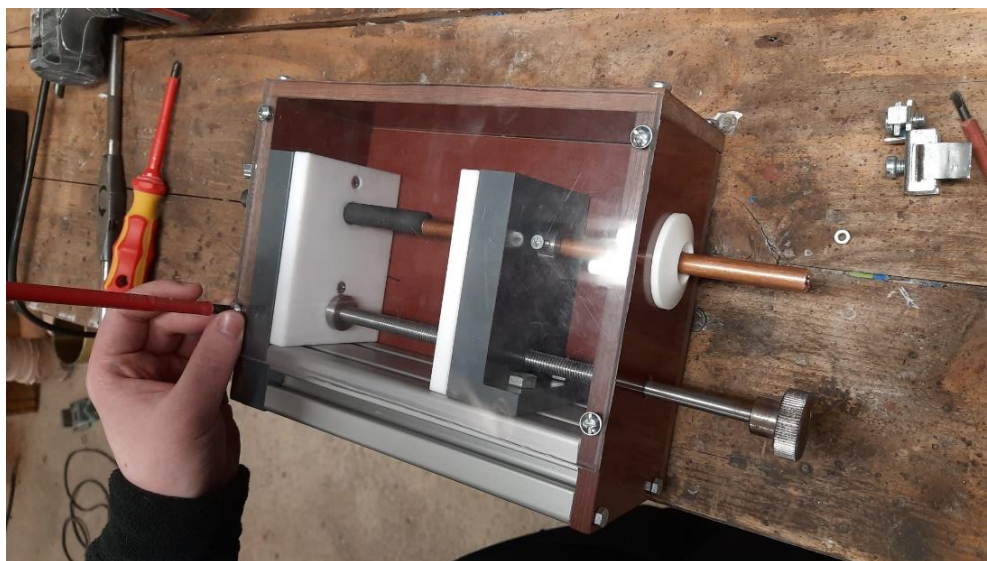
Ze šroubu M16x30 byla vysoustružena redukce, která drží pohyblivou elektrodu v unašeči. Redukce a šroub jsou na obrázku 6.16. Pro snadnou výměnu měděné elektrody byl do redukce vyvrtán otvor, ten byl opatřen vnitřním závitem M4 a elektroda byla následně zajištěna pomocí šroubu. Dále byl vyvločkován otvor v tělese přípravku pro vedení pohyblivé elektrody (viz obrázek 6.17).



Obrázek 6.15: Rozložený generátor oblouku před mechanickými úpravami



Obrázek 6.16: Vysoustružená redukce a původní šroub M16x30



Obrázek 6.17: Upravený generátor, vpravo je vidět vyvločkování

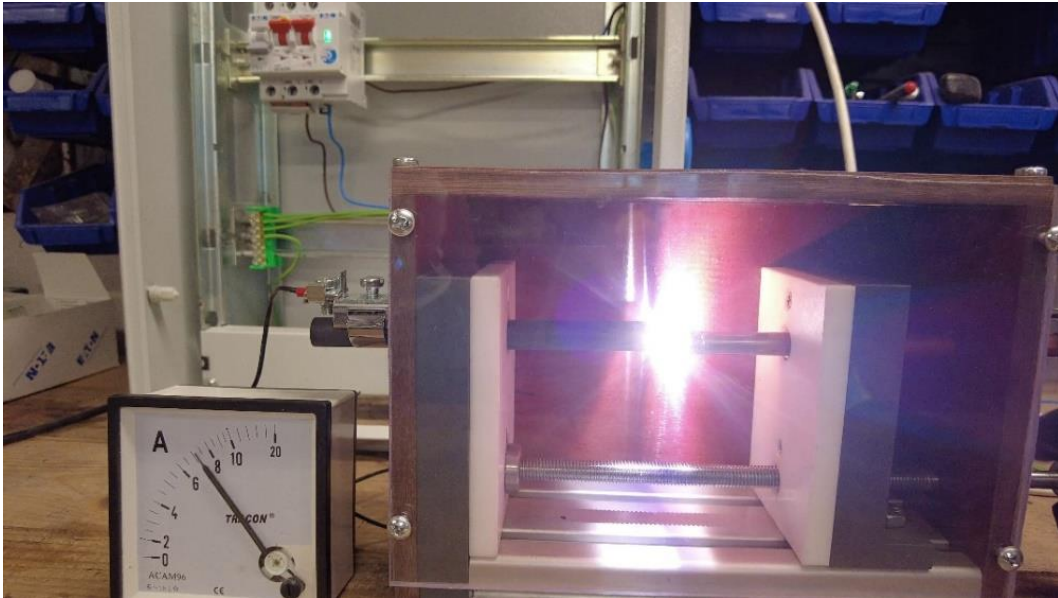
Další variantou pak bylo nahrazení pevné uhlíkové elektrody měděnou. Přípravek nyní pracoval se dvěma dutými měděnými elektrodami. Aby zůstala možnost práce s uhlíkovou elektrodou, byla na ni pro tento účel navlečena měděná trubka ($d = 13 \text{ mm}$, $D = 15 \text{ mm}$).

Vzhledem k neuspokojivé funkci generátoru byla nepohyblivá dutá elektroda opatřena měděným víčkem, které nahrazovalo elektrodu plnou.

V příloze jsou videa z testování generátoru pro všechny tři druhy elektrod.

6.5.2 Testování s uhlíkovou a měděnou elektrodou

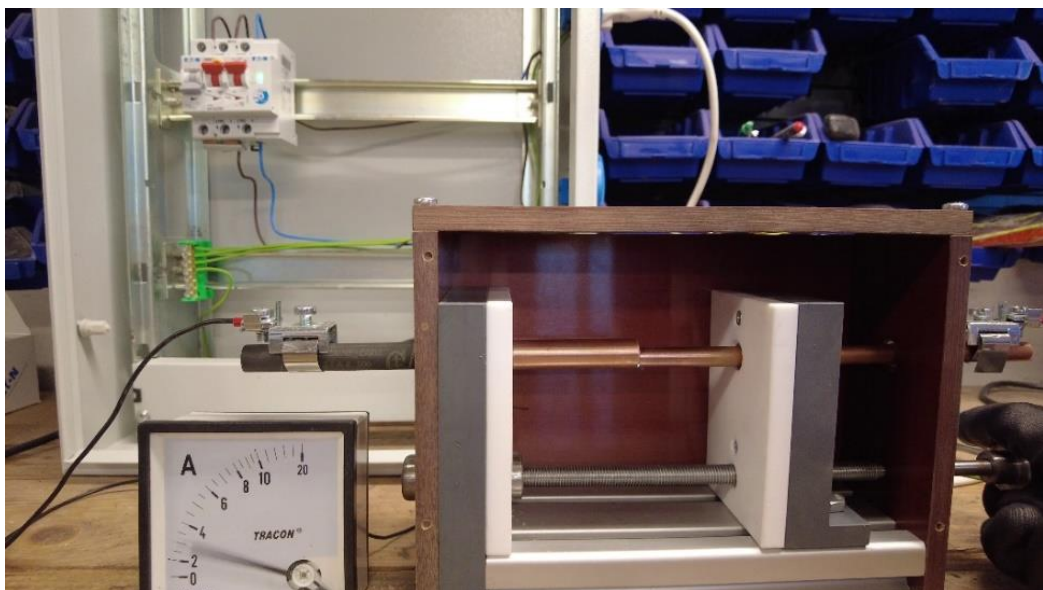
Generátor byl schopen vytvořit stabilní oblouk. Ochrana AFDD však vybavila pouze ve čtyřech z dvaceti případů. Chování ochrany se přitom jevilo jako náhodné, nebyly totiž nijak měněny parametry obvodu, ani nebylo manipulováno s generátorem. To může být způsobeno tím, že uvnitř uhlíkové elektrody se nachází stabilizační jádro. V případech, kdy nedošlo k vybavení ochrany a byla zvětšována vzdálenost elektrod, byl na ampérmetru patrný pokles proudu až na 4 A z původních 9 A těsně před uhasnutím oblouku (viz video v příloze). I při tomto měření byl testován vznik poruchy za provozu, připojení zátěže do poruchy a zapnutí ochrany do poruchy. Jak je vidět na videu v příloze, při snaze o zapnutí AFDD do poruchy nebylo možné ochranu zapnout.



Obrázek 6.18: Oblouk v generátoru s uhlíkovou a měděnou elektrodou

6.5.3 Testování se dvěma dutými měděnými elektrodami

Generátor vytvářel viditelný oblouk, který však nebyl stabilní. Četnost vybavení ochrany je těžké určit pro značnou obtížnost vytvoření stabilního oblouku, nebyla však velká.



Obrázek 6.19: Oblouk v generátoru se dvěma dutými měděnými elektrodami

6.5.4 Testování s jednou dutou a jednou plnou měděnou elektrodou

Oblouk vytvořený generátorem byl dobře viditelný a stabilní, ochrana reagovala okamžitě po vzniku oblouku ve všech případech.



Obrázek 6.20: Oblouk v generátoru s dutou a plnou měděnou elektrodou

6.6 Souhrn výsledků testování

Výsledky testování AFDD		
Druh zkoušky	Proud [A]	Četnost vybavení (z 20)
Přirozené poruchové stavy		
Pomalé vytažení zástrčky ze zásuvky	9	7
Překlápění vypínače prodlužovacího kabelu	9	16
Nedostatečně utažená šroubová svorka	2	0
Nedostatečně utažená šroubová svorka	9	9
Přerušený kabel CYKY	9	0
Přerušený kabel CYSY	9	0
Přípravky		
Využití kontaktů stykače	2	0
Využití kontaktů stykače	4	20
Využití kontaktů stykače	9	20
Přerušený vodič na izolační desce (CY 1,5)	9	0
Přerušený vodič na izolační desce (CY 2,5)	9	0
Přerušený vodič na izolační desce (CY 2,5)	13	0
Generátor oblouku - C-Cu	9	4
Generátor oblouku - Cu-Cu (obě duté)	9	6
Generátor oblouku - Cu-Cu (plná a dutá)	9	20

Tabulka 6.1: Souhrn výsledků testování

7. ZÁVĚR

V teoretické části této práce byl představen vznik výbojů v plynu a popsány různé příčiny požáru a způsoby, jak je možné se proti nim chránit. Dále byly popsány funkce jednotlivých ochranných a jisticích prvků, včetně obloukové ochrany. Na závěr byly shrnuty výhody a nevýhody AFDD a zmíněny některé zkoušky podle ČSN EN 62606.

Cílem praktické části bakalářské práce byl pokus o vytvoření reálných situací, které mohou vzniknout při provozu domovních elektroinstalací a ověřit, zda v těchto situacích vybaví oblouková ochrana AFDD.

V první části byla ověřena funkce AFDD za normálních podmínek, tedy bylo zjišťováno, zda ochrana falešně nevybaví při běžném provozu spotřebičů, ve kterých může vznikat slabé jiskření, například na komutátorech motorů. Při všech zkouškách bylo potvrzeno, že AFDD na jiskření nereaguje.

V další části proběhlo testování přirozených poruchových stavů, které mohou nastat například při přerušení kabelu hlodavci nebo špatnou obsluhou, případně stárnutím elektroinstalace nebo nedostatečným utažením svorky v zásuvce. Během těchto pokusů bylo často náročné vytvořit stabilní oblouk. Při těchto zkouškách bylo ověřeno, že vznik stabilního oblouku silně závisí na ploše kontaktů, případně na jejich znečištění. Při opakování měření bylo vytvoření oblouku náročnější vzhledem k možné přítomnosti oxidů kovů na kontaktech. Pokud byla plocha kontaktů malá (například přerušovaný vodič CY 2,5), ochrana nefungovala. I při poruchách, při kterých se podařilo vytvořit stabilní oblouk, ochrana většinou nereagovala spolehlivě. Výsledky jednotlivých měření mohou být částečně ovlivněny tím, že vstupem lidského faktoru není možné docílit rovnocenných podmínek pro jednotlivé zkoušky. Například během manipulace s kabelem CY při nedotaženém šroubu v zásuvce nebylo dobře možné ovlivnit ani rychlost ani četnost oddálení vodiče.

Nejvíce překvapující byla zřejmě skutečnost, že během testování přetrženého vodiče v kabelu CYKY 2,5 nebo CYSY 2,5 ochrana ani jednou nevybavila, přestože bylo několikrát dosaženo stabilního oblouku, který by mohl být schopen způsobit požár. Vzhledem k tomu, že by vypnutí takové poruchy mělo být hlavním úkolem obloukové ochrany a výrobci v propagačních materiálech uvádějí, že při této poruše by ochrana měla fungovat, dá se toto považovat za důležité zjištění.

Při testu nedotažené šroubové svorky zásuvky došlo i k tepelné destrukci zásuvky, při které ochrana nevybavila a při tom se lze domnívat, že pokud by se jednalo o instalaci v dřevostavbě, mohla by tato závada způsobit požár. Je ale pravdou, že při této poruše nedošlo ke stabilnímu hoření oblouku, příčinou destrukce byl tedy spíše přechodový odpor.

Jako poslední byly prováděny testy vzniku oblouku pomocí speciálně vyrobených přípravků. Byl to speciálně upravený stykač, přípravek s přerušeným vodičem CY a již existující generátor oblouku. Na něm byly provedeny takové mechanické úpravy,

aby bylo možné použít kromě uhlíkových i měděné elektrody. Při použití kontaktů stykače ochrana reagovala velmi spolehlivě, při použití generátoru oblouku se opět projevila závislost vzniku stabilního oblouku na oxidaci ploch měděných kontaktů. Dále byla ověřena závislost vlastností oblouku na materiálu použitých elektrod. Při použití uhlíkové elektrody byl oblouk stabilní a jasný, avšak schopnost vybavení ochrany byla nejmenší. To mohlo být způsobeno tím, že uhlíková elektroda obsahovala stabilizační jádro, díky kterému je průběh proudu oblouku více podobný běžnému sinusovému průběhu. Proto byly dále použity obě elektrody měděné, což i může lépe přiblížit reálnou situaci v instalaci. Při použití dutých elektrod byla plocha styku malá, proto nebyl oblouk stabilní. Naopak při použití jedné plné elektrody byly výsledky jednoznačně nejlepší.

V podmínkách, ve kterých bylo testování prováděno, by bylo velmi obtížné přesně měřit dobu vybavení AFDD. Například u přípravku se stykačem nebo generátoru oblouku ale bylo možné ověřit, že při větším proudu vybavovala ochrana AFDD za kratší čas.

V teoretické části bylo popsáno fungování obloukové ochrany v ideálním případě, tedy tak, jak je přístroj prezentován svými výrobci. Je otázkou, do jaké míry by mělo být umístění AFDD do elektrické instalace povinné. V USA tomu tak v některých případech je. V sousedním Německu tomu tak několik let bylo, ale od roku 2019 je instalace AFDD podle normy opět pouze doporučena. Při vývoji AFDD je velkou otázkou kompromis mezi spolehlivou detekcí elektrického oblouku a eliminací falešného vybavení ochrany. Kvůli velkému množství případů, při kterých ochrana vybavit nesmí, je těchto podmínek značné množství, a to může vést k určité nespolehlivosti ochrany, kterou je možno vidět při některých testováních v praktické části.

Z měření vyplývá, že ochrana je při výskytu stabilního oblouku funkční, avšak jsou případy, kdy není tak spolehlivá, jak uvádí výrobci. Norma ČSN EN 62606 udává minimální proud 2,5 A, při kterém je ochrana AFDD schopna zareagovat. Při testování bylo ověřeno, že při menších proudcích ochrana skutečně nikdy nereaguje. Tato skutečnost není výrobcem standardně v technických listech uváděna. I při menších proudcích během měření vznikaly poměrně velké jiskry, v katalogu výrobce OEZ je ale uvedeno, že při těchto menších proudcích je šance vzniku požáru minimální.

Další nevýhodou při případné instalaci je nutnost umístění obloukové ochrany na každý samostatný okruh zvlášť. To při současné maloobchodní ceně kolem 5 000,- Kč za kombinovanou ochranu značně navýší náklady na elektroinstalaci. Je potom otázkou, jestli se při stávající spolehlivosti AFDD investice do jejího pořízení vyplatí. Místem, kde by mohla oblouková ochrana přispět k větší bezpečnosti a ochraně před vznikem požáru, jsou bezesporu dřevostavby. Tam se jeví jejich použití jako účelné i za cenu vyšších vstupních nákladů.

Na obloukovou ochranu AFDD je možno pohlížet zejména jako na doplňkovou ochranu, která může zvýšit bezpečnost domovních instalací. Vzhledem k množství podmínek pro zamezení falešnému vypnutí ale není možné vypnutí sériového oblouku pomocí tohoto přístroje zaručit.

LITERATURA

- [1] VINARICKY, Eduard. *Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen*. 3. Auflage. Pforzheim, Deutschland: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 978-3-642-45426-4.
- [2] HAVELKA, Otto. *Elektrické přístroje*. Praha: SNTL – Státní nakladatelství technické literatury, 1985. ISBN 04-529-85.
- [3] *RESIDENTIAL ELECTRICAL SAFETY HOW TO ENSURE PROGRESS* [online]. In: . 2017, s. 56 [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: <https://www.europeanfiresafetyalliance.org/wp-content/uploads/2017/06/White-Paper-Residential-electrical-safety-How-to-ensure-progress.pdf>
- [4] *Brandschäden 2020* [online]. In: . Kiel: Institut für Schadenverhütung und Schadenforschung der öffentlichen Versicherer e.V., 2021, s. 2 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: https://www.ifs-ev.org/wp-content/uploads/2021/04/brandursachenstatistik_2020_seite.pdf
- [5] *STATISTICKÁ ROČENKA 2020 ČESKÁ REPUBLIKA* [online]. Hasičský záchranný sbor ČR, 2021, , 54 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/clanek/statisticke-rocenky-hasicskeho-zachranneho-sboru-cr.aspx>
- [6] MÜLLER, Peter. *DETEKTION VON STROMSCHWACHEN STÖRLICHTBÖGEN IN NIEDERSpannungSSCHALTANLAGEN* [online]. Stuttgart, 2014 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: https://www.ieh.uni-stuttgart.de/dokumente/dissertationen/Dissertation_Peter_Mueller.pdf. Disertační práce. Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart.
- [7] *Požáry způsobené elektrickým proudem v elektrických instalacích nízkého napětí* [online]. Eaton, 2016, 2016, , 28 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: https://www.eaton.com/content/dam/eaton/markets/residential/cz/fire-safety/afdd_whitepaper_195219_cz.pdf
- [8] Fehlerlichtbogen-Schutzeinrichtung (AFDD). *Zentralverband der Deutschen Elektro- und Informationstechnischen Handwerke ZVEH* [online]. [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: <https://www.zveh.de/maerkte-themen/technik-und-normung/fehlerlichtbogen-schutzeinrichtung.html>
- [9] Brände in elektroverteilungen. *Schadenprisma* [online]. 2018, 2018, (2), 6 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: https://www.schadenprisma.de/wp-content/uploads/sp_2018_2_2.pdf
- [10] Brandgefahren durch elektrische Haushaltsgeräte. *Schadenprisma* [online]. 2009, 2009, (3), 6 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: https://www.schadenprisma.de/wp-content/uploads/pdf/2009/sp_2009_3_1.pdf
- [11] *Aplikační příručka obloukové ochrany AFDD* [online]. OEZ, 2017, , 36 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z:

- https://www.oez.cz/files/editor_source/Dokumenty/Katalogy/Minia/mi07_2017_cz.pdf
- [12] *Modulové přístroje - technické údaje Jističe vedení* [online]. Hager, 2017, , 36 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: <http://www.ceha-kdc.cz/eshop/cat/15/15-02-092-21060.pdf>
- [13] *Proudové chrániče - Aplikační příručka* [online]. Eaton, 2017, , 108 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: http://eatonelektrotechnika.cz/__files/upload/content/proudove_chranice_2017.pdf
- [14] *AFDD+ Produktový katalog* [online]. Eaton, 2018, , 24 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: http://eatonelektrotechnika.cz/__files/upload/content/afdd-_produktovy_katalog.pdf
- [15] ČSN EN 62606. *Obecné požadavky na obloukové ochrany*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [16] AFDD Brandschutzschalter. *Schadenprisma* [online]. 2020, 2020(2), 6 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: https://www.schadenprisma.de/wp-content/uploads/sp_2020_2_7.pdf
- [17] *5SM6 AFD Unit Technology Primer* [online]. In: . Regensburg: Siemens, 2012, s. 52 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/288/109482288/att_866515/v1/5SM6_AFDUnit_primer_EN_201601250858227805.pdf
- [18] MARTEL, Jean-Mary. *Series arc faults in low-voltage AC electrical installations* [online]. Ilmenau, 2018 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: https://www.db-thueringen.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbt_derivate_00040316/ilm1-2017000635.pdf. Universitätsverlag Ilmenau.
- [19] ČSN EN 60909-0 ED.2. *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [20] *AFDD+ průvodce k odstraňování závad*. Eaton [online]. Morges, Switzerland, 2018 [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/electrical-circuit-protection/eaton-troubleshootingAFDD-guide-BR003016CZ-cs-cz.pdf>
- [21] *Chránič proudový kombinovaný 2p B 10A 30mA typ AC,oblouk.ochr. AFDD*. Sonepar [online]. [cit. 2022-05-29]. Dostupné z: <https://www.sonepar.cz/chranic-proudovy-kombinovany-2p-b-10a-30ma-typ-acobloukochr-afdd>
- [22] *Pojistkové vložky s charakteristikou aM*. BVSarts [online]. [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: http://lmc.bvsarts.com/oldstuff/zpravodaj/pojvl_am.htm

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

AFDD	Arc fault detection device (oblouková ochrana)
AFCI	Arc fault circuit interrupter (oblouková ochrana v USA)
MCB	Miniature circuit breaker (instalační jistič)
RCD	Residual current device (proudový chránič)
RSSI	Received Signal Strength Indication (ukazatel síly přijatého signálu)
DIN	Deutsches Institut für Normung (Německý institut pro normy a standardizace)
CY	vodič s pevným kulatým měděným jádrem a PVC izolací
CYKY	kabel s pevným kulatým měděným jádrem a PVC izolací
CYSY	kabel s ohebným měděným jádrem a PVC izolací
AC	proudový chránič určený pro střídavé reziduální proudy

Symboly:

U	napětí	(V)
I	proud	(A)
P	výkon	(W)
t	čas	(s)
f	frekvence	(Hz)
p	tlak	(Pa)
T	termodynamická teplota	(K)
ϑ	oteplení	(K)
l	délka	(m)
d	průměr	(mm)
m	hmotnost	(kg)

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A: Na přiloženém CD jsou videozáznamy z provedených testů obloukové ochrany AFDD.