



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

BEZPEČNOSTNÍ SYSTÉM DETEKCE ZAŘÍZENÍ PŘIPOJENÝCH DO ELEKTRICKÉ SÍTĚ

SECURITY SYSTEM FOR DETECTING DEVICES CONNECTED TO THE ELECTRICAL NETWORK

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radim Macho

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. et Ing. Petr Musil

BRNO 2023

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

Student: Radim Macho

ID: 221666

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Bezpečnostní systém detekce zařízení připojených do elektrické sítě

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem této práce je návrh systému detekce zařízení připojených do elektrické sítě s ohledem na jejich potenciální hrozbu pro provoz kritických systémů. Vyhodnocení bude prováděno pomocí detekce změny provozních parametrů (přijímané úrovně signálu, odstupů signál/šum, rušení vysílaného do sítě, změnou impedance) snímaných pomocí PLC (Powerline Communication) nebo BPL (Broadband over Powerline) modemu.

Systém bude realizován vytvořením datasetu se skupinou určených událostí - např. připojení zařízení do sítě, sepnutí zařízení, odpojení zařízení ze sítě. Řešitel této práce na základě znalosti těchto událostí definuje principy detekce jednotlivých stavů vhodnou metodou/algoritmem.

V teoretické části práce prostudujte vliv zařízení připojených do elektrické sítě a jejich dopad na provoz komunikace PLC/BPL modemy.

V praktické části realizujte měření na elektrické síti, kde vytvoříte řadu událostí. Tyto události budou zaznamenány změnou provozních parametrů PLC modemů a následně budou vytvořeny principy jejich detekce.

Výstupem bakalářské práce je představení metod detekce vybraných zařízení a jejich událostí - např. připojení/odpojení zařízení z elektrické sítě.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 26.5.2023

Vedoucí práce: Ing. et Ing. Petr Musil

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
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 semestrální práce definuje základní principy detekce zařízení připojených do elektrické sítě s ohledem na jejich potenciální hrozbu pro provoz kritických systémů. Detekce bude prováděna pomocí dat získaných z PLC modemů připojených na monitorovanou elektrickou síť. Data budou následně zpracovávána pomocí kódu na základě strojového učení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektrická síť, elektrický signál, frekvenční spektrum šumu, modulace, impedanční přizpůsobení, power-line communication, MIMO, šum, vyšší harmonické, strojové učení

ABSTRACT

This semester thesis defines the basic principles of detection of devices connected to the power grid with regard to their potential threat to the operation of critical systems. The detection will be performed using data obtained from PLC modems connected to the monitored electrical network. The data will then be processed using machine learning-based code.

KEYWORDS

Electrical network, electrical signal, frequency spectrum of the noise, modulation, impedance matching, power-line communication, MIMO, noise, higher harmonics, machine learning

MACHO, Radim. *Bezpečnostní systém detekce zařízení připojených do elektrické sítě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2023, 87 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. et Ing. Petr Musil,

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Radim Macho
VUT ID autora: 221666
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2022/23
Téma závěrečné práce: Bezpečnostní systém detekce zařízení připojených do elektrické sítě

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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. et Ing. Petru Musilovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci a panu doktorovi Jiřímu Dřínovskému za pomoc se specializovaným měřením.

Obsah

Úvod	21
1 Teoretická část studentské práce	23
1.1 Elektrická síť	23
1.1.1 Názvosloví	23
1.1.2 Typy sítí	24
1.2 Provozní parametry	26
1.2.1 Elektrický signál	26
1.2.2 Impedance	31
1.3 Impedanční přizpůsobení	33
1.3.1 Důsledky impedančního nepřizpůsobení	33
1.4 Power-line communication	34
1.5 MIMO v technologii PLC	35
1.6 Vyšší harmonické	36
1.6.1 Zdroje rušení vyšších harmonických	36
1.6.2 Vliv vyšších harmonických na elektrickou síť	37
1.7 Strojové učení	40
1.7.1 Typy strojového učení	40
1.7.2 Metody strojového učení s učitelem	40
1.7.3 Práce s daty pro strojové učení	44
1.7.4 Křížová validace	45
1.7.5 Boosting	45
2 Výsledky studentské práce	47
2.1 Získávání hodnot frekvenčního spektra šumu	47
2.1.1 Ověření přesnosti měření pomocí PLC modemů	47
2.2 Měření pomocí PLC modemů	55
2.2.1 Vybavení potřebné pro uskutečnění měření	55
2.2.2 Postup měření	55
2.3 Měření šumové charakteristiky v průběhu dne	57
2.4 Topologie měření	58
2.5 Vliv útlumu rušení oddělovacím transformátorem	61
2.6 Porovnání šumové charakteristiky zásuvek	65
2.7 Rozpoznávání neznámých zařízení pomocí strojového učení	69
2.7.1 Volba parametrů strojového učení	69
2.7.2 Detekce neznámých zařízení připojených do sítě	72
2.7.3 Detekce užívání počítače	75

Závěr	77
Literatura	79
Seznam symbolů a zkratk	81
Seznam příloh	83
A Tabulka měřených datasetů použitých pro strojové učení	85
B Matice záměn výsledků detekce zařízení strojovým učním	87

Seznam obrázků

1.1	Zapojení vodičů zásuvky	24
1.2	Princip zapojení elektrických rozvodných sítí	26
1.3	Znázornění analogového a digitálního signálu	27
1.4	Princip převodu analogového signálu na digitální signál	27
1.5	Princip převodu digitálního signálu na analogový signál	28
1.6	Vstupní modulační a nosný signál	28
1.7	Amplitudově modulovaný signál	29
1.8	Frekvenčně modulovaný signál	29
1.9	Fázově modulovaný signál	29
1.10	Blokové schéma přenosové funkce.	30
1.11	Princip vlivu přenosové funkce na úroveň signálu ve frekvenčním spektru.	31
1.12	Znázornění fázoru	32
1.13	Znázornění principu MIMO pro PLC	35
1.14	Znázornění neuronové sítě	41
1.15	Znázornění principu fungování rozhodovacího stromu	42
1.16	Princip rozdělení dat v prostoru metodou podpůrných vektorů	43
2.1	Blokové schéma měření pomocí spektrálního analyzátoru a pomocí PLC modemů	47
2.2	Porovnání frekvenční charakteristiky šumu pro měření bez zapnutého rušivého elementu	48
2.3	Porovnání frekvenční charakteristiky šumu pro měření se zapnutým rušivým elementem	49
2.4	Porovnání frekvenční charakteristiky šumu pro měření se zapojeným zdrojem zajištěného napájení	49
2.5	Porovnání impulzních změn úrovně šumu pro různé frekvence	50
2.6	Porovnání různých fyzických rozložení prodlužovacích kabelů	52
2.7	Porovnání černého a zeleného prodlužovacího kabelu	53
2.8	Výsledky měření vektorovým analyzátozem spojení dvou 50 m dlouhých prodlužovacích kabelů	54
2.9	Porovnání výsledků měřených vektorovým analyzátozem prodlužovacího kabelu v zapnutém a vypnutém stavu	54
2.10	Spektrogram výsledků měření šumové charakteristiky sítě v průběhu dne	58
2.11	Topologie sítě měření šumové charakteristiky v průběhu dne	59
2.12	Topologie měření útlumu oddělovacího transformátoru	59
2.13	Topologie porovnání šumové charakteristiky zásuvek	60
2.14	Mapa zásuvek laboratoře	60

2.15	Topologie kontrolované sítě pro měření hlavního datasetu	61
2.16	Topologie detekce užívání počítače	61
2.17	Porovnání přenosových funkcí pro měření č. 1 a č. 2	63
2.18	Porovnání přenosových funkcí pro měření č. 3 a č. 4	63
2.19	Porovnání přenosových funkcí pro měření č. 5 a č. 6	64
2.20	Porovnání přenosových funkcí pro měření č. 7 a č. 8	64
2.21	Porovnání přenosových funkcí pro měření č. 9 a č. 10	65
2.22	Porovnání frekvenční charakteristiky šumu zásuvek pro měření č. 0 a č. 1	66
2.23	Porovnání frekvenční charakteristiky šumu zásuvek pro měření č. 2 a č. 3	67
2.24	Porovnání frekvenční charakteristiky šumu zásuvek pro měření č. 6 a č. 7	67
2.25	Porovnání frekvenční charakteristiky šumu zásuvek pro měření č. 8 a č. 9	68
2.26	Porovnání frekvenční charakteristiky šumu zásuvek pro měření č. 10 a č. 11	68
2.27	Frekvenční charakteristika šumu pro měření č. 13	69
2.28	Závislost úspěšnosti detekce zařízení na počtu intervalů	70
2.29	Křivky učení pro různé nastavení parametrů funkce CatBoost	71
2.30	Frekvenční charakteristika šumu zařízení bez kombinace datasetů měření	73
B.1	Maticе záměn výsledků detekce užívání počítače	87

Seznam tabulek

1.1	Veličiny související s impedancí.	32
1.2	Impedance a admitance pro R, L, C prvky.	33
2.1	Číselné hodnoty skokových impulzů.	51
A.1	Dataset stavů využití počítače.	85

Seznam výpisů

2.1	Definice použitých parametrů CatBoost.	72
-----	--	----

Úvod

Tato semestrální práce se věnuje možnosti využití Powerline Communication modemů pro detekci zařízení připojených do elektrické sítě. Každé zařízení připojené do elektrické sítě tuto síť určitým způsobem ovlivňuje a potencionálně tvoří hrozbu pro fungování zbytku elektrické sítě. Proto je tato práce zaměřená na návrh algoritmů a principů detekce připojení zařízení do elektrické sítě.

Powerline Communication (PLC) modemy se běžně využívají pro přenos dat pomocí elektrického vedení. Existují však PLC modemy, které umožňují mimo přenosu dat, také měření elektrických parametrů připojené sítě, jako například impedance, odstup signál/šum, rušení, nebo přijímané úrovně signálu.

Teoretická část semestrální práce je zaměřená na popsání parametrů, které mohou sloužit k detekci připojených zařízení a popsání potenciálních hrozeb, které tyto zařízení připojením tvoří.

V praktické části jsou navrženy topologie pro ověření přesnosti měření dat pomocí PLC modemů, ověření vlivu změny frekvenční charakteristiky šumu v průběhu času, vlivu oddělovacího transformátoru na útlum rušení v oddělené síti a tři topologie pro vytvoření datasetu měřených zařízení pro detekci pomocí strojového učení. Dataset zařízení je vytvořen na základě vlastnosti popsanych v teoretické části práce. Frekvenční charakteristika šumu zařízení je měřena pomocí PLC modemů na třech podobných topologiích. Naměřená data jsou statisticky zpracována a použita pro trénink modelu strojového učení, který bude následně detekovat neznámá data frekvenční charakteristiky šumu zařízení připojených do sítě.

V práci je kladen důraz na pochopení potenciálních hrozeb připojených zařízení do elektrické sítě. Dále na problematiku možností detekce jednotlivých zařízení s ohledem na přesnost vzájemného rozeznání jednotlivých zařízení pomocí strojového učení.

1 Teoretická část studentské práce

1.1 Elektrická síť

Elektrická síť v České republice je tvořena třemi fázovými vodiči (L1, L2, L3), kde každý vodič nese sinusový průběh napětí, který je vždy posunut o 120° . Ve standardních jednofázových zásuvkách, které jsou používány pro napájení běžných elektrických zařízení jako jsou domácí spotřebiče, malá elektronika a další, nalezneme jednu ze třech fází a ochranné vodiče. V České republice je nejvíce používána zásuvka typu E, její znázornění je na obrázku 1.1. V této zásuvce nalezneme střídavé napětí o kmitočtu 50 Hz a jmenovitém napětí 230 V.

1.1.1 Názvosloví

Elektrická síť je označení pro soubor jednotlivých vzájemně propojených elektrických stanic. Dále toto označení zahrnuje venkovní a kabelová vedení, která jsou určena pro přenos a rozvod elektrické energie.

Elektrický zdroj označuje zařízení, které dodává elektrickou energii do elektrické sítě.

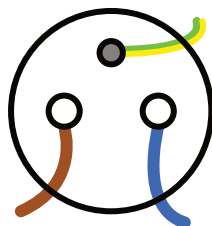
Elektrický spotřebič je označení pro zařízení, které využívá elektrickou energii, získanou z elektrické sítě, a přeměňuje ji na jinou energii.

Jednotlivé vodiče v elektrické síti jsou označeny názvy:

- Fázový vodič L je takový vodič, který při standardním provozu je pod napětím a je schopen přenášet a rozvádět elektrickou energii. Tento vodič nikdy není použit zároveň jako ochranný vodič ani střední vodič.
- Střední, pracovní nebo také nulový vodič N slouží pro vedení zpětných proudů, nejčastěji u jednofázových spotřebičů.
- Ochranný vodič PE a PEN slouží jako ochrana před nebezpečným dotykovým napětím, toto napětí vzniká při poruše na neživé části připojeného zařízení.

Standardní značení vodičů je pro fázový vodič černá nebo hnědá barva izolace vodiče, pracovní vodič se značí modrou barvou a ochranný vodič kombinací zelené a žluté. V zásuvce typu E jsou vodiče připojeny standardně tak, že fázový vodič se připojuje na levou zdířku, pracovní vodič na pravou zdířku a ochranný vodič na horní kolík, jak je znázorněno na obrázku 1.1 [1] [2].

Dále můžeme definovat živou část elektrických zařízení, která je za provozu elektrického zařízení pod napětím, standardně nezahrnuje vodič PEN. A také neživou část, která je vodivá část elektrických zařízení, na které však při standardním provozu není napětí, napětí se zde může objevit při poruše [1] [2].



Obr. 1.1: Zapojení vodičů zásuvky typu E.

1.1.2 Typy sítí

Rozvodné sítě jsou označovány dvěma písmeny, kde první písmeno označuje vztah k uzlu zdroje. I značí izolovaný z francouzského „isolé“. T značí uzemněný z francouzského „terré“.

Druhé písmeno označuje způsob ochrany neživé části. T, stejně jako u prvního písmena, spojení se zemí ochranným vodičem. N značí spojení s uzlem zdroje pomocí ochranného vodiče, název z francouzského „neutré“, významem neutrální nebo také nulový.

V praxi se používají kombinace TT, IT a TN [1] [2].

Sítě TT

Jeden bod sítě je přímo uzemněný, neživé části připojených zařízení jsou přímo spojeny se zemí nezávisle na pracovním uzemnění sítě, znázorněno na obrázku 1.2.

Výhoda sítí TT je jednoduchý návrh a instalace. Ochrana je zajištěna použitím proudových chráničů, které slouží zároveň jako ochrana proti požáru.

Nevýhoda sítí TT je velký svodový proud. Svodový (unikající) proud je proud protékající mezi živou síťovou částí a ochranným vodičem. Je daný především stavem izolace vodičů. Další nevýhodou je náchylnost na porušení izolace, což vede k přerušení dodávky energie.

Sítě typu TT se nejvíce využívají v západní části Evropy, především Francie a Španělsko. V Belgii, Itálii a Německu je tento typ kombinován se sítěmi typu TN [1] [2] [3].

Sítě IT

Všechny části sítě jsou izolovány od země, neživé části elektrických zařízení jsou uzemněny pomocí ochranného vodiče, znázorněno na obrázku 1.2.

Tento typ sítě je nákladnější na provoz, jelikož je potřeba profesionála na provoz a údržbu, a dále je potřeba zajistit ochranu nulového vodiče.

Tento typ sítě je nejvíce využíván v prostředích, kde je hlavním požadavkem udržení konstantního napájení elektrických zařízení, například nemocnice, jednotka intenzivní péče nebo operační sály. V takovýchto prostředích může ztráta napájení

znamenat ohrožení pacienta na životě. Další místo využití tohoto typu sítě jsou průmyslové podniky, například sklárny a hutnictví, kde ztráta napájení znamená velké ekonomické ztráty [1] [2].

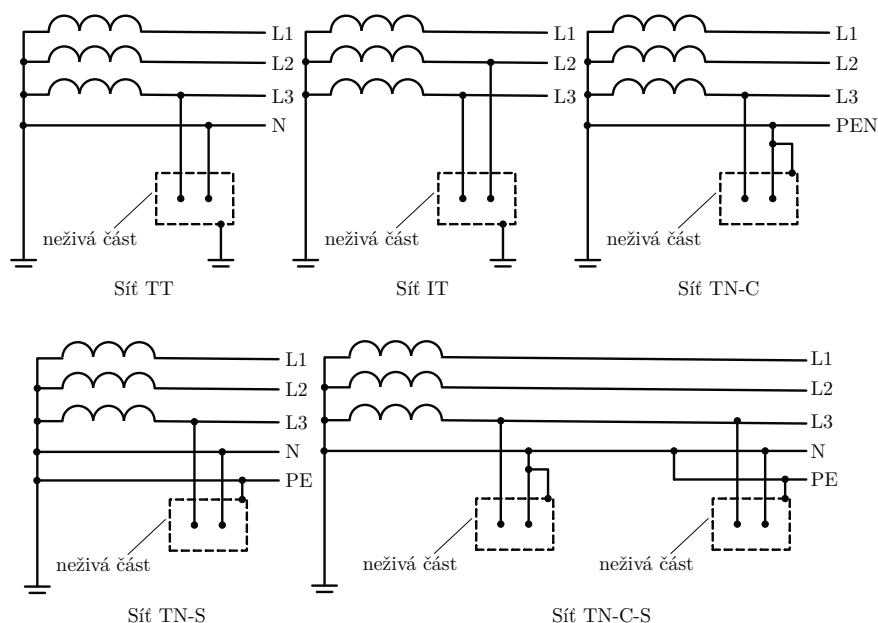
Sítě TN

Sítě TN se vyznačují spojením neživých částí s uzemněným bodem sítě. K tomuto propojení je využíván ochranný vodič PEN.

Sítě TN se používají s doplňkovými písmeny, které specifikují provedení sítě a tím se dále sítě TN dělí:

- TN-C, kde C (z francouzského combiné) znamená kombinovaný. V této síti je ochranný a střední (pracovní) vodič sdružen do jednoho vodiče PEN. Hlavní výhodou tohoto zapojení jsou úspory na kabelovém vedení. Vznikne-li závada na vodiči PEN, je snadno zjistitelná tím, že obvod není nadále schopný provozu. Závada přerušení vodiče PEN však může způsobit vznik nebezpečného dotykového napětí na neživé části elektrického zařízení. Dalšími nevýhodami tohoto zapojení je nemožnost použití proudových chráničů, rušení citlivých sdělovacích zařízení při průchodu zpětných proudů v případě jednofázových spotřebičů.
- TN-S, kde S (z francouzského séparé) značí rozdělení ochranného vodiče PE a středního vodiče N na dva samostatné vodiče. Tento typ sítě řeší nedostatky TN-C zapojení, rozdělením PEN vodiče se zamezí rušivým vlivům zpětných proudů u jednofázových spotřebičů. Dále lze použít proudové chrániče. Nevýhoda, která vzniká rozdělením PEN vodiče na dva samostatné, je neschopnost zjistit přerušení ochranného vodiče PE a tedy nefunkčnost ochrany před nebezpečným dotykovým napětím na neživých částech. Přerušení ochranného vodiče lze zjistit pouze přímou kontrolou, a proto u těchto sítí je potřeba provádět pravidelné revize sítě.
- TN-C-S je kombinací sítě TN-C a TN-S. Provedení je takové, že v určitém bodě se vodič PEN rozdělí na PE a N a již nesmí být nikde znova spojen. Toto zapojení má výhodu, že část sítě může fungovat na TN-C zapojení a jiná část podle potřeby může fungovat na TN-S zapojení.

Sítě typu TN jsou nejrozšířenější typ elektrických sítí. Zapojení všech variant TN sítí je znázorněno na obrázku 1.2 [1] [2].



Obr. 1.2: Princip zapojení sítí TT, IT, TN-C, TN-S a TN-C-S.

1.2 Provozní parametry

1.2.1 Elektrický signál

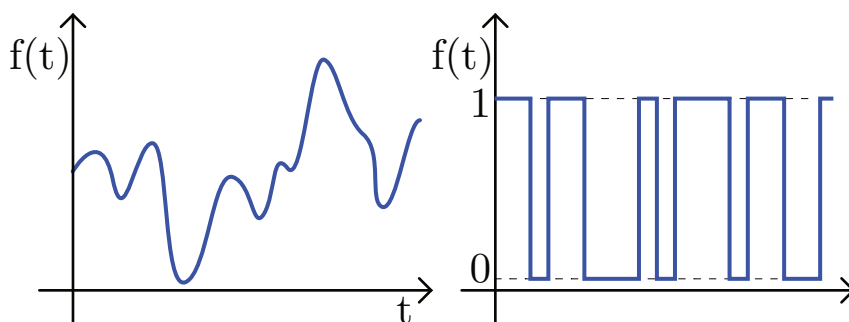
Elektrický signál je označení pro množství změny elektrické energie v průběhu času, pomocí které se předává informace ze zdroje do místa určení. Elektrické veličiny pro přenos signálu je například rozdíl potenciálu signálu, intenzita elektrického proudu. Další možností je modulace signálu podle amplitudy, frekvence nebo fáze [4].

Signály lze rozdělit do dvou hlavních skupin, na analogové a digitální.

Analogový signál je definovaný spojitou funkcí. U analogových signálů se hodnota elektrické veličiny, která nese informaci v čase, může libovolně měnit na jakoukoliv hodnotu v definovaných mezích jak je vyobrazeno na obrázku 1.3 vlevo. Analogové signály lze zpracovávat a měnit jejich hodnoty. Mezi možnostmi zpracování patří filtrace, zesílení a útlum, modulace a demodulace [4].

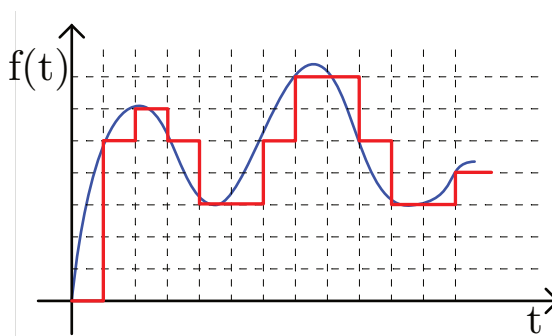
Digitální signál na rozdíl od analogového signálu je tvořen posloupností vzorků, nabývajících předem definované hodnoty. Základními přenášenými hodnotami je logická 1 a 0, také označovány jako true a false, znázornění digitálního signálu je na obrázku 1.3 vpravo. V praxi při dostatečně velké schopnosti systému rozpoznávat jednotlivé hodnoty, může digitální signál nabývat libovolný počet hodnot [4].

Mezi analogovými signály a digitálními signály lze, v případě splnění podmínek, převádět časové průběhy do opačné varianty, ale vždy dojde k určité ztrátě informace. Pro převedení analogového signálu na digitální je potřeba předem definovat kvantovací úroveň. Následně je třeba analogový signál navzorkovat, tedy určit časové



Obr. 1.3: Znáznornění analogového a digitálního signálu.

body kdy bude zachycena aktuální hodnota analogového signálu. Následně v těchto časových hodnotách bude zaznamenána úroveň analogového signálu a přiřazena nejbližší odpovídající kvantovací úrovni, znázornění převodu analogového signálu na digitální je na obrázku 1.4. Modrá křivka je původní analogový signál, červená křivka je digitální signál navzorkovaný podle svislých šrafovaných čar a přiřazený kvantovacím úrovním znázorněných horizontálními šrafovanými čarami.

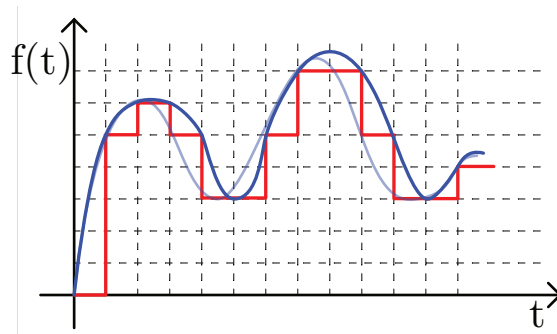


Obr. 1.4: Princip převodu analogového signálu na digitální signál.

Převod digitálního signálu zpět na analogový je prováděn pomocí dopočítávání průběhu signálu mezi jednotlivými body digitálního signálu, jak je ukázáno na obrázku 1.5. Červená křivka je digitální signál, modrá křivka je vytvořený analogový signál pomocí spojení bodů digitálního signálu ve vzorkovaných bodech spojením hladkou křivkou. Tento převod je však nepřesný, pro znázornění této ztráty je originální analogový signál znázorněn na obrázku 1.5 průhlednou modrou křivkou. Z průběhu je patrné, že nově vytvořený analogový signál neodpovídá originálnímu analogovému signálu, který byl převeden na digitální.

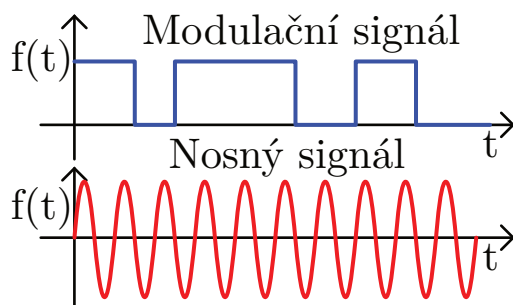
Modulace

Modulací je označován nelineární proces, při kterém se mění charakter nosného signálu pomocí modulačního signálu a vzniká výsledný modulovaný signál. Modulace je standardním procesem při přenosu dat, nejznámějším využitím modulace



Obr. 1.5: Princip převodu digitálního signálu na analogový signál.

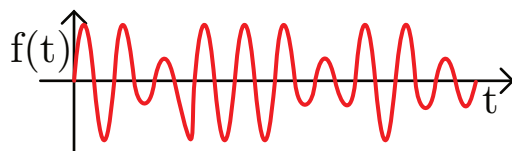
je AM (amplitudově modulovaný) a FM (frekvenčně modulovaný) rádiový signál. Hlavním důvodem používání modulace je, že většina zdrojů signálů generuje signály v podobě, která není vhodná pro přenos na větší vzdálenosti. Pokud však takovýto signál modulujeme, je mnohem snazší ho přenést. Pro vytvoření modulovaného signálu je potřeba modulátor, který zkombinuje modulační a nosný signál a na výstupu vytvoří modulovaný signál. Na druhé straně komunikace je poté demodulátor, který z modulovaného signálu odebere nosný signál a na výstupu odevzdá původní modulační signál nesoucí data. Na obrázku 1.6 je zobrazen modulační signál a nosný signál, které budou vstupními parametry pro následující druhy modulace [5].



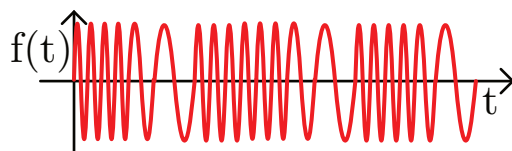
Obr. 1.6: Vstupní modulační a nosný signál.

Rozlišujeme tři typy modulace:

- Amplitudová modulace, zkráceně AM, patří mezi jednoduché spojité modulace. Jedná se o nejstarší druh modulace, která funguje na principu změny amplitudy modulačního signálu v závislosti na nosném signálu. Frekvence ani fáze se u této modulace nemění. Znázornění amplitudové modulace je na obrázku 1.7 [5].
- Frekvenční modulace, zkráceně FM, funguje na principu změny frekvence nosného signálu v závislosti na změně amplitudy modulačního signálu, amplituda i fáze nosného signálu zůstávají nezměněny, znázornění frekvenční modulace je na obrázku 1.8 [5].
- Fázová modulace, zkráceně PM, funguje na principu změny fáze nosného signálu na změně amplitudy modulačního signálu. V praxi se tento druh modulace moc

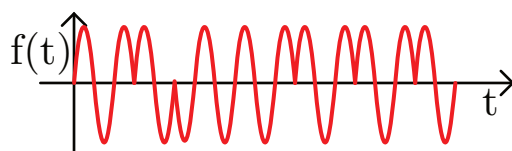


Obr. 1.7: Amplitudově modulovaný signál.



Obr. 1.8: Frekvenčně modulovaný signál.

nevyužívá, protože vyžaduje poměrně složitý demodulátor. Dále mohou vznikat situace, kde je problém rozeznat správně fázový posuv, například rozehnaní posuvu fáze o 0° a 180° . Znázornění fázové modulace je na obrázku 1.9 [5].



Obr. 1.9: Fázově modulovaný signál.

Rušení vysílané do sítě

Rušení je označení pro jev, kdy elektrické zařízení ovlivňuje nežádoucím způsobem vysokofrekvenčními signály.

Rušení může vzniknout mnoha způsoby, například původně žádoucí signál se dostane na nesprávné místo a tím se stane rušivým signálem. Rušivé signály se mohou šířit po elektrorozvodné síti nebo pomocí elektromagnetického záření. Výsledkem ovlivnění signálu rušivým signálem je poškození přenášených dat. Typickými zdroji rušení bývají spínané zdroje nebo předřadníky zářivek [6].

Negativním vlivům rušení lze zamezit pomocí odrušení, což je označení pro soubor opatření k zamezení vzniku, nebo šíření, rušivých signálů. Pro ochranu ostatních spotřebičů zapojených do společné rozvodné sítě byl zaveden pojem elektromagnetická kompatibilita, zkráceně EMC. Elektromagnetická kompatibilita, je vlastnost elektrického zařízení spočívající v tom, že rušení, které vysílá do elektrické sítě je v mezích tak, že neovlivňuje ostatní zařízení. Odrušení bývá prováděno pomocí rezistorů, kondenzátorů, tlumivek, filtrů, vždy podle potřeby konkrétního rušivého zařízení [6].

Odstup signál-šum

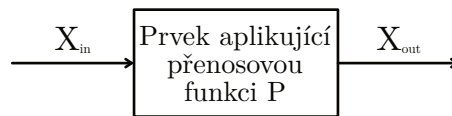
Odstup signál/šum je značení pro poměr úrovně výkonu užitečného signálu nesoucí informaci k úrovni výkonu šumu, dle vzorce 1.1. Tento poměr se standardně vyjadřuje v decibelech (dB). Alternativním vyjádřením je druhá mocnina poměru amplitudy užitečného signálu a šumu. Vzorec pro výpočet odstup signál-šum je

$$SNR = 10^{10} \log \left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right) = 10^{10} \log \left(\frac{A_{signal}}{A_{noise}} \right)^2, \quad (1.1)$$

kde P_{signal} je střední výkon užitečného signálu, P_{noise} je střední výkon šumu, A_{signal} je střední hodnota amplitudy užitečného signálu, A_{noise} je střední hodnota amplitudy šumu [7].

Přenosová funkce

Přenosová funkce definuje, jak daný elektrický systém změní hodnotu veličin přivedených na vstup systému. Na obrázku 1.10 je znázorněno blokové schéma přenosové funkce, kde X_{in} znázorňuje vstupní veličinu a X_{out} znázorňuje výstupní veličinu pozměněnou přenosovou funkcí [8].



Obr. 1.10: Blokové schéma přenosové funkce.

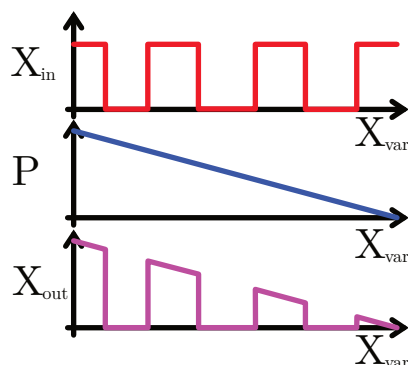
Přenosová funkce P se vypočítá poměrem vstupní a výstupní hodnoty veličiny přivedené na elektrický systém, dle rovnice 1.2

$$P = \frac{X_{out}}{X_{in}}, \quad (1.2)$$

kde výsledná hodnota P je bezrozměrná jednotka. Alternativou je výpočet pomocí vzorce 1.3, kde výsledná hodnota je v decibelech (dB)

$$P = 20 \log \left(\frac{X_{out}}{X_{in}} \right). \quad (1.3)$$

Přenosová funkce se často uvádí v časové nebo frekvenční závislosti u systémů které jsou na těchto veličinách závislé. Na obrázku 1.11 je znázorněn princip vlivu přenosové funkce na úroveň signálu ve frekvenčním spektru, kde na levé straně je frekvenční spektrum vstupního signálu, uprostřed je znázorněna přenosová funkce a na pravé straně je výsledné frekvenční spektrum výstupního signálu, které vzniklo vynásobením vstupního signálu přenosovou funkcí.



Obr. 1.11: Princip vlivu přenosové funkce na úroveň signálu ve frekvenčním spektru.

Přenosové funkce mohou měnit charakteristiku, například na základě času, frekvence nebo změny jiné veličiny. Proto na obrázku 1.11 osy X grafů mají označení X_{var} . První graf s červenou křivkou znázorňuje průběh vstupní veličiny, druhý graf s modrou křivkou znázorňuje přenosovou funkci a poslední graf s fialovou křivkou znázorňuje průběh výstupní veličiny, která vznikla ovlivněním průběhu vstupní veličiny přenosovou funkcí.

Přenosové funkce můžou mít nejrůznější charakteristiky, v závislosti na vnitřním zapojení systému, který přenosovou funkci definuje. Kromě systémů pro úpravu tvaru vstupních veličin, jako například v audio inženýrství, jsou hodnoty přenosových funkcí důležité pro přenosové systémy, kde přenosové funkce ovlivňují kvalitu přenášeného signálu a maximální vzdálenost přenosu v daném médiu [10] [9].

1.2.2 Impedance

Analýza sinusového ustáleného stavu se zabývá elektrickými obvody složenými z lineárních, časově neměnných prvků řízených sinusovým zdrojem napětí nebo proudu při dané frekvenci f po skončení přechodových jevů. Z frekvence f lze pomocí vzorce 1.4 určit úhlovou rychlost

$$\omega = 2\pi f, \quad (1.4)$$

jednotkou úhlové rychlosti je radián za sekundu ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$).

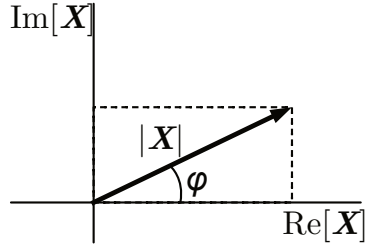
Obecný sinusový signál v čase t mající maximální amplitudu X_{\max} , úhlovou rychlost ω a fázi φ lze zapsat dle rovnice 1.5

$$x(t) = X_{\max} \cos(\omega t + \varphi). \quad (1.5)$$

Takovémuto signálu lze přiřadit komplexní veličinu dle rovnice 1.6, kde imaginární jednotka $j = \sqrt{-1}$

$$\mathbf{X} = X_{\max} e^{j\varphi}, \quad (1.6)$$

takovéto vyjádření je \mathbf{X} fázor daného signálu. Fázor \mathbf{X} lze vyjádřit pomocí reálné ($\text{Re } \mathbf{X}$) a imaginární ($\text{Im } \mathbf{X}$) složky. Tyto dvě složky lze znázornit v kartézské soustavě souřadnic, jak je znázorněno na obrázku 1.12.



Obr. 1.12: Znázornění fázoru v komplexní rovině.

V sinusovém ustáleném stavu je při frekvenci ω definovaná impedance $\mathbf{Z}(\omega)$ dle vzorce 1.7 jako podíl fázoru proudu a fázoru napětí

$$\mathbf{Z}(\omega) = \frac{\mathbf{U}}{\mathbf{I}}, \quad (1.7)$$

jednotkou impedance je ohm (Ω).

Dále definujeme admitanci \mathbf{Y} dle vzorce 1.8 jako převrácenou hodnotu impedance

$$\mathbf{Y}(\omega) = \frac{1}{\mathbf{Z}}, \quad (1.8)$$

jednotkou admitance je siemens (S).

Pro elektrickou síť lze definovat další veličiny související s impedancí $\mathbf{Z}(\omega)$, které jsou uvedeny v tabulce 1.1.

Tab. 1.1: Veličiny související s impedancí.

Veličina	Vzorec	Jednotka
Rezistence	$R = \text{Re } \mathbf{Z}$	Ω
Reaktance	$X = \text{Im } \mathbf{Z}$	Ω
Vodivost	$G = \text{Re } \mathbf{Y}$	S
Susceptance	$B = \text{Im } \mathbf{Y}$	S
Časová konstanta	$\tau = \frac{1}{\omega} \frac{\text{Im } \mathbf{Z}}{\text{Re } \mathbf{Z}} = -\frac{1}{\omega} \frac{\text{Im } \mathbf{Y}}{\text{Re } \mathbf{Y}}$	s

Pro obecnou síť platí, $R \neq G^{-1}$ a $X \neq B^{-1}$.

Impedanci lze při dané úhlové rychlosti ω definovat pro rezistory (R), induktory (L) a kondenzátory (C) dle tabulky 1.2. Impedance rezistorů nabývá reálných hodnot a impedance induktorů a kondenzátorů nabývá imaginárních hodnot.

Vzorce impedance a admitance v tabulce 1.2 jsou uvedeny pro ideální prvky, u reálných prvků jsou hodnoty ovlivněny parazitními parametry [11].

Tab. 1.2: Impedance a admittance pro R, L, C prvky.

Prvek	Značka	Impedance	Admittance
Rezistor	R	$Z = R$	$Y = \frac{1}{R}$
Induktor	L	$Z = -\frac{1}{j\omega C}$	$Y = j\omega C$
Kondenzátor	C	$Z = j\omega L$	$Y = -\frac{1}{j\omega L}$

1.3 Impedanční přizpůsobení

Impedanční přizpůsobení je označení pro stav, kdy činitelé odrazu zátěže a zdroje jsou komplexně sdružené. V tomto stavu nedochází ke vzniku stojatého vlnění. Pro impedanční přizpůsobení obvodu je potřeba, aby velikost imaginární části impedance zátěže měla stejnou velikost, jako imaginární část impedance zdroje, avšak s opačným znaménkem. To znamená, že obvod musí být v rezonanci, tedy dopadající a odražené vlny budou mít stejnou velikost a vzájemně se vyruší. Nutnost dosažení rezonance obvodu vytváří omezení impedančního přizpůsobení pouze pro určité kmitočty. Přizpůsobením obvodu pro dané součástky získáme velmi vysoké impedanční přizpůsobení, avšak pro jiné frekvence se stává obvod nepřizpůsobený. Z tohoto důvodu se do zapojení přidávají přizpůsobovací obvody, které vytváří přizpůsobení pro více frekvencí v dostatečné míře, avšak nikdy neposkytnou úplné impedanční přizpůsobení [12].

1.3.1 Důsledky impedančního nepřizpůsobení

Impedanční přizpůsobení je významným faktorem u obvodů, ve kterých se objevují vysokofrekvenční signály, z důvodu zamezení vzniku elektromagnetického rušení [12].

Nejčastějšími důsledky impedančního nepřizpůsobení obvodů jsou:

- vznik stojatého vlnění - stojaté vlny zvyšují namáhání částí obvodů, dále mohou poškodit koncové stupně vysokofrekvenčních zesilovačů. Náchylnost tranzistorů na velké napěťové impulzy způsobené stojatými vlnami může způsobit jejich poškození
- útlum signálu - u nepřizpůsobených vedení vzniká při přenosu na velké vzdálenosti příliš vysoký útlum, a tedy vzniká omezení délky vedení. Aby přenášený signál byl stále čitelný, lze impedančně nepřizpůsobené vedení používat na omezenou vzdálenost, na které nevzniká útlum na takové úrovni
- vznik imaginární složky - pokud je součástí obvodu laděný obvod a na impedančně nepřizpůsobeném vedení vzniknou imaginární složky impedance, dostávají se do těchto obvodů, a v laděných obvodech vzniká nepřesnost item odražení signálu - přijímaný signál se může na konci vedení odrazit zpátky

směrem ke zdroji signálu, odražením signálů může dojít k zahlcení přenosového pásma odraženými signály

- rezonance dlouhého vedení - signál na dlouhém impedančně nepřizpůsobeném vedení může rezonovat na více frekvencích čímž vzniká velké zesílení signálu, které může odfiltrovat některé složky přenášeného signálu

1.4 Power-line communication

Power-line communication, zkráceně PLC, je označení pro přenos zpráv po elektrické síti. Posílání dat probíhá přes elektrickou síť, po které se data posílají vysokofrekvenčními signály. U standardu Broadband pracují frekvence posílaných signálů v pásmu 1,8 MHz až 250 MHz.

Pro uskutečnění komunikace po elektrické síti se využívá Powerline modemů, což jsou zařízení, které se připojí do elektrické sítě, která se bude využívat pro přenos dat. Z této elektrické sítě je samotný modem napájen a následně na tuto síť modem posílá data pro přenos. Powerline modemy standardně skládají z male konektoru do elektrické sítě, female konektoru RJ45 a výpočetní jednotky, která převádí data do vysokofrekvenční formy pro přenos na síti a zpět. Komerční modemy mohou následně obsahovat více konektorů RJ45, nebo třeba průchozí zásuvku elektrické sítě.

PLC probíhá vždy mezi minimálně dvěma modemy, kde kontrolní modem označen jako „master“ řídí probíhající komunikaci. Další modem se značkuje jako „slave“ a je podřízen kontrolnímu modemu. Takovýchto podřízených modemů může být v komunikaci více, čímž se dosáhne pokrytí PLC na více místech. Kontrolní modem se připojuje k lokálnímu síťovému uzlu zatímco „slave“ modem se připojuje ke koncovým zařízením. Komunikace probíhá přivedením dat pomocí síťového kabelu na Powerline modem, který tyto data převede do formy vhodné pro přenos po elektrické síti, a následně tyto data odešle na elektrickou síť. Druhý Powerline modem tyto data na elektrické síti zachytí, a převede zpátky do formy pro přenos po síťovém kabelu.

Hlavní výhodou technologie PLC je možnost přivedení datové sítě do potřebného místa bez nutnosti vedení kabelu, pouze pomocí elektrické sítě, a to bez většího omezení rychlosti provozu datové sítě. Běžná vzdálenost komerčních PLC modemů se pohybuje kolem 300 m, což je dostačující hodnota pro pokrytí rodinného domu.

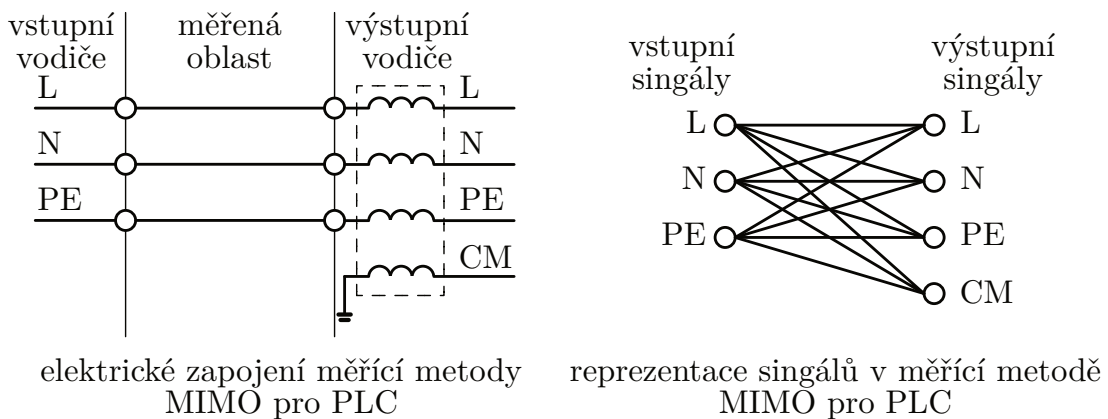
Nevýhodou technologie PLC je potřeba pořízení minimálně dvou PLC modemů pro propojení dvou bodů datové sítě. Také cena dvou modemů je vyšší než cena standardního síťového kabelu. Rychlost a kvalita přenosu může být ovlivněna stářím a kvalitou elektrické sítě, vytížením sítě a rušením ostatními spotřebiči připojených do sítě.

PLC modemů se nejvíce využívá v prostorech, kde je obtížné nebo nepraktické vedení datového kabelu od lokálního uzlu sítě ke koncovému zařízení. Nejčastěji se PLC modemy používají k přivedení internetové sítě z přízemí rodinného domu do dalšího patra, nebo v chytrých budovách [13].

1.5 MIMO v technologii PLC

Celým názvem Multiple Input Multiple Output, neboli česky Více Vstupů Více Výstupů. Jedná se o metodu, která umožňuje do měřicího systému vkládat více vstupních parametrů, které ovlivňují měřené parametry, a samotných měřených parametrů může být více.

V technologii PLC se při standardním měření měří fáze mezi fázovým (L) a nulovým (N) vodičem. Jelikož kabely používané pro PLC obsahují vždy tři oddělené vodiče, a to fázový, nulový a ochranný, lze pomocí MIMO dosáhnout při třech vstupních parametrech až devíti výstupních parametrů. Uměle můžeme přidat další výstupní vodič s označením „common-mode“ (CM). Signál nacházející se v tomto vodiči je generován asymetrií zbylého přenosu, CM se používá pouze jako výstupní signál. Tímto dodaným vodičem lze dosáhnout až dvanácti různých výstupních parametrů [14].



Obr. 1.13: Znázornění principu MIMO pro PLC.

Na obrázku 1.13 vlevo je zobrazen princip elektrického zapojení vodičů pro MIMO v technologii PLC. Vazba vodiče CM s ostatními vodiči je znázorněna cívkami ve šrafovaném obdélníku.

Vpravo na obrázku 1.13 je znázorněna reprezentace jednotlivých signálů, které lze pomocí MIMO měřit u zapojení vlevo. Jednotlivé signály jsou reprezentovány úsečkou mezi vstupním a výstupním signálem. Zjednodušené označení pro jednotlivé signály je, například pro signál mezi vstupní fází a výstupním nulovým vodičem, označení L-N.

1.6 Vyšší harmonické

1.6.1 Zdroje rušení vyšších harmonických

Harmonický signál je takový signál, který lze popsat pomocí geometrické funkce sinus nebo kosinus. Vyšší harmonický signál je celočíselným násobkem harmonického signálu, pro elektrickou síť pracující na harmonické frekvenci 50 Hz se například třetí harmonická rovná 150 Hz. V praxi nejvíce rušené jsou třetí a páté harmonické.

Mezi zdroje rušení vyšších harmonických můžeme rozdělit do základních třech skupin, a to na zařízení se spínanými zdroji, zdroje osvětlení obsahující předřadník, zdroje nepřerušovaného napájení a stejnosměrné měniče.

Spínané zdroje

Spínané zdroje dnes používá většina moderních zařízení jako zdroj napájení, například notebooky, chytré telefony, Wi-Fi routery apod. V moderních zdrojích se místo omezovacího transformátoru a usměrňovače využívají filtry a spínané tranzistory které jsou řízeny zpětnou vazbou výstupního napětí spínaného zdroje.

Výhodou spínaných zdrojů je malá velikost, nízká hmotnost a poměrně nízká cena. Naopak nevýhodou je, že spínaný zdroj místo nepřetržitého odebrání proudu, odebírá ze zdroje pouze pulzy. Tyto pulzy obsahují velké množství harmonických třetího a vyššího řádu a významné vysokofrekvenční složky, které jsou filtrovány vstupním filtrem. Harmonické třetího a vyššího řádu však odfiltrovány nejsou a vrací se zpět do elektrické sítě. Spínané zdroje nejvíce ovlivňují liché harmonické [15].

Zdroje osvětlení s elektronickým předřadníkem

Osvětlení s předřadníky jsou velmi populární díky své vyšší účinnosti a tím tedy menší spotřebě oproti klasickým žárovkám. Elektronické předřadníky pracují na rozdíl od magnetických na přibližně tisícnásobku provozované frekvence, tedy na 50 kHz.

Výhodou elektronických předřadníků oproti magnetickým, je delší životnost zdroje osvětlení díky zpětnovazební regulaci. Nevýhodou je generování lichých harmonických signálů v napájecím proudu. Dnešní LED žárovky nahrazují klasické žárovky s wolframovým vláknem díky své nižší spotřebě, avšak součástí konstrukce LED žárovky je i elektronický předřadník. Proto v elektrických sítích, kde se nachází větší množství tohoto typu zdroje světla, vzniká velký problém s nechtěným šířením vyšších harmonických po síti. Typickým místem, kde tento problém vzniká, jsou hotely [15].

Domácí zdroje nepřerušovaného napájení a stejnosměrné měniče

Zdroje nepřerušovaného napájení (UPS) a stejnosměrné měniče jsou standardně založeny na třífázovém můstku, nebo také šesti pulzní můstek. Můstek po přivedení třech fází elektrické sítě usměrňuje sinusové průběhy na stejnosměrný výstup. Můstek vytváří na elektrické síti liché harmonické s vynecháním násobku tří.

Velikost tvořených harmonických lze výrazně omezit použitím dvanácti pulzního můstku, což jsou dva šesti pulzní můstky, kde jeden má napájené vinutí typu hvězda, a druhý typu trojúhelník, což zajišťuje fázový posun o 30° . Použití takového můstku nejen snižuje proud harmonických signálů, ale i usnadňuje konstrukci filtru [15].

1.6.2 Vliv vyšších harmonických na elektrickou síť

Vliv vyšších harmonických na elektrickou síť lze rozdělit na problémy, které vznikají harmonickými proudy: přetížení nulového vodiče, přehřívání transformátorů, nechtěné vypínání síťových jističů, přetížení kompenzačních kondenzátorů účinníku a povrchový jev (Skin effect), a na problémy, vznikající harmonickými napětími: zkreslení průběhu napětí, ovlivnění funkčnosti asynchronních (indukčních) motorů a šum při křížení nuly [15].

Přetížení nulového vodiče

V třífázové elektrické soustavě je průběh napětí na fázových vodičích posunut o 120° , takže pokud jsou fázové vodiče rovnoměrně zatížené, je kombinovaný proud na nulovém vodiči nulový. Pokud fázové vodiče nejsou vyvážené nulovým vodičem, teče proud způsobený touto nerovnováhou. Přestože základní proudy se v nulovém vodiči navzájem vyruší, vyšší harmonické, především harmonické násobky tří, se v nulovém vodiči nevyruší, ale ještě naopak sčítají. Sečtením vyšších harmonických se zvyšuje proud procházející vodičem, a tedy se i zvyšují samotné fyzikální nároky na vodič. Přenosem větších proudů na nulovém vodiči vzniká teplo a může dojít k poškození sítě, nebo k požáru [15].

Ovlivnění transformátorů

Vyšší harmonické ovlivňují transformátory dvěma způsoby. Za prvé, ztráty způsobené vířivými proudy uvnitř transformátorů, obvykle kolem 10 % při plné zátěži, kvadraticky rostou. Kromě samotných ztrát vzniká problém vyšších provozních teplot a kratší životnosti transformátoru. Za druhé, při odrazu zpět do trojúhelníkového vinutí transformátorů jsou všechny třetí harmonické ve fázi, takže cirkulují po vinutí. Tímto vynutím jsou všechny harmonické následně účinně pohlceny a tedy se nešíří do napájení. Vyplývá tedy, že transformátory s trojúhelníkovým vinutím jsou účinné

oddělovací transformátory. Při dimenzování transformátoru je zapotřebí zohlednit cirkulační proudy. Ostatní harmonické však pohlceny ve vinutí transformátoru nejsou a procházejí dále do vedení [15].

Nechtěné vypínání proudových síťových jističů

Proudové síťové jističe fungují na principu sečení proudu v jednotlivých fázích a následné porovnání s hodnotou na nulovém vodiči. Pokud se hodnoty nerovnájí, s určitou tolerancí, je obvod odpojen od napájení. Nechtěné odpojování způsobené vyššími harmonickými může nastat ze dvou důvodů. Za prvé, proudový jistič je elektromechanické zařízení, které nemusí správně počítat vyšší frekvenční složky a tedy detekuje falešnou chybu. Za druhé, zařízení generující vyšší harmonické, generují také šum, který musí být filtrován při připojení k napájení. Standardně se pro filtrování tohoto šumu používají filtry obsahující oddělovací kondenzátory do vedení a nulového vodiče. Tímto řešením uniká malý proud do země, hodnotou menší než 3,5 mA. Pokud dojde k nevyvážení obvodu připojením velkého množství zařízení k jedné fázi, může se svodový proud zvýšit na dostatečnou úroveň k vypnutí obvodu proudovým jističem. Tomuto však lze zabránit rovnoměrným rozložením připojovaných elektrických zařízení na všechny tři fáze [15].

Přetížení kompenzačních kondenzátorů účinníku

Kondenzátory pro korekci účinníku slouží k odběru proudu a pro kompenzaci zpoždění proudu, způsobenou induktivními zátěžemi, jako například indukční motory. Impedance těchto kompenzačních kondenzátorů klesá se zvyšující se frekvencí. Pokud tyto kondenzátory nejsou navrženy, aby odolali vysokým harmonickým proudům, může dojít k jejich poškození a ohrožení funkčnosti celé sítě. Dalším problémem je, že kondenzátor a impedance samotného obvodu se mohou dostat do stavu rezonance s jednou z harmonických frekvencí. V důsledku toho se generují velmi vysoká napětí a proudy, což často vede k selhání systému kompenzačních kondenzátorů. Tomuto problému lze zamezit přidáním indukčnosti do série s kondenzátorem. Tím může být rezonanční frekvence řízena tak, aby bylo zabráněno rezonanci, a zároveň působí jako bočníkový pasivní filtr pro harmonické proudy [15].

Povrchový jev

Střídavý proud má tendenci téct po vnějším povrchu vodiče. Tomuto jevu se říká „skin effect“, neboli povrchový jev. Tento jev je výraznější při vysokých frekvencích. Za normálních podmínek je na elektrickém vedení tento jev zanedbáván, jelikož má velmi malý účinek na frekvencích napájecího zdroje, standardně 50 Hz. Na sedmé harmonické, tedy 350 Hz a výše, se povrchový jev stane významným, na vedení

se vytváří další ztráty na vedení a samotné vedení se začne zahřívat. Tam, kde jsou přítomny vyšší harmonické proudy, je potřeba vzít v úvahu povrchový jev, a odpovídajícím způsobem snížit počet vodičů. Pro omezení účinků povrchového jevu lze použít vodiče s více kabelovými jádry [15].

Zkreslení průběhu napětí

Protože zdroj má vnitřní impedanci, harmonické zátěžové proudy vedou ke zkreslení sinusového průběhu napětí. Zkreslený proud odebraný nelineární zátěží způsobuje nesinusový pokles napětí v impedanci obvodu, což má za následek zkreslení průběh napájecího napětí. Takto zkreslený průběh napájecího napětí způsobuje zkreslený proud v lineárních zátěžích, což může nepříznivě ovlivnit jejich výkon nebo účinnost. V praxi napájecí síť má vždy impedanci a vždy vede zkreslené proudy, takže napájecí napětí je vždy zkreslené. Řešením tohoto problému je oddělit obvody napájecí zátěže generující vyšší harmonické od těch, které jsou citlivé na harmonické složky. Impedance zdroje napájecí sítě je velmi nízká, takže následné úrovně zkreslení bývají také relativně nízké. V případě nahrazení zdroje záložním generátorem nebo UPS, je impedance i následné zkreslení mnohem vyšší. Pokud jsou použity místní transformátory, měly by být vybrány s dostatečně nízkou výstupní impedancí a dostatečně velkou kapacitou [15].

Ovlivnění funkčnosti asynchronních motorů

Harmonické zkreslení napětí zvyšuje ztráty vířivými proudy v motorech stejným způsobem, jako v transformátorech. Další ztráty vznikají generováním harmonických polí ve statoru, kde každý se snaží otáčet motor jinou rychlostí a jiným směrem. V obvodech kde, je přítomno harmonické zkreslení napětí, by měly asynchronní mít snížený výkon s ohledem na dodatečné ztráty [15].

Šum při křížení nuly

Mnoho elektronických regulátorů detekuje bod, kde napájecí napětí překročí nulovou úroveň napětí, aby určili, kdy by měly být zapnuty zátěže. Tohoto se využívá proto, že spínání jalových zátěží při nulovém napětí nevytváří přechodové jevy, což snižuje elektromagnetické rušení, a namáhání polovodičových spínacích zařízení. Přítomnost vyšších harmonických zvyšuje rychlost přechodu při křížení nuly a zvyšuje obtížnost detekování nulové úrovně napětí. To vede k nesprávnému provozu zařízení [15].

1.7 Strojové učení

Strojové učení je označení pro algoritmy a techniky, které umožňují programu „učit se“. Pojmeme učít se je stav kdy program mění svoje vnitřní stavy tak, aby zefektivnil svoje vlastní fungování na základě poskytnutých tréninkových datech. Strojové učení má aktuálně velké využití v různých implementacích. Například rozpoznávání dat a signálů, předvídání vývoje dat, rozpoznávání obrazu a filtrace nechtěného obsahu.

1.7.1 Typy strojového učení

Strojové učení lze rozdělit do kategorií podle metod použitých pro učení:

- učení s učitelem - vstupní testovací data jsou označena správným výstupem, kterého má program dosáhnout
- učení bez učitele - vstupní data jsou použity bez známosti správného výstupu
- zpětnovazební učení - výsledky učení jsou oceňovány, a „učení“ se přizpůsobuje podle způsobů s neefektivnějším získáním nejvíce největšího ocenění

Program při použití strojového učení může být na tréninkových datech naučen a získané vědomosti pouze používá pro své další fungování. Takové učení je vhodné pro programy, u kterých se nepředpokládá, že by vznikla další potřeba úpravy, například rozpoznávání objektů v obraze. Toto učení se označuje jako dávkové učení. Alternativou je inkrementální učení, kde s novými daty se program přiučí podle nových dat, bez potřeby přeučení celého modelu. Toto učení je vhodné pro programy, které se potřebují neustále přizpůsobovat novým datům, například vývoj akciového trhu nebo doporučený obsah na sociálních sítích [16].

1.7.2 Metody strojového učení s učitelem

Neurony a neuronové sítě

Neuronová síť je označení pro jeden z výpočetních modelů strojového učení. Jedná se o strukturu určenou pro paralelní zpracování dat. Neuronová síť se skládá z umělých neuronů [17].

Neuron je ve strojovém učení označení pro funkci, která má libovolný počet vstupních parametrů a jednu výstupní hodnotu. Nejpoužívanější model neuronu je, kde

$$Y = S \left(\sum_{i=1}^N (w_i x_i) - \Theta \right), \quad (1.9)$$

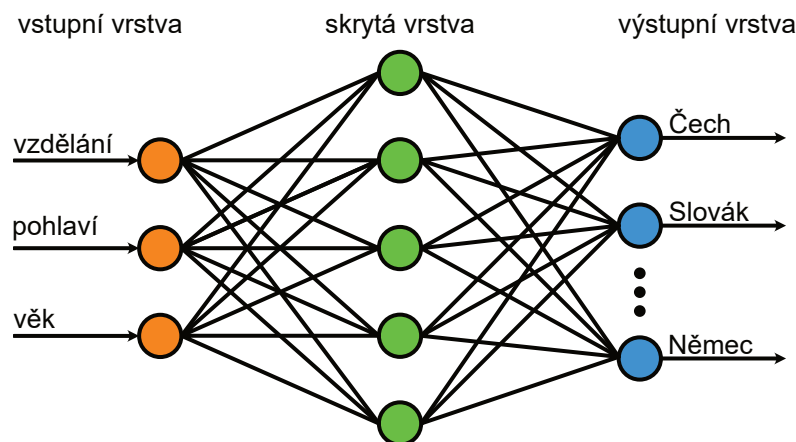
kde Y je výstup neuronu a $S(x)$ je přenosová funkce neuronu. Velikost w_i vyjadřuje uložení zkušenosti do neuronu. Se zvyšující hodnotou se zvyšuje důležitost vstupů neuronů x_i . Symbol Θ je označení prahové hodnoty aktivace neuronu, tedy pokud

hodnota $\sum_{i=1}^N (w_i x_i)$ je menší než hodnota Θ je neuron neaktivní. V opačném případě je neuron aktivní [18] [19].

Jednotlivé neurony se paralelně skládají do vrstev neuronové sítě. Tyto vrstvy lze rozdělit do třech skupin:

- vstupní vrstva - vrstva přijímající data, která dále budou zpracovávána neuronovou sítí
- skrytá vrstva - není vždy nutná pro vybudování neuronové sítě. Skrytých vrstev může být více, přičemž nikdy nesmí mít více vstupů, než vstupní vrstva, a méně výstupů než výstupní vrstva
- výstupní vrstva - vrstva, která předává výsledky zpracování neuronové sítě

Každá neuronová síť musí obsahovat vstupní vrstvu, která má počet vstupů stejný jako je počet vstupních parametrů vstupních dat. Pokud vstupní data mají parametr vzdělání, pohlaví a věk, neuronová síť musí mít tři vstupy. Dále každá neuronová síť musí obsahovat výstupní vrstvu, která musí mít počet výstupů stejný, jako je počet výstupních parametrů. Neuronové sítě často obsahují skryté vrstvy, které nejsou nutné pro tvorbu, ale pro složitější výpočty skryté vrstvy zvyšují přesnost. Skrytých vrstev může teoreticky být neomezeně, ale v praxi se hledá optimální bod mezi složitostí neuronové sítě a přesností výsledků, jelikož každá vrstva použije část výpočetního výkonu. Pokud skrytých vrstev bude velké množství, mohou být výpočetně tak náročné, že naopak proces učení a následného rozpoznání zpomalí [18] [19].



Obr. 1.14: Znárodnění neuronové sítě.

Na obrázku 1.14 je ukázka základní neuronové sítě. Příklad je uveden pro detekci národnosti na vzdělání, pohlaví a věku osoby. Vstupní vrstva vlevo znázorňuje tři vstupy do neuronové sítě, výstupní vrstva vpravo znázorňuje větší množství výstupů, pro každou národnost jeden výstup. Prostřední skrytá vrstva je vyobrazena pouze jedna. Z obrázku 1.14 je patrné, že počet neuronů skryté vrstvy může být více, než je počet výstupů ze vstupní vrstvy. Výstup skryté vrstvy také dodržuje pravidlo a to, že počet výstupů skryté vrstvy je stejný, jako počet vstupů výstupní vrstvy.

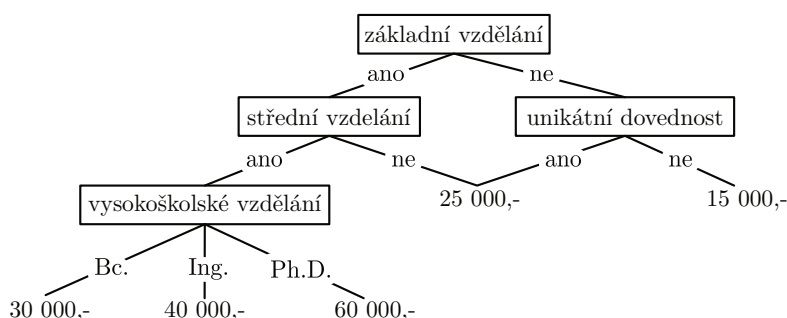
Rozhodovací strom

Metoda strojového učení pomocí rozhodovacího stromu, anglicky Decision Tree, je nejvíce používána pro hledání vzorů a klasifikaci velkého množství různorodých dat, jako například audio a video záznamy, nebo třeba měření spekter [20].

Princip rozhodovacího stromu je v podstatě komplexní implementace vnořených rozhodovacích podmínek if–else. Ve strojovém učení se rozhodovací stromy nevytvářejí ručně, ale pomocí automatizovaných procesů a knihoven které dokážou vytvářet rozhodovací stromy na základně poskytnutých datasetů [20].

Na základě použití rozhodovacích pravidel dokážou rozhodovací stromy vybrat specifická data z velkého množství dat v datasetu, která mohou být charakteristická pro daný vzorek. Rozhodovací stromy tyto data klasifikují a tyto principy klasifikace umožní strojovému učení přesné rozhodování při detekci dat [20].

Na obrázku 1.15 je znázorněn princip klasifikace dat pomocí rozhodovacího stromu. Princip je znázorněn na zjednodušené klasifikaci výše příjmu osoby. Položky



Obr. 1.15: Znázornění principu fungování rozhodovacího stromu.

v obdélníkovém rámu na obrázku 1.15 reprezentují rozhodovací uzly, položka základní vzdělání je kořenový uzel. Úsečky mezi uzly reprezentují rozdělovací cestu rozhodnutou uvedenou podmínkou a výsledné hodnoty příjmu jsou reprezentací listových uzlů, které jsou zároveň výstupy rozhodovacího stromu. Pokud rozhodovací cesta navazuje na rozhodovací uzel, je celá navazující část rozhodovacího stromu označena jako větev.

Jak je uvedené na obrázku 1.15, každý rozhodovací uzel musí mít minimálně dvě rozdělovací cesty. Pokud by jich měl méně postrádá jeho existence smysl. Rozhodovací uzly mohou mít teoreticky nekonečné množství rozhodovacích cest. Každá rozhodovací cesta musí být zakončena v uzlu. Listový uzel může mít více vstupních rozhodovacích cest.

Hlavními výhodami rozhodovacích stromů jsou přesné fungování detekce dat i při přítomnosti šumu a rychlá klasifikace neznámých dat. Další z výhod je, že v přítomnosti nepotřebných dat dokážou rozhodovací stromy tyto data vynechat při rozhodování [20].

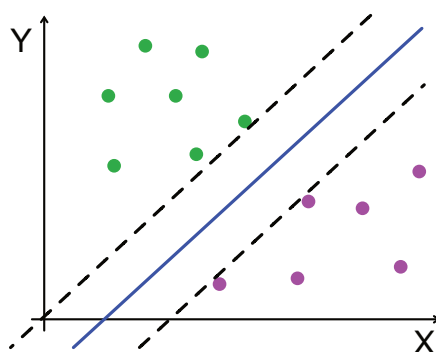
Jednou z nevýhod rozhodovacích stromů je, že i malá změna v datech může vést k velké změně podoby rozhodovacího stromu. Tato nevýhoda má významný vliv při ruční tvorbě rozhodovacích stromů. Další nevýhodou je vliv zahrnutí nesprávných dat do rozhodování, například číslování vzorků, které nemá se samotnými vzorky nic společného a slouží pouze pro označení pořadí vzorků. Při větších rozhodovacích stromech je nevýhoda, že podčásti stromů mohou být vícekrát duplikovány a tedy výrazně zvětšují mohutnost celkového rozhodovacího stromu [20].

Metoda podpůrných vektorů

Metoda podpůrných vektorů, anglicky Support Vector Machines (SVM) je druh strojového učení je zaměřen především na klasifikaci a regresní analýzu. Základním principem je rozdělení dat do dvou skupin a následně nalézt funkci která tyto dvě skupiny jednoznačně rozděluje [19].

Obrázek 1.16 znázorňuje data v prostoru, kde každý bod znázorňuje jeden záznam dat. Metoda podpůrných vektorů hledá optimální rozdělení dat v prostoru tak, aby prostor mezi skupinami pokrýval co největší možnou plochu. Tento požadavek maximální velikosti prostoru mezi skupinami vede k faktu, že na hranici s prázdným prostorem je požadován minimální počet bodů. Na základě těchto hraničních bodů je definován tvar prostoru mezi skupinami pomocí vektorů [19].

Na obrázku 1.16 zelené body znázorňují první skupinu dat a fialové bodu druhou skupinu dat. Šrafované čáry vyznačují maximální plochu mezi daty a modrá přímka uprostřed výslednou funkci metody podpůrných vektorů.



Obr. 1.16: Princip rozdělení dat v prostoru metodou podpůrných vektorů.

Data lze vynést do vícerozměrného prostoru, než je znázorněno na obrázku 1.16. Metoda podpůrných vektorů hledá vždy objekt s o jedna větší dimenzí prostoru, než je počet dimenzí ve kterém jsou data vynesena [19]. Pro 2D plochu vynesení dat se hledá křivka dělicí data, pro 3D prostor vynesení dat se hledá plocha dělicí data a stejným principem pro vyšší dimenze.

Prostor nemusí být rozdělen pouze lineárně jako na obrázku 1.16, ale může být rozdělen i nelineárně pomocí křivky. Nelineární rozdělení nabízí větší přizpůsobitelnost datům a někdy i řešitelnost pro data, pro které lineární řešení neexistuje [19]. Například kdyby se barvy dvou nejbližších bodů z obrázku 1.16 zaměnily, byla by taková data neřešitelná lineárně pro 2D prostor.

Nejlépe však metoda podpůrných vektorů funguje pro data, kde skupiny dat jsou jednoznačně oddělené a jejich hodnoty se vzájemně nepřekrývají a neobsahují vysokou úroveň šumu. Při velmi velkých datasetech účinnost metody podpůrných vektorů klesá [19].

Další metody strojového učení s učitelem

Kromě již uvedených metod existují i další metody učení s učitelem, kam patří například Nejbližší soused, Náhodný les a Naivní Bayes [19].

1.7.3 Práce s daty pro strojové učení

Pro strojové učení lze použít surová data, avšak ty nemusí ve finálním modelu dosahovat požadovaných výsledků. Pro zvýšení kvality výsledků lze tréninková data upravit následujícím způsobem:

- Větší množství - s větším množstvím tréninkových dat získá model strojového učení přesnější údaje o detekovaném parametru a následně dokáže poskytnout lepší výsledek, navzdory výskytu nechtěných anomálií v datech.
- Větší diverzita - zvýšení diverzity dat umožňuje pro výsledný model strojového učení přesnější detekce za různých podmínek obecných změn dat, například při vyšším jasu na fotce.
- Rovnoměrný počet vzorků - pokud má model přesně definovaný počet výstupů, je třeba, aby každý výstup měl při učení stejný počet učících vzorků. Pokud tréninková data obsahují 1000 vzorků pro jeden výstup a 10 vzorků pro všechny ostatní výstupy bude výsledný model strojového učení označovat většinu neznámých dat jako výstup s 1000 tréninkových vzorků.
- Škálování dat - pokud se vstupní data pohybují v velkém intervalu hodnot, který není přesně definovaný, škálování dat pomůže zvýšit přesnost fungování finálního modelu strojového učení. Vzorovým škálováním dat je úprava dat, aby se všechny hodnoty pohybovaly v intervalu od 0 do 1. V tu chvíli model má přesně definováno jaká může být minimální i maximální hodnota.
- Kategorizace dat - pokud data obsahují určité charakteristické rysy, které je možné popsat je dobré tak udělat. Například, pokud jeden jediný výstup má specifickou maximální hodnotu, popsání všech vzorků maximální hodnotou pomůže rozpoznání specifického vzorku.

Kvalitní tréninkový dataset pro strojové učení je základem pro strojové učení, pokud není kvalitní tréninkový dataset, bude výsledný model strojového učení nekvalitní anebo nebude fungovat vůbec.

1.7.4 Křížová validace

Křížová validace (cross-validation) je nejvíce používaná metoda pro zjištění přesnosti detekce modelu strojového učení. Základní princip spočívá v tom, že tréninková data jsou rozdělena na dvě části, kde první část dat je použita na trénink zatímco druhá část je použita na ověření přesnosti detekce během učících cyklů. Toto rozdělení tréninkových dat na dvě části je většinou prováděno rozdělením na polovinu za účelem získání stejně velkých částí pro učení i pro ověření přesnosti. Rozdělení však může být i nerovnoměrné, ale pokud jsou stejná data pro trénink i pro ověření přesnosti během učení, nejedná se již o křížovou validaci [21].

Existuje speciální varianta křížové validace s označením k -fold křížová validace. Tento typ křížové validace funguje na principu, kdy tréninková data jsou rozdělena na k stejných částí. Následně stejně jako pro standardní křížovou validaci je jedna část, konkrétně $k-1$ částí, použita jako tréninková data, a zbylá k část je použita pro ověření přesnosti detekce během učení. Zde však učící cyklus nekončí. Po prvním kompletním tréninku je model strojového učení uložen a další část z rozdělení tréninkových na k částí je použita na ověření přesnosti detekce během učení, a zbylé části jsou použity jako tréninková data. Tento cyklus se opakuje, dokud každá z k částí není použita jako ověřovací data, a následně z uložených modelů je vybrán model s nejvyšší přesností, jako finální model strojového učení [21].

Použití křížové validace pomáhá zlepšit přesnost fungování finálního modelu strojového učení, avšak pro její správnou implementaci je potřeba dostatečně velké množství vstupních dat, jelikož pro samotná tréninková data je použita pouze jejich část [21].

1.7.5 Boosting

Boosting je označení pro skupinu algoritmů, které umožňují zvýšení klasifikační přesnosti modulu strojového učení. Boosting algoritmy fungují na principu spojování slabých klasifikátorů s nízkou přesností detekce do větších celků, které dohromady vytvoří klasifikátor s vysokou přesností detekce. Slabý klasifikátor je označení pro klasifikátor, jehož přesnost detekce je jen o málo lepší, než je šance správnou klasifikaci náhodným výběrem [16].

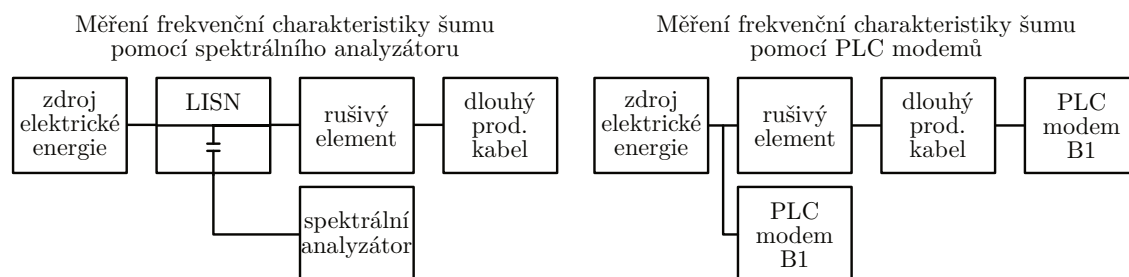
Výhodou Boosting metod je zvýšení přesnosti modelu. Nevýhodou je riziko brzkého přeučení modelu strojového učení při nesprávném optimalizovaném použití. Boosting využívají různé knihovny strojového učení, například knihovny XGBoost, AdaBoost, Gradient Boosting a CatBoost.

2 Výsledky studentské práce

2.1 Získávání hodnot frekvenčního spektra šumu

Pro získávání frekvenční charakteristiky šumu jsou standardně používány spektrální analyzátoři. PLC modemy MOD957 firmy Xingtera však nabízí možnost měření frekvenční charakteristiky šumu připojené elektrické sítě pomocí MIMO metody měření. Výhoda měření pomocí PLC modemu využívající MIMO metodu měření je, že PLC modem je schopen změřit 2 kanály vedení v jeden časový okamžik. Oproti tomu spektrální analyzátor měří pouze jeden kanál v daný časový moment. Spektrální analyzátor však poskytuje násobně přesnější výsledky díky své konstrukci, kalibraci a celkovému účelu použití na rozdíl od PLC modemu, který má možnost měření frekvenční charakteristiky šumu pouze jako přidanou hodnotu ke svému hlavnímu účelu přenosu dat pomocí elektrické sítě.

Pro účel porovnání přesnosti měření frekvenční charakteristiky šumu PLC modemu se specializovaným spektrálním analyzátořem firmy Rohde&Schwarz bylo provedeno měření podle blokového schématu na obrázku 2.1.



Obr. 2.1: Blokové schéma měření pomocí spektrálního analyzátoru a pomocí PLC modemů.

Jak je znázorněno na blokovém schématu na obrázku 2.1, pro standardní měření je mimo samotného spektrálního analyzátoru potřeba použít LISN (Line Impedance Stabilization Network), neboli stabilizátor konstantní impedance vedení. LISN je použita pro odfiltrování vnějšího rušení vedení, které je použito jako zdroj elektrické energie. Toto odfiltrování vnějšího rušení vede k přesnějším výsledkům získaných spektrálním analyzátořem.

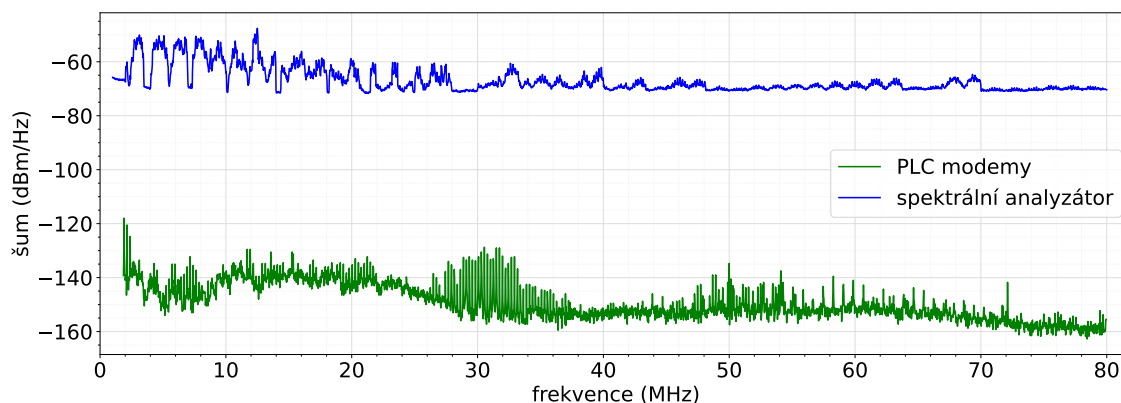
2.1.1 Ověření přesnosti měření pomocí PLC modemů

Výsledky získané spektrálním analyzátořem jsou považovány za konvenčně pravé hodnoty díky tomu, že spektrální analyzátor je kalibrovaný dedikovaný přístroj pro měření frekvenční charakteristiky. Data měřená pomocí spektrálního analyzátoru byla

měřena bez komunikace PLC modemů jejich odpojením z měřené sítě. PLC modemy byly odpojovány, jelikož výrazně ovlivňovaly měření frekvenční charakteristiky šumu vzájemnou datovou komunikací. Odpojení PLC modemů z měřené sítě může způsobit změnu tvaru průběhu měřené frekvenční charakteristiky šumu.

Na obrázku 2.2 modrá křivka znázorňuje hodnoty získané spektrálním analyzáto-rem a zelená křivka hodnoty získané PLC modemem. Z průběhu je vidět, že tvar obou křivek je podobný v podobě vodorovného průběhu. Hodnoty jsou však posunuté přibližně o 70 dBm.

Vliv komunikace PLC modemu není na hodnotách získaných PLC modemem viditelný pravděpodobně díky tomu, že samotný PLC modem při měření frekvenční charakteristiky šumu odečítá hodnotu vlastní komunikace z měřených hodnot. Toto odečítání může mimo jiné způsobovat posun celého průběhu o 70 dBm.

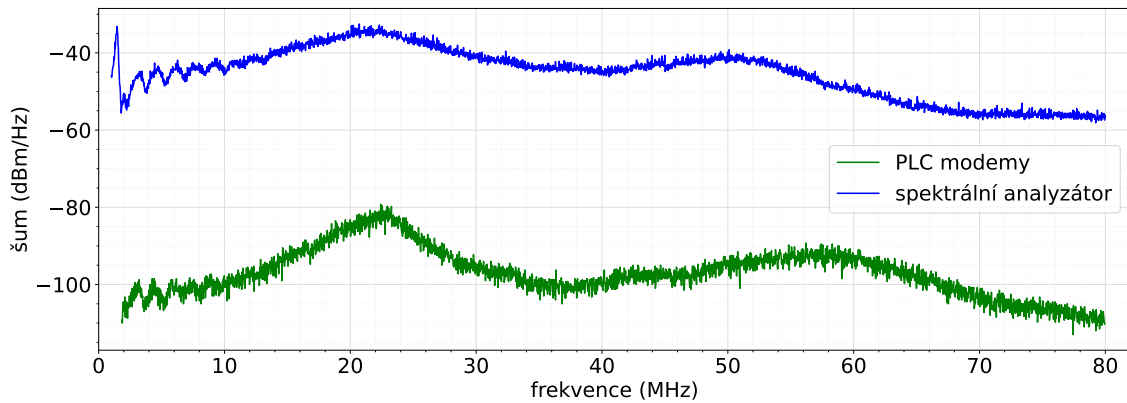


Obr. 2.2: Porovnání frekvenční charakteristiky šumu pro měření bez zapnutého rušivého elementu.

Na obrázku 2.3 opět modrá křivka znázorňuje data získaná spektrálním analyzáto-rem a zelená křivka data získaná PLC modemem. Křivky jsou od sebe posunuté o 50 dBm, ale tentokrát je vidět výrazná podobnost obou křivek. Tato podobnost tvaru průběhu frekvenční charakteristiky šumu značí, že hodnoty měřené PLC mode-rem by mohly být po zkorigování hodnot považovány jako kvalitní výsledky měření frekvenční charakteristiky šumu.

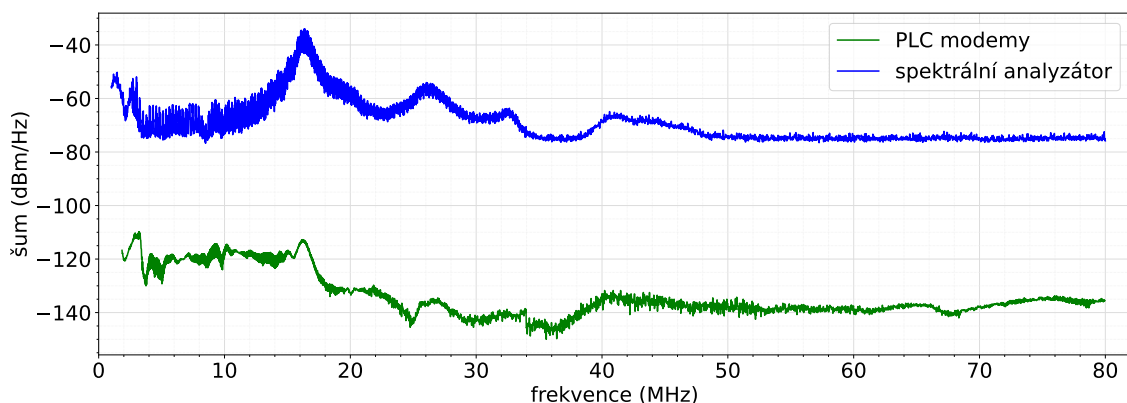
Výsledky měření při připojení reálného zařízení, a nikoliv čistě rušivého ele-mentu, jsou znázorněny na obrázku 2.4. Modrá křivka opět znázorňuje data získaná spektrálním analyzáto-rem a zelená křivka data získaná PLC modemem.

Po připojení reálného zařízení není průběh frekvenčních charakteristik na první pohled podobný, avšak po bližším prozkoumání je zde patrná jasná podobnost. Na frekvenci 16 MHz je jasně viditelný vrchol na obou dvou křivkách. Stejně tak na frekvenci 26MHz je patrný sekundární vrchol pro obě křivky, avšak nikoliv tak výrazný, jako u frekvence 16MHz. Vzájemný posun křivek je tentokrát o 70 dBm. Propad mezi



Obr. 2.3: Porovnání frekvenční charakteristiky šumu pro měření se zapnutým rušivým elementem.

30 MHz a 40 MHz je také viditelný na obou křivkách společně s konstantním průběhem od 50 MHz výše. Tento konstantní průběh je způsoben připojenou LISN, která propouští frekvence do 50 MHz.



Obr. 2.4: Porovnání frekvenční charakteristiky šumu pro měření se zapojeným zdrojem zajištěného napájení.

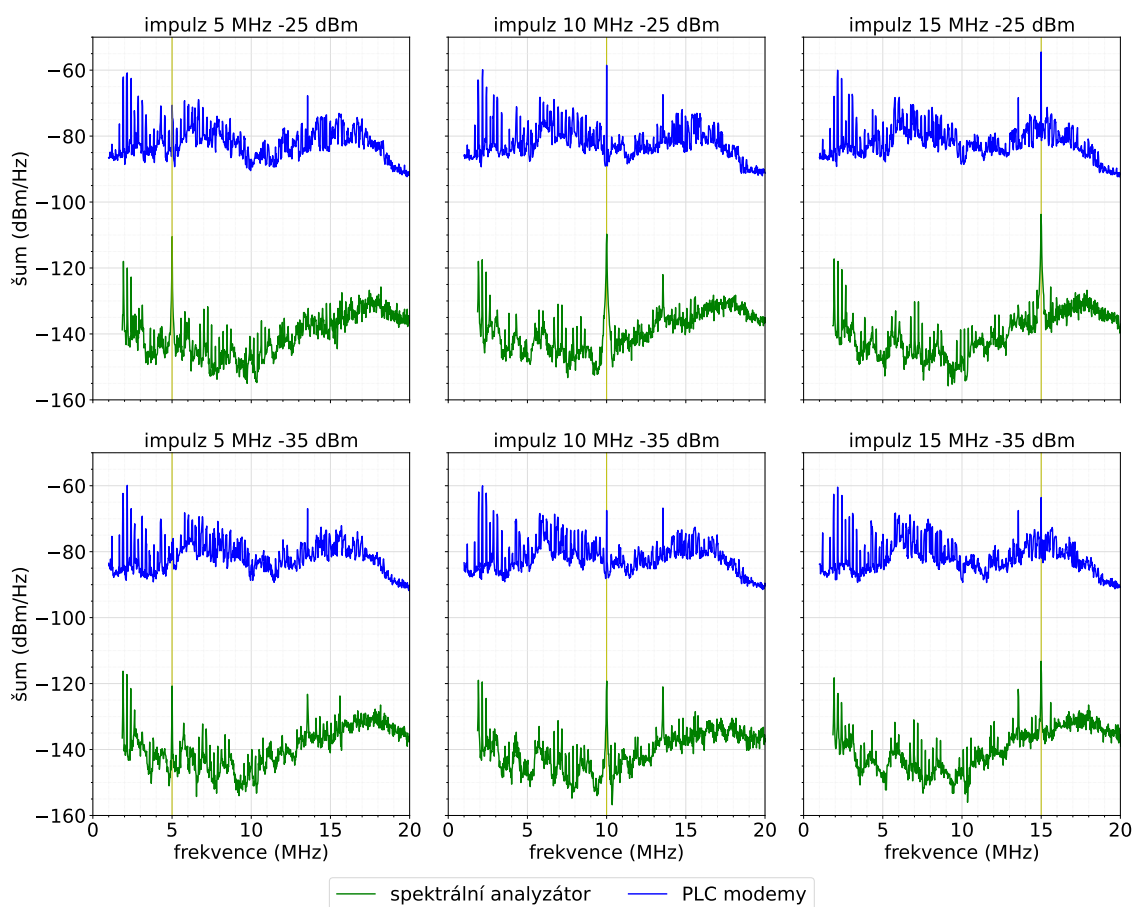
Jak je vidět na obrázcích 2.2, 2.3 a 2.4 průběhy jsou číselně posunuté přibližně o 2,2násobek své absolutní hodnoty. Pokud se průběh pohyboval kolem -50 dBm pro výsledky ze spektrálního analyzátoru, hodnoty z PLC modemu se pohybují kolem -100 dBm. To vede k závěru, že v případě potřeby by bylo možné hodnoty korigovat a tím získat poměrně přesné absolutní hodnoty měření. Tato nepřesnost měření může být způsobena funkcí PLC modemu z důvodu automatického odečtení vlastní datové komunikace PLC modemu od měřených výsledků, nebo obecně nepřesným měřicím ústrojím PLC modemu.

Nepřesnost absolutních hodnot však není podstatná pro další použití naměřených dat, pokud modemy budou poskytovat stejné úrovně hodnot výsledků, jelikož pro další použití bude použita poměrová hodnota mezi měřenými daty, nikoliv jejich absolutní hodnoty a budou použity pouze hodnoty měřené těmito PLC modemy.

Porovnání impulzních změn úrovně šumu

Na základě předešlých výsledků měření, kde z výsledků vyplývá, že PLC modemy měří tvar frekvenční charakteristiky šumu poměrně spolehlivě, byl navrhnout experiment s vložení impulzní změny ve dvou různých intenzitách na různých frekvencích.

Na obrázku 2.5 je patrná změna jak pro spektrální analyzátor (modrá křivka), tak pro PLC modemy (zelená křivka). Protože se při nízkých frekvencích vyskytuje ve spektru více impulzních skoků, jsou frekvence na kterých je vkládán impulz (5 MHz, 10 MHz a 15 MHz) označovány žlutou vertikální úsečkou.



Obr. 2.5: Porovnání impulzních změn úrovně šumu pro různé frekvence.

Na výsledcích uvedených v tabulce 2.1 je vidět, že při změně impulzní změny o 10 dBm je patrná změna pro spektrální analyzátor i pro PLC modemy. Impulz vkládaný na frekvenci 10 MHz, který je jasně viditelný na obrázku 2.5 v prostředním sloupci, má dobře viditelný pokles o 10 dBm, což potvrzují hodnoty v tabulce 2.1, kde jsou impulzy označeny jako N . Původní impulz vkládaný s hodnotou -25 dB změřil PLC modem úroveň šumu $-109,75$ dBm/Hz. Po poklesu vkládaného impulzu na -35 dB změřil PLC modem úroveň šumu $-119,25$ dBm/Hz. Pokles měřené úrovně šumu PLC modemem odpovídá poklesu velikosti vkládaného impulzu. Podobný

Tab. 2.1: Číselné hodnoty skokových impulzů.

f_{in} [MHz]	N_{in} [dB]	f_{SA} [MHz]	N_{SA} [dBm/Hz]	f_{PLC} [MHz]	N_{PLC} [dBm/Hz]
5,00	-25,00	5,00	-57,16	5,00	-110,50
5,00	-35,00	5,00	-65,63	5,00	-120,75
10,00	-25,00	10,00	-56,95	10,00	-109,75
10,00	-35,00	10,00	-65,93	10,00	-119,25
15,00	-25,00	15,00	-52,70	15,00	-110,50
15,00	-35,00	15,00	-61,78	15,00	-120,75

odpovídající pokles je vidět i pro ostatní vkládané impulzy, z čehož vyplývá, že PLC modem správně reaguje na změnu úrovně šumu.

Na základě uvedených výsledků lze usuzovat, že navzdory tomu, že měřená frekvenční charakteristika šumu PLC modemy je posunuta, projevuje se reakce na impulzní změny frekvenční charakteristiky šumu v poměrně přesné míře. Hodnoty získané z PLC modemů lze tudíž považovat za kvalitní data, která lze použít pro další řešení problematiky.

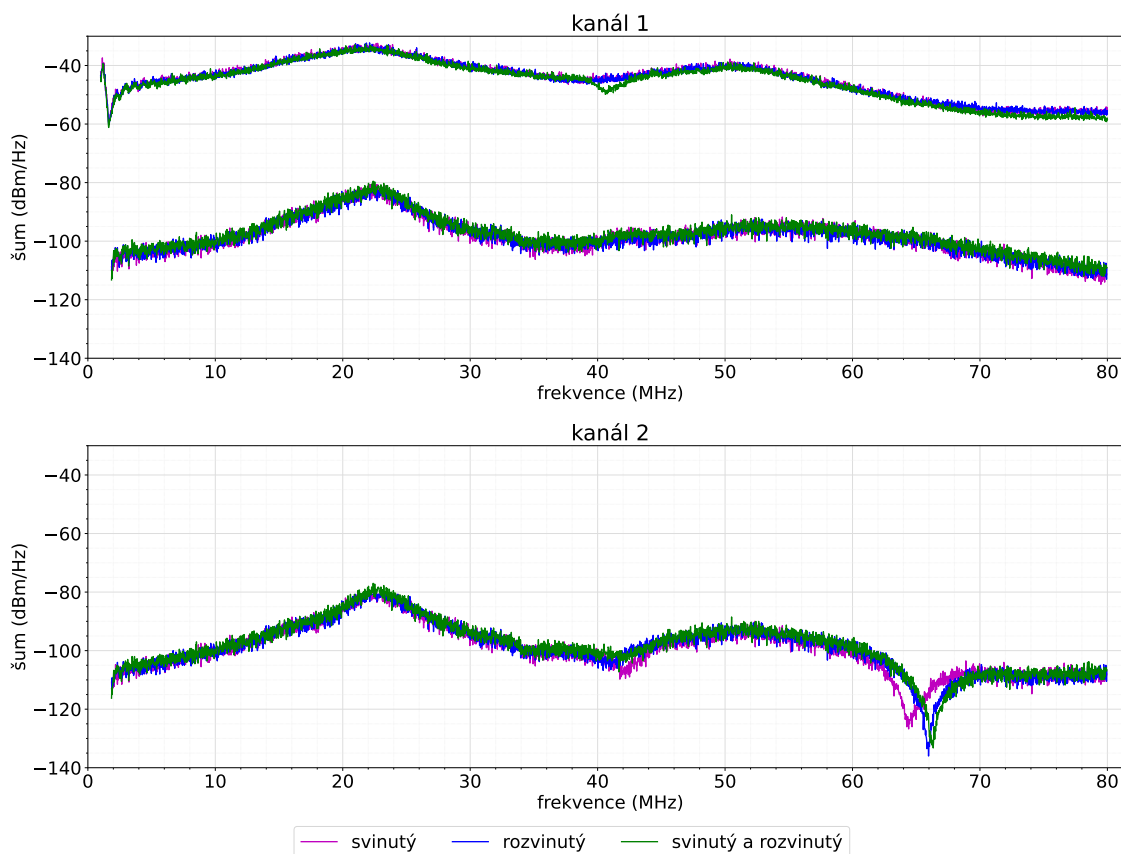
Porovnání měření frekvenční charakteristiky šumu na dlouhém vedení

Pro ověření, zda rozložení dlouhého prodlužovacího kabelu má vliv na výslednou frekvenční charakteristiku šumu bylo provedeno měření, kde byly propojeny 2 prodlužovací kabely délky 50 m a do topologie byl opět připojen rušivý element. Scénáře měření byly:

1. rozvinutý 50 m prodlužovací kabel a svinutý 50 m prodlužovací kabel (zelená křivka)
2. oba 50 m prodlužovací kabely rozvinuté (modrá křivka)
3. oba 50 m prodlužovací kabely svinuté (fialová křivka)

Jak je vidět z průběhů na obrázku 2.6, všechny tři scénáře měření se ve většině překrývají. První kanál byl souběžně měřen i spektrálním analyzátozem. Bohužel na těchto datech nevznikla žádná viditelná změna, kromě propadu u 40 MHz pro první měření. Posun dat měřených spektrálním analyzátozem potvrzuje posun dat měřených PLC modemem o 2,2násobek své hodnoty.

Viditelné změny vlivu fyzického rozložení prodlužovacích vodičů jsou zjevné na druhém kanále na frekvencích mezi 60 MHz a 70 MHz. Je zde vidět strmý propad, který se pro jednotlivá měření frekvenčně posouvá. Výrazný rozdíl je posun pro měření 3, reprezentovaný fialovou křivkou, kde oba prodlužovací kabely jsou svinuty.



Obr. 2.6: Porovnání různých fyzických rozložení prodlužovacích kabelů.

Porovnání prodlužovacích kabelů na vektorovém analyzátoru

Jelikož výsledky předešlého měření naznačovaly, že prodlužovací kabely ve svinutém stavu vykazují podobné výsledky jako v rozvinutém stavu, bylo provedeno měření na vektorovém analyzátoru.

Měřeny byly samostatné prodlužovací kabely bez připojených zařízení a bez probíhající komunikace:

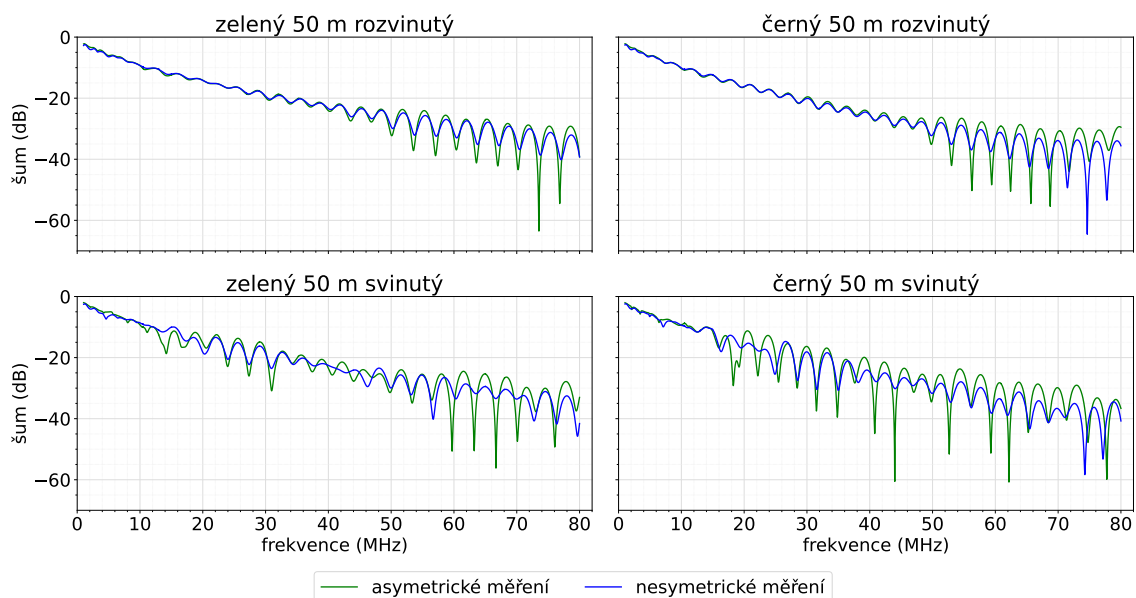
1. prodlužovací kabel černé barvy, délky 50 m, zakončen čtyřmi výstupy ve svinutém a rozvinutém stavu
2. prodlužovací kabel zelené barvy, délky 50 m, zakončen jedním výstupem ve svinutém a rozvinutém stavu
3. dva 50 m dlouhé prodlužovací kabely, oba ve svinutém a v rozvinutém stavu
4. prodlužovací kabel délky 5 m, zakončen pěti výstupy s vypínačem

Topologie měření je jednoduchá. Na první vstup vektorového analyzátoru je připojen jeden konec měřeného vodiče, na druhý vstup je připojen konec opačný. Jelikož vektorový analyzátor neposkytuje přímé připojení standardní zásuvkové vidlice, jsou použity redukce, které poskytnou dva typy měření. První typ měření je nesymetrické měření, které probíhá na vodičích L – PE. Tyto měření jsou reprezentována modrými

křivkami. Druhý typ měření je asymetrické. Zde je fázový vodič propojen s nulovým vodičem a následné měření probíhá na vodičích L+N – PE.

Na obrázku 2.7 jsou reprezentovány výsledky měření obou prodlužovacích kabelů délky 50 m. Modré křivky znázorňují nesymetrické měření a zelené křivky znázorňují asymetrické měření. Jak je vidět u spodních grafů znázorňující svinutém prodlužovací kabely, odražené vlny na vedení se výrazně projevují již od 10 MHz. Oproti tomu u rozložených vedení, které jsou uvedeny v horních grafech, se tyto odražené vlny výrazně projevují až za polovinou měřeného spektra.

Je patrné, že odražené vlny mají intenzivnější vliv na černý prodlužovací kabel, přesto, že oba prodlužovací kabely jsou vnitřně vyhotoveny ze stejných vodičů. Tento výraznější vliv je způsoben zakončením prodlužovacích kabelů. Zelený prodlužovací kabel je zakončen pouze jednou standardní zásuvkou typu E, zatímco černý prodlužovací kabel je zakončen čtyřmi standardními zásuvkami typu E.

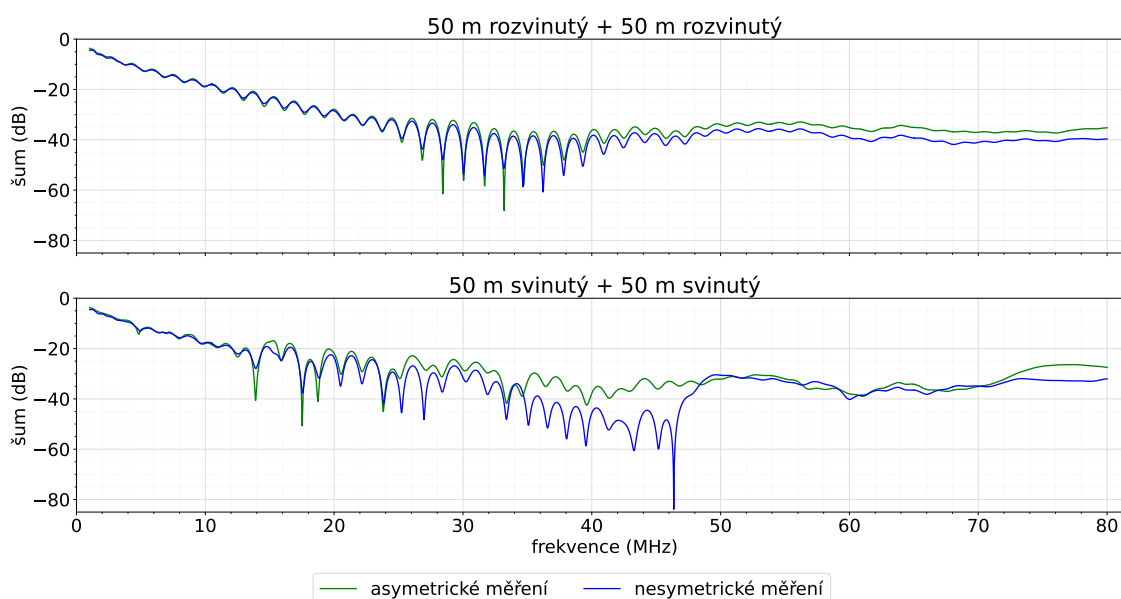


Obr. 2.7: Porovnání černého a zeleného prodlužovacího kabelu.

Propojením obou 50 m dlouhých prodlužovacích kabelů poskytlo další měření ve svinutém i rozvinutém stavu. Výsledné průběhy jsou znázorněny na obrázku 2.8. Na výsledcích měření rozvinutém prodlužovacích kabelů je patrné, že vliv odražených vln výrazně se projevují u samostatných prodlužovacích kabelů až od frekvence 50 MHz, se nyní projevuje v intervalu frekvence od 25 MHz do 45 MHz.

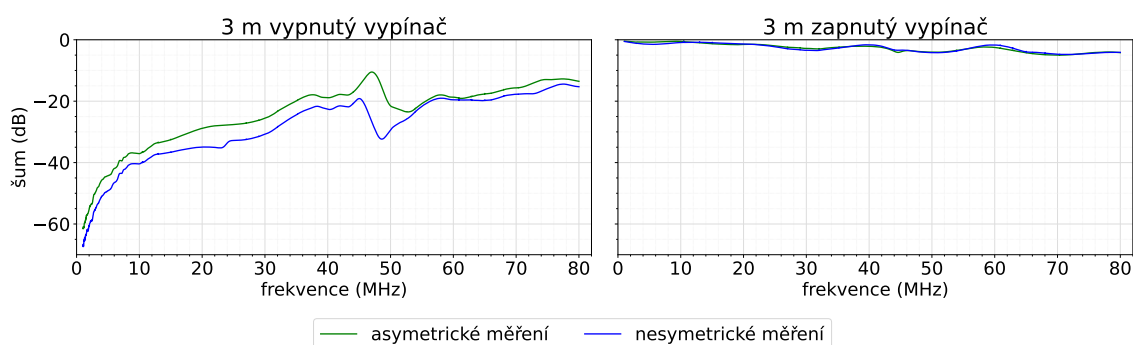
Pro měření se svinutými prodlužovacími kabely je zjevná značně nepravidelná křivka s výraznějšími skokovými propady. Výrazný skokový pokles, který se nachází kolem frekvence 46 MHz, ukazuje rezonanční frekvenci cívek vzniklých svinutím prodlužovacích kabelů. Užití této frekvence by bylo velmi problematické pro komunikaci PLC modemů, pokud by prodlužovací kabely zůstaly ve svinutém stavu. Takovýto

průběh je výrazně horší pro kvalitu získávaných dat, a ukazuje na nutnost rozvinutí prodlužovacích kabelů a jejich rozložení v prostoru, jako nutný kroky při sestavování topologie pro měření.



Obr. 2.8: Výsledky měření vektorovým analyzátozem spojení dvou 50 m dlouhých prodlužovacích kabelů.

Speciální měření založené na zapnutém a vypnutém spínači umístěném na prodlužovacím kabelu je znázorněno na obrázku 2.9. Na výsledcích je patrné, že v zapnutém stavu jsou hodnoty prodlužovacího kabelu blízké ideální nule, maximálně -5 dB. Pro zapnutý stav je zjevné, že průběh obou měření je daleko od ideální nulové hodnoty. To je způsobeno principem vypínače umístěného na prodlužovacím kabelu.



Obr. 2.9: Porovnání výsledků měřených vektorovým analyzátozem prodlužovacího kabelu v zapnutém a vypnutém stavu.

Výsledky z obrázků 2.7, 2.8 a 2.9 ukazují, že fyzické rozložení dlouhého prodlužovacího kabelu má vliv na frekvenční charakteristiku šumu. Pro další měření budou prodlužovací kabely vždy rozloženy v prostoru.

2.2 Měření pomocí PLC modemů

Měřená data o úrovních šumu na frekvencích 1,8-80 MHz jsou získávána pomocí programu XCT3.1_Rel.jar, což je proprietární program pro ovládání PLC modemů MOD957 využívající MIMO metodu měření. Tato získaná data jsou v podobě dvou .csv souborů, kde každý soubor obsahuje data jednoho kanálu. Obsahem souboru je 3200 záznamů, kde každý záznam značí frekvenci v MHz a úroveň šumu v dBm/Hz, hodnoty jsou oddělené čárkou.

2.2.1 Vybavení potřebné pro uskutečnění měření

Pro uskutečnění měření je potřeba následující vybavení.

Seznam zařízení pro uskutečnění měření:

- 2× PLC modem Xingtera MOD957
- 2× počítač se síťovým konektorem RJ-45 a operačním systémem Windows

Seznam zařízení pro vytvoření topologie měřené elektrické sítě podle obrázku 2.15:

- oddělovací transformátor¹
- 2× síťový kabel se zakončením RJ-45
- 2× prodlužovací kabel 50 m
- prodlužovací kabel 3 m
- prodlužovací kabel 2 m
- prodlužovací kabel 1,5 m
- testované elektrické zařízení

Seznam programů potřebných pro měření:

- Java
- iPerf3.exe
- XCT3.1_Rel.jar
- Wireshark

2.2.2 Postup měření

1. Příprava počítačů pro měření: Oba použité počítače mají nainstalovaný programovací jazyk Java a program iPerf3. Počítač, na který budou ukládána měřená data má navíc nainstalovaný Wireshark a připraven spustitelný program XCT3.1_Rel.jar.

Počítače s operačním systémem Windows 11 mají vytvořenou podmínku pro fungování příkazu „ping“.

¹Příkon oddělovacího transformátoru musí být dostatečný pro připojené testované zařízení. Pro měření byl použit transformátor s příkonem 763 W.

Počítač, na který budou zaznamenána data, má nastavenou IP adresu 192.168.1.3, druhý počítač 192.168.1.2, oba počítače mají masku sítě 255.255.255.0. Přestože IP adresa obou počítačů může být zvolena libovolně. Adresy byly zvoleny standardně třídy C pro lokální síť.

Firewall byl u obou počítačů deaktivován společně s antivirovými programy.

2. Sestavení elektrické sítě: Při rozkládání topologie v prostoru, především při použití dlouhých prodlužovacích kabelů, je třeba dbát na elektromagnetické vazby mezi vodiči. Je třeba vyhnout se křížení nebo zamotání vodičů. Proto byly vodiče rozkládány s pravidelnými rozestupy a jakémukoliv křížení vodičů bylo zamezeno.
3. Kontrola funkčnosti sestavené datové sítě pomocí příkazu „ping 192.168.1.x“ z jednoho počítače na druhý, kde „x“ je koncové číslo IP adresy druhého počítače.
4. Vytvoření dlouhodobého provozu mezi počítači pro simulování standardního provozu na síti.

Program iPerf3.exe je program určený pro měření parametrů datového provozu na client-server modelu. Tento model využívá principu, kde jedno zařízení (v našem případě notebook) funguje jako server a umožňuje druhému zařízení (v našem případě dalšímu notebooku, který funguje jako klient) uskutečnění komunikace. Tato komunikace je měřena a na výstup programu jsou uvedeny parametry přenosu. Mezi parametry, které lze měřit programem iPerf3.exe, je rychlost přenosu nebo třeba datový tok.

Pomocí příkazového řádku ve složce, kde je uložen soubor iPerf3.exe je z jednoho počítače vytvořen server a z druhého klient. Volba serveru a klienta může být zvolena libovolně. Pro měření byl serverem zvolen počítač, na který budou ukládána měřená data a klientem počítač druhý.

server: V příkazovém řádku spustí příkaz „iperf3.exe -s“. Tímto příkazem se počítač dostane do režimu serveru. Počítač v tomto režimu zůstává do nuceného vypnutí příkazu.

klient: V příkazovém řádku spustí příkaz „iperf3.exe -c 192.168.1.x -w 2m -t 1000s -i 1s -b 1K“ kde „x“ je koncové číslo IP adresy počítače v režimu server. Tímto příkazem bude probíhat testování rychlostí spojení mezi serverem a klientem po dobu 1000 s pokud nedojde k chybě spojení, například rozpojením sítě. Pomocí parametru „-w“ určuje velikost posílaných socketů pro měření. Parametr „-t“ udává délku trvání měření a parametr „-i“ udává interval mezi měřeními. Poslední parametr „-b“ specifikuje šířku pásma použitou pro spojení. Tento parametr je použit pro sjednocení simulovaného provozu mezi měřeními. Pokud není použit PLC modemy, používají v daný moment maximální možnou rychlost.

V příkazovém řádku na straně serveru i klienta se vypisují výsledky měření rychlosti spojení v časových intervalech 1 s. Tato dlouhodobá komunikace mezi počítači při realizaci měření rychlosti spojení je znázorněna na obrázku 2.15 modrou barvou vodiče.

5. Zprovoznění programu XCT3.1_Rel.jar pro měření šumové charakteristiky vedení.

Program po spuštění hledá dostupné PLC modemy v připojené síti. Pokud program PLC modemy nenalezne hned po spuštění, lze provést opakované hledání modemů bez vypnutí programu pomocí tlačítka „Re-discover Network“. V záložce „SNR&PSD“ se nachází menu s parametry, které lze pomocí programu pomocí MIMO měřit. Pro řešení problematiky byl zvolen parametr šum pomocí volby „NOISE“. Následně tlačítkem „View“ je spuštěno měření.

6. Záznam měření šumové charakteristiky sítě.

Aktuálně naměřené parametry lze zaznamenat ve formě .png obrázku zobrazeného spektra, nebo ve formě .csv souborů s konkrétními daty. Data jsou vždy zaznamenána pro konkrétní čas, kdy bylo stisknuto tlačítko pro uložení. Ve formě .png jsou vždy uloženy tři soubory. Jeden soubor pro každý ze dvou měřených kanálů a jeden, kde jsou zobrazeny oba měřené kanály naráz.

Při ukládání do .csv formátu jsou vždy uloženy dva soubory, každý pro jeden kanál, kde každý soubor obsahuje jeden měřený kanál. Soubor obsahuje 3200 záznamů ve frekvenčním spektru 1,8–80 MHz.

Jméno .csv souboru obsahuje informace o daném měření. Jméno soubor: „NOISE from node 1C887992BD46 to node 1C88790005B1 - PLC 100MHz MIMO Boost(CH1).csv“. „NOISE“ označuje měřený parametr, v tomto případě úroveň šumu, anglicky noise. Program XCT3.1_Re1.jar dokáže kromě úrovně šumu měřit spektrální hustotu výkonu, anglicky power spectral density (PSD) v jednotce dBm/Hz, a poměr signálu a šumu, anglicky signal to noise ratio (SNR), v jednotce dB. „from node 1C887992BD46“ je označení master modemu (DOMAIN_MASTER), „to node 1C88790005B1“ je označení koncového modemu (END_POINT) a „(CH1)“ je označení měřeného kanálu.

2.3 Měření šumové charakteristiky v průběhu dne

V průběhu dne se na reálné síti šumová charakteristika neustále mění vlivem připojování a odpojování různých zařízení, jejich používáním ve formě zapínání nebo vypínání. Typickým příkladem jsou panelové domy, kde si obyvatelé bytových jednotek během dne zapínají nebo vypínají různá elektrická zařízení.

Na tomto základě bylo realizováno měření šumové charakteristiky dne na topologii ve standardním panelovém bytě viz obrázek 2.11. Velká část propojení

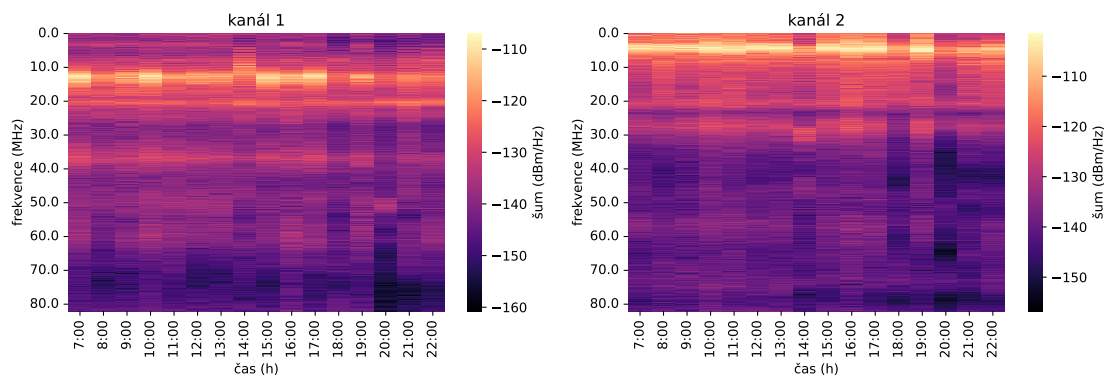
sítě mezi modemem XIB1 a XI46 je neznámá, protože propojení je realizováno vodiči vedenými stěnami budovy, které nejsou známé. U tohoto scénáře zapojení, jako jediného z uvedených měřených scénářů, nebyl pomocí PLC modemů provozován žádný komunikační provoz. PLC modemy zde byly užity pouze jako měřicí stanice.

Na obrázku 2.10 je zobrazený spektrogram výsledků měření během dne. Měření probíhalo v časovém intervalu od 7:00 ráno do 22:00 večer. Jak je patrné na spektrogramu 2.10, frekvenční spektrum šumu sítě je během dne poměrně stabilní pro oba kanály.

Přestože v topologii sítě z obrázku 2.11 nebyly provedeny žádné změny, projevíly se změny frekvenční charakteristiky šumu v časech 14:00, 18:00 a 20:00. Rozdíl hodnot je v přijatelné míře do 10 dBm/Hz.

Tyto změny jsou pravděpodobně způsobeny faktem, že zbytek sítě byl nekontrolovatelně měněn připojováním a odpojováním elektrických zařízení v okolní síti. Na změně frekvenční charakteristiky mohou mít vliv také zařízení, která mění svůj charakter v průběhu času. Standardním zařízením, který takto může nekontrolovatelně během času ovlivňovat výsledky měření je lednice která samovolně zapíná a vypíná kompresor pro udržení vnitřní teploty.

Výsledky měření dokazují že při vytváření datasetu zařízení připojených do sítě nemá skutečnost, že měření hodnot proběhlo v několika hodinovém intervalu, výrazný vliv.



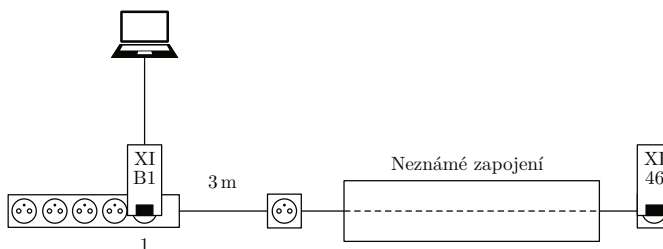
Obr. 2.10: Spektrogram výsledků měření šumové charakteristiky sítě v průběhu dne.

2.4 Topologie měření

Za účelem ověření hypotéz týkajících se detekce zařízení připojených do sítě pomocí PLC modemů, bylo provedeno několik různých scénářů měření. Každý scénář se liší zapojením topologie sítě. Pro všechny scénáře však platí, že počítač, ze kterého bylo prováděno měření, je připojen k modemu XIB1. PLC modem XIB1 pracuje vždy jako DOMAIN_MASTER a PLC modem XI47 jako END_POINT.

Topologie sítě pro měření šumové charakteristiky v průběhu dne

Topologie pro měření šumové charakteristiky v průběhu dne je základní topologie pro jakékoliv měření šumové charakteristiky pomocí PLC modemů. Jeden konec topologie se skládá z prodlužovacího kabelu, do kterého je připojen napájecí adaptér notebooku a PLC modem s označením XIB1. Prodlužovací kabel vede do zásuvky ve stěně, která je propojena neznámým způsobem s druhou zásuvkou na druhé straně bytu, kde je připojen druhý PLC modem s označením XI46.

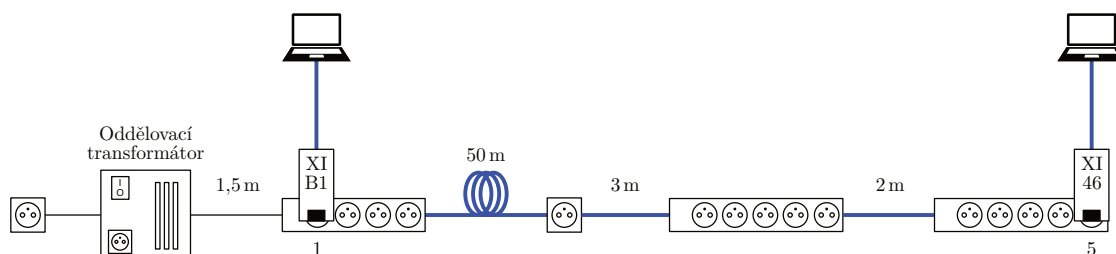


Obr. 2.11: Topologie sítě měření šumové charakteristiky v průběhu dne.

Topologie pro měření vlivu útlumu rušení oddělovacím transformátorem

Základní topologie je tvořena zdrojem elektrické energie, kterým je standardní zásuvka ve stěně laboratoře. Do této zásuvky je připojen oddělovací transformátor, do kterého jsou postupně sériově připojeny čtyři prodlužovací kabely, jak je znázorněno na schématu 2.12. Na konec sériového propojení prodlužovacích kabelů je připojen PLC modem XI46. PLC modem XIB1 je připojen na pozici 1 prodlužovacího kabelu připojeném přímo do oddělovacího transformátoru.

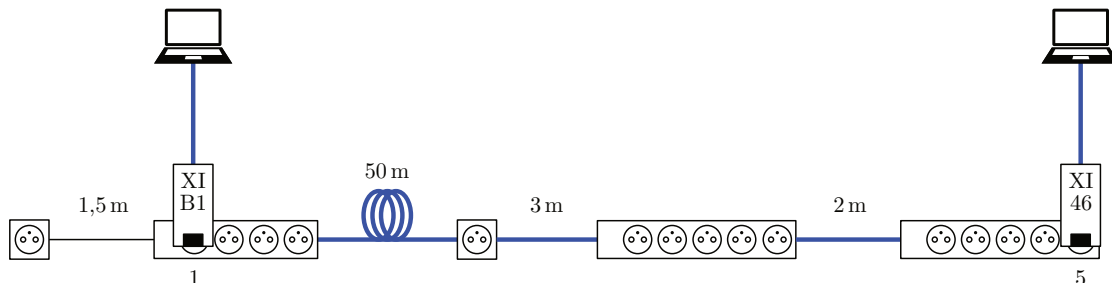
Tato topologie je za účelem měření upravována vkládáním rušícího elementu na různé pozice v síti v zapnutém i vypnutém stavu. Další úpravou je při několika měření odebrání oddělovacího transformátoru.



Obr. 2.12: Topologie měření útlumu oddělovacího transformátoru.

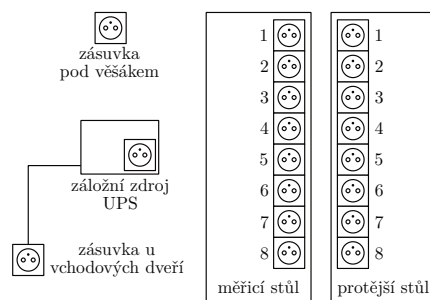
Topologie pro porovnání šumové charakteristiky zásuvek v laboratoři

Topologie je prakticky identická jako pro měření vlivu útlumu rušení oddělovacím transformátorem s tím rozdílem, že z topologie je odebrán oddělovací transformátor, jak je znázorněno na obrázku 2.13.



Obr. 2.13: Topologie pro porovnání šumové charakteristiky zásuvek.

Tato topologie je za účelem měření připojována do různých zásuvek nacházejících se v laboratoři. Zdroj rušení a oddělovací transformátor je připojován na další zásuvky v laboratoři, avšak nejsou propojeny do hlavní topologie měřené sítě. Mapa zásuvek do kterých je topologie sítě z obrázku 2.13 připojována je znázorněna na obrázku 2.14.

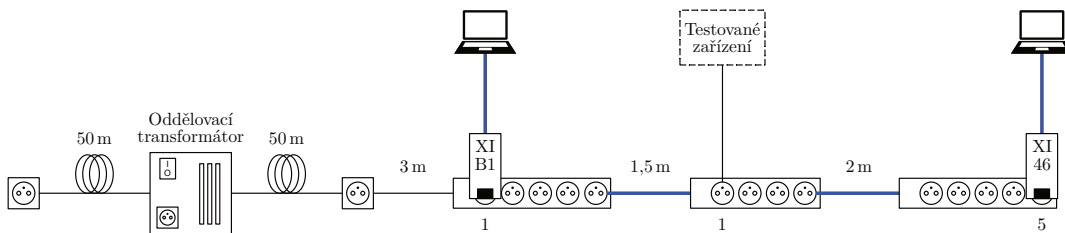


Obr. 2.14: Mapa zásuvek laboratoře.

Testovaná síť pro detekci připojení zařízení do sítě

Byly provedeny 3 scénáře měření hlavního datasetu, kde v každém scénáři byl každý stav každého zařízení z datasetu změřen dvacetkrát. Scénáře měření jsou následovné:

1. Do zásuvky u vchodových dveří je připojen prodlužovací kabel délky 50 m, do kterého je připojen oddělovací transformátor. Do oddělovacího transformátoru je připojen druhý prodlužovací kabel délky 50 m, na jehož konec jsou sériově připojeny prodlužovací kabely délky 3 m, 1,5 m a 2 m. Do prvního 3 m prodlužovacího kabelu je na pozici 1 připojen PLC modem označen XIB1, do třetího 2 m prodlužovacího kabelu je na pozici 5 připojen PLC modem s označením XI46. Do prostředního 1,5 m prodlužovacího kabelu jsou připojovány testovaná zařízení na pozici 1. Znázornění topologie sítě je na obrázku 2.15.



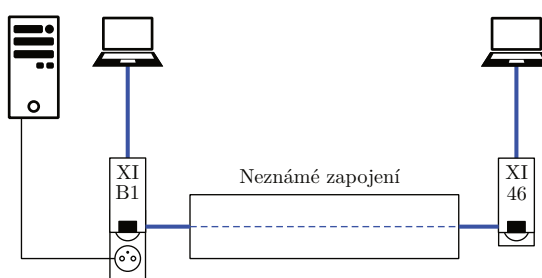
Obr. 2.15: Topologie kontrolované sítě pro měření hlavního datasetu.

2. Topologie měření je identická s měřením 1, změnou je že na začátku topologie sítě bylo odebrán oddělovací transformátor a dva 50 m prodlužovací kabely. Testované zařízení jsou připojovány na pozici vedle modemu XIB1.
3. Topologie měření je identická s prvním měřením. Změnou je odebrání oddělovacího transformátoru a jednoho prodlužovacího kabelu délky 50 m. Testovaná zařízení jsou připojovány na pozici vedle modemu XI46.

Testovaná síť pro detekci užívání počítače

Topologie pro detekci užívání počítače je podobná jako topologie pro měření šumové charakteristiky v průběhu dne. Počítač společně s PLC modemem XIB1 je připojen do dvojbřevy v kanceláři. Druhý PLC modem je zapojen na chodbě a s prvním PLC modemem je propojen neznámým zapojením elektrické sítě. Mezi modemy probíhá standardní datová komunikace.

Topologie není po připojení počítače nijak upravována, měněno je pouze užívání počítače. Do tohoto měření jsou opět zahrnuty vnější vlivy ostatních neznámých zařízení ze zbytku budovy.



Obr. 2.16: Topologie detekce užívání počítače.

2.5 Vliv útlumu rušení oddělovacím transformátorem

Pro měření vlivu útlumu rušení v síti oddělovacím transformátorem bylo vytvořeno několik scénářů ve kterých byl vkládán rušivý element na různé pozice do topologie viz obrázek 2.12. Topologie sítě byla pro měření upravena vložení rušivého elementu:

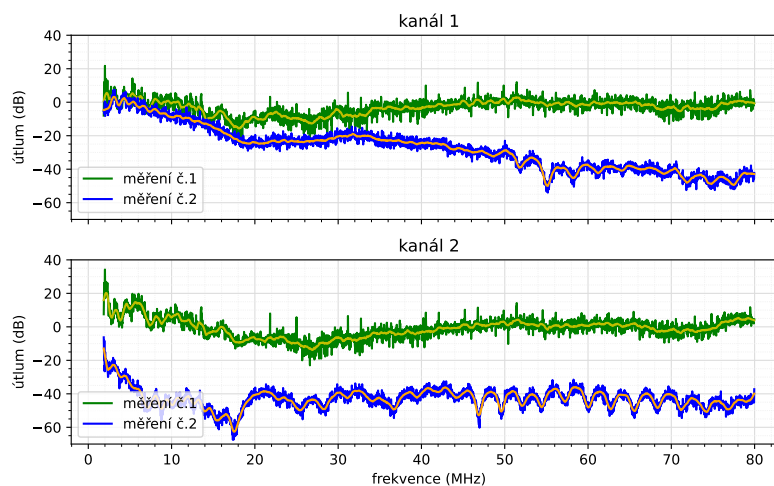
0. bez vložení rušivého elementu
1. mezi oddělovací transformátor a 1,5 m prodlužovací kabel vložen rušící element ve vypnutém stavu
2. mezi oddělovací transformátor a 1,5 m prodlužovací kabel vložen rušící element v zapnutém stavu
3. mezi zdroj elektrické energie (standardní zásuvka ve stěně) a oddělovací transformátor vložen rušící element ve vypnutém stavu
4. mezi zdroj elektrické energie (standardní zásuvka ve stěně) a oddělovací transformátor vložen rušící element v zapnutém stavu
5. mezi zdroj elektrické energie (standardní zásuvka ve stěně) a odebrán oddělovací transformátor vložen rušící element ve vypnutém stavu
6. mezi zdroj elektrické energie (standardní zásuvka ve stěně) a odebrán oddělovací transformátor vložen rušící element v zapnutém stavu
7. mezi 3 m prodlužovací kabel a 2 m prodlužovací kabel vložen rušící element ve vypnutém stavu
8. mezi 3 m prodlužovací kabel a 2 m prodlužovací kabel vložen rušící element v zapnutém stavu
9. mezi 3 m prodlužovací kabel a 2 m prodlužovací kabel vložen rušící element ve vypnutém stavu, oddělovací transformátor odebrán
10. mezi 3 m prodlužovací kabel a 2 m prodlužovací kabel vložen rušící element v zapnutém stavu, oddělovací transformátor odebrán

Zhodnocení přenosové charakteristiky sítě pro různé pozice rušivého elementu

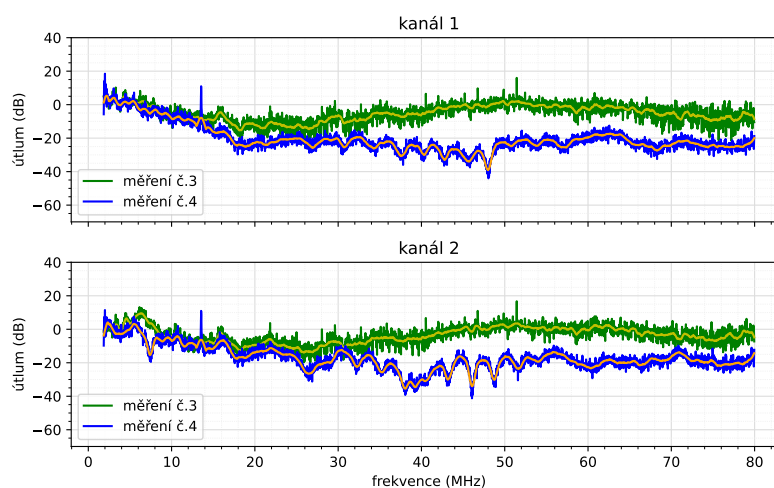
Na následujících grafech jsou vždy porovnávány měření, která jsou tvořena stejnou topologií, avšak rušivý element je jednou v zapnutém stavu, a podruhé ve vypnutém stavu.

Na obrázku 2.17 jsou znázorněny přenosové funkce pro měření č. 1 (zelená křivka), a pro měření 2 (modrá křivka). Z průběhů 2. měření se zapnutým rušivým elementem je patrné, že topologie sítě působí pro kanál 1 jako částečná dolní propust. Vlnovitý průběh, který je patrný především na druhém kanále na frekvencích 40 MHz a výše, je způsoben vkládaným rušivým elementem. Stejný vlnovitý průběh je vidět u dalších měření.

Obrázek 2.18 porovnává výsledky přenosových funkcí pro měření č. 3 (zelená křivka), a měření č. 4 (modrá křivka). Z průběhu modré křivky je patrné že od frekvence 1,8 MHz se pohybuje přenosová funkce kolem útlumu -20 dB. Tento útlum -20 dB je obecný útlum topologie. Nejvíce je tento útlum zřejmý pro měření č. 1 až č. 6 zanesených do grafů 2.17, 2.18 a 2.19. Při porovnání s měřeními 2.17 je patrný vliv oddělovacího transformátoru na potlačení rušivého elementu, zatímco při frekvencích vyšších jak 40 MHz se útlum drží stále na 20 dB a neroste.



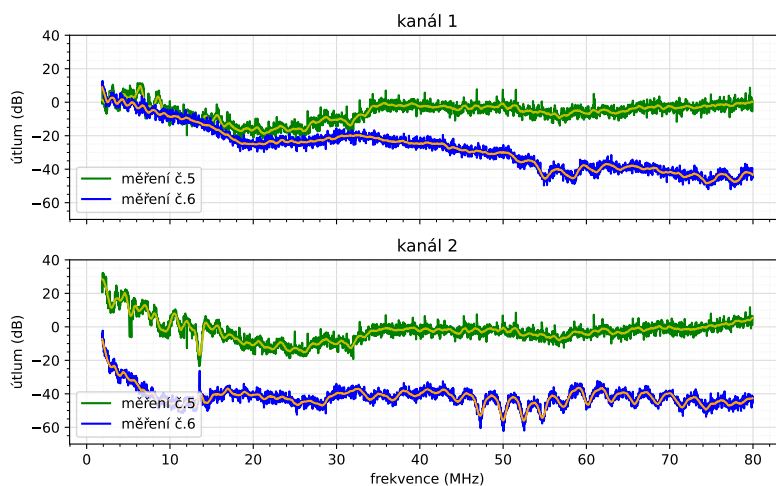
Obr. 2.17: Porovnání přenosových funkcí pro měření č. 1 a č. 2.



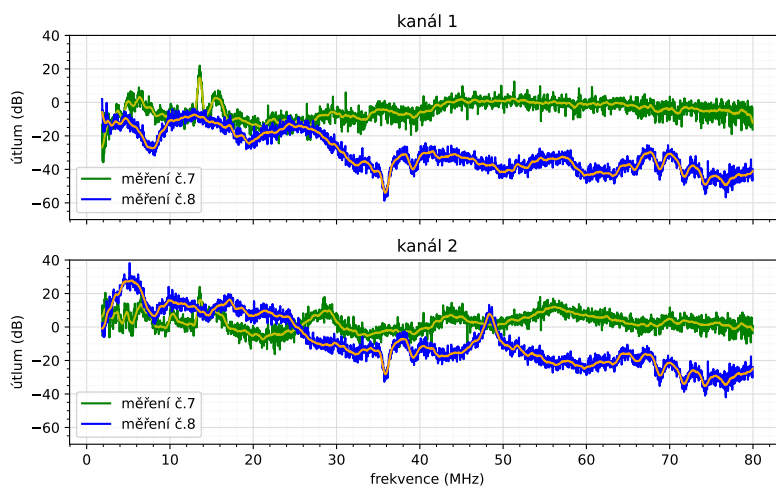
Obr. 2.18: Porovnání přenosových funkcí pro měření č. 3 a č. 4.

Z výsledků v grafu 2.19, kde zelená křivka je přenosová funkce měření č. 5 a modrá křivka měření č. 6, je zjevný vliv oddělovacího transformátoru na šum ze zdroje napájení, v tomto případě standardní zásuvky ve stěně, na topologii měřené sítě. Při porovnání s měřením č. 3 a č. 4 v grafu 2.18 je patrná, že při frekvencích 40 MHz a více, útlum pro první kanál roste. Měření se více podobá měření č. 1 a č. 2 z grafu 2.17, kde se rušivý element nacházel až za oddělovacím transformátorem a tedy nemohl být potlačen, v důsledku čehož se zvyšující frekvencí narůstá i útlum.

Zelená křivka reprezentující průběh přenosové funkce pro měření č. 7 a modrá, reprezentující průběh přenosové funkce pro měření č. 8 v grafu 2.20. Výsledky ukazují že posunutím rušivého elementu mezi PLC modemy, se rušivý element projeví výrazněji na přenosové funkci, než pro předcházející měření.



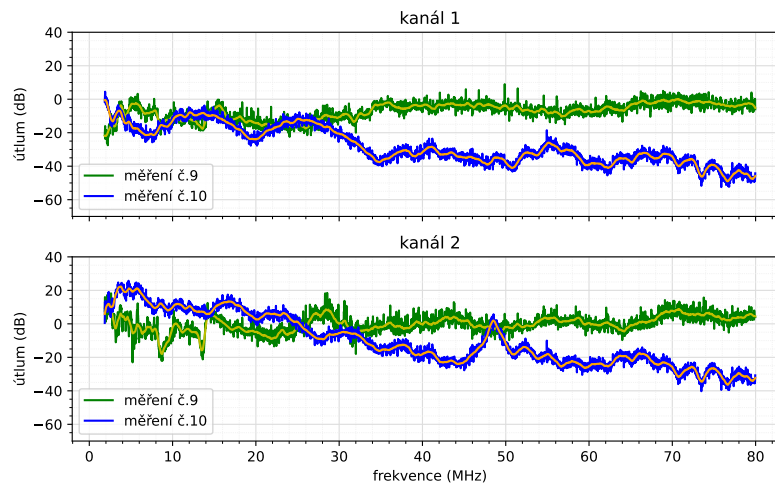
Obr. 2.19: Porovnání přenosových funkcí pro měření č. 5 a č. 6.



Obr. 2.20: Porovnání přenosových funkcí pro měření č. 7 a č. 8.

Na grafu 2.21 je znázorněna přenosová funkce pro měření č. 9 zelenou křivkou a pro měření č. 10 modrou křivkou. Z průběhu je zřejmé, že odebrání oddělovacího transformátoru oproti grafu 2.20 nemá na průběh přenosové funkce výrazný vliv. Jediná výraznější změna je skokový propad útlumu o 20 dB okolo frekvence 36 MHz.

Obecný průběh všech uvedených přenosových funkcí má tvar lineárního poklesu se zvyšující se frekvencí. Na průbězích přenosových funkcí se zapnutým rušivým elementem jsou vždy patrné vlnové průběhy, které tvoří samotný rušivý element. Častokrát jsou tyto vlnové průběhy utlumeny při nižších frekvencích samotnou topologií sítě.



Obr. 2.21: Porovnání přenosových funkcí pro měření č. 9 a č. 10.

2.6 Porovnání šumové charakteristiky zásuvek

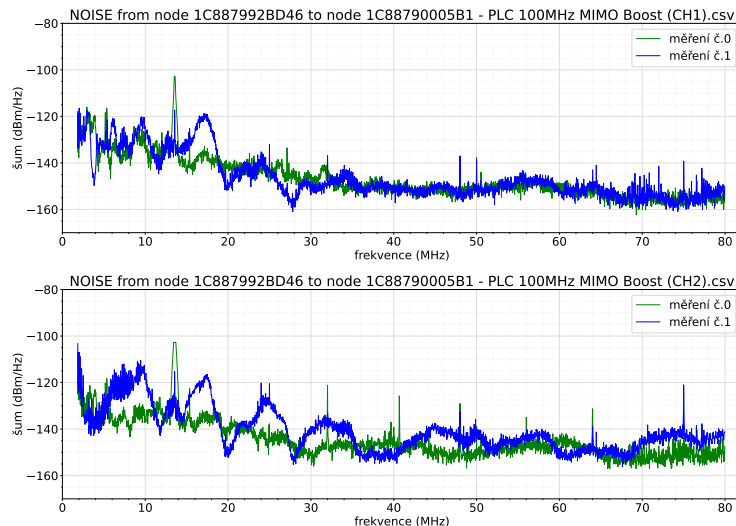
Pro porovnání šumové charakteristiky zásuvek v laboratoři bylo vytvořeno několik měřicích scénářů, kde topologie z obrázku 2.13, byla opakovaně připojována do různých zdrojů elektrické energie, konkrétně do laboratorních zásuvek a záložního zdroje UPS, znázorněných na obrázku 2.14.

Kromě samotné topologie sítě z obrázku 2.13 byl do okolních zásuvek připojován rušivý element v zapnutém stavu a oddělovací transformátor. Žádný z nich však nikdy nebyl propojen se samotnou topologií sítě. Zdroj elektrické energie, do kterého je topologie sítě připojena pro jednotlivé měření je:

0. zásuvka u vchodových dveří
1. zásuvka pod věšákem
2. zásuvka 4 na měřicím stole
3. zásuvka 4 na protějším stole
4. zásuvka 3 na protějším stole
5. zásuvka 3 na měřicím stole
6. zásuvka 3 na měřicím stole, rušení připojeno do zásuvky 8 na měřicím stole
7. zásuvka 3 na měřicím stole, rušení připojeno do zásuvky 3 na protějším stole
8. zásuvka 3 na protějším stole, rušení připojeno do zásuvky 8 na protějším stole
9. zásuvka 3 na protějším stole, rušení připojeno do zásuvky 3 na měřicím stole
10. zásuvka 3 na protějším stole, rušení připojeno do zásuvky 3 na měřicím stole, oddělovací transformátor připojen do zásuvky 4 na protějším stole
11. zásuvka 3 na protějším stole, rušení připojeno do zásuvky 3 na měřicím stole, oddělovací transformátor připojen do zásuvky 4 na měřicím stole
12. záložní zdroj elektrické energie UPS připojen v zásuvce u vchodových dveří
13. záložní zdroj elektrické energie UPS připojen na interní baterii

Zhodnocení výsledků šumové charakteristiky zásuvek

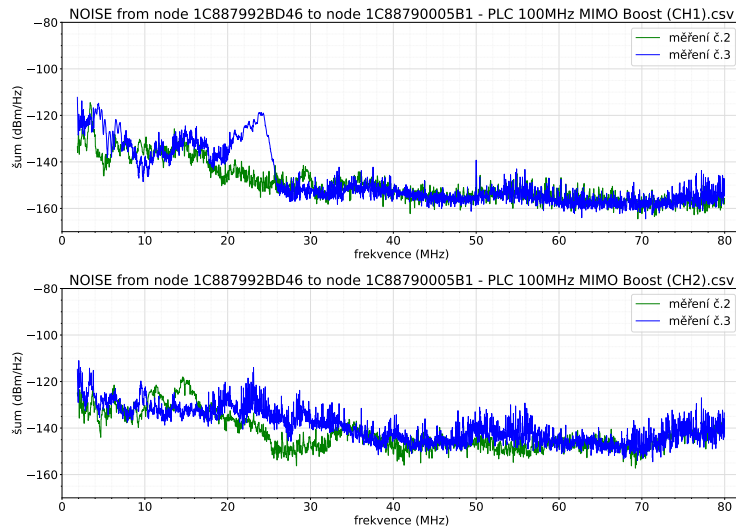
K měření zásuvek byl použit modem XIB1, umístěný co nejbližně aktuálně měřené zásuvce, aby byl co nejvíce omezen šum způsobený zbytkem topologie z obrázku 2.13. Z výsledků měření č. 0 vyplývá, že zásuvka u vchodových dveří má ze všech měřených zásuvek nejmenší úroveň šumu na obou dvou kanálech, jak je znázorněno zelenou křivkou na grafu 2.22. Jedinou výraznou vadou šumové charakteristiky je skoková změna kolem frekvence 13,5 MHz, způsobená zbytkem elektrické sítě, nacházející se ve stěnách budovy a mimo měřenou laboratoř.



Obr. 2.22: Porovnání frekvenční charakteristiky šumu zásuvek pro měření č. 0 a č. 1.

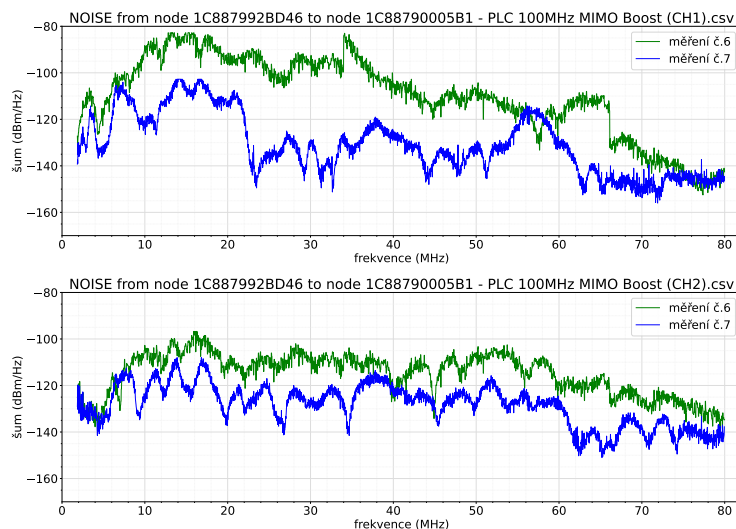
Měření č. 1, kde se měřila zásuvka pod věšákem, by teoreticky mělo mít stejnou frekvenční charakteristiku šumu jako při měření č. 0, jelikož se jedná o další standardní zásuvku ve stěně. Z výsledků zobrazených v grafu 2.22 však jednoznačně vyplývá, že v případě měření č.1 reprezentovaném modrou křivkou, je šum v této zásuvce viditelně horší, především pro druhý kanál. Horší charakteristika je pravděpodobně způsobena tím, že zásuvka je umístěna na stěně sousedící s další laboratoř, kde se nachází další neznámá zařízení ovlivňující frekvenční charakteristiku šumu elektrické sítě, a jejich vliv na elektrickou síť se projevuje na této měřené zásuvce.

Z výsledků zobrazených v grafu 2.23 je zřejmé, že zásuvka na měřicím stole, reprezentovaná zelenou křivkou, má lepší frekvenční charakteristiku šumu, než odpovídající zásuvka na protějším stole reprezentovaná modrou křivkou. Nejvýraznější rozdíl je patrný na prvním kanále na frekvencích 20 MHz až 26 MHz, kde je zjevný nárůst šumu až na -120 dBm/Hz. Rozdíly mezi frekvenčními charakteristikami šumu odpovídajících zásuvek na stolech jsou pravděpodobně způsobeny tím, že oba měřené stoly sousedí s dalšími identickými stoly s připravenými přístroji pro laboratorní úlohy, připojených do elektrické sítě. Pro měření č. 4 a č. 5 jsou frekvenční charakteristiky šumu stejné, frekvenční charakteristika šumu měření č. 4 odpovídá měření č. 3 a frekvenční charakteristika šumu měření č. 5 odpovídá měření č. 2.



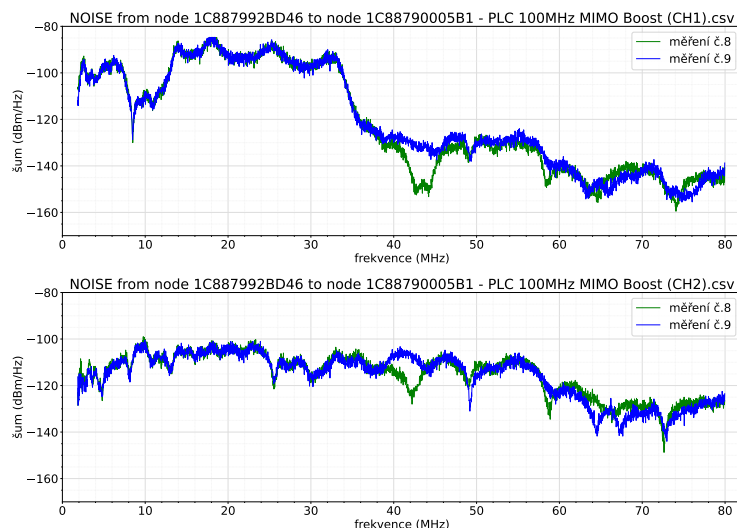
Obr. 2.23: Porovnání frekvenční charakteristiky šumu zásuvek pro měření č. 2 a č. 3.

Z výsledků grafu 2.24, kde zelená křivka reprezentuje frekvenční charakteristiku šumu pro měření č. 6, a modrá křivka pro měření č. 7, je zřejmé, že připojený rušivý element má vliv na měřicí stůl i po připojení na protější stůl.



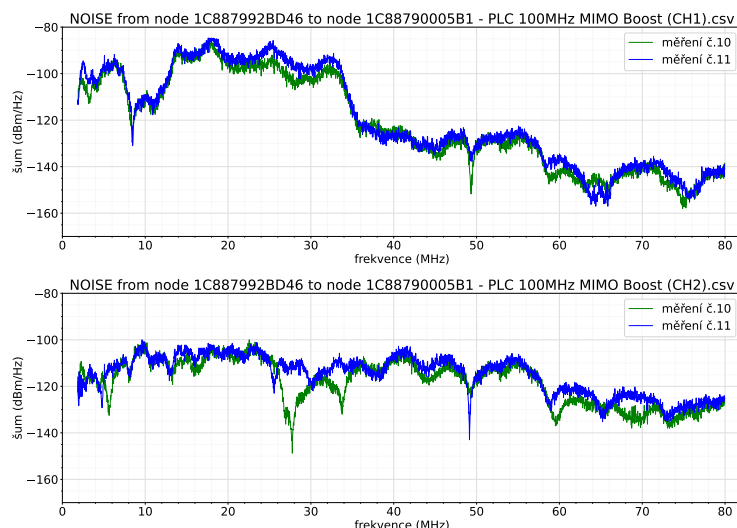
Obr. 2.24: Porovnání frekvenční charakteristiky šumu zásuvek pro měření č. 6 a č. 7.

Vliv rušivého elementu na opačný stůl potvrzuje graf 2.25, kde jsou měřené scénáře č. 8 a č. 9 zrcadlově otočené scénáře měření č. 6 a č. 7. Zelená křivka reprezentuje frekvenční charakteristiku šumu pro měření č. 8 a modrá křivka pro měření č. 9. Jak je z grafu 2.25 patrné, obě křivky se téměř po celém frekvenčním spektru překrývají. Z tohoto překrytí lze usuzovat, že zásuvky na protějším stole jsou více ovlivnitelné venkovním rušením.



Obr. 2.25: Porovnání frekvenční charakteristiky šumu zásuvek pro měření č. 8 a č. 9.

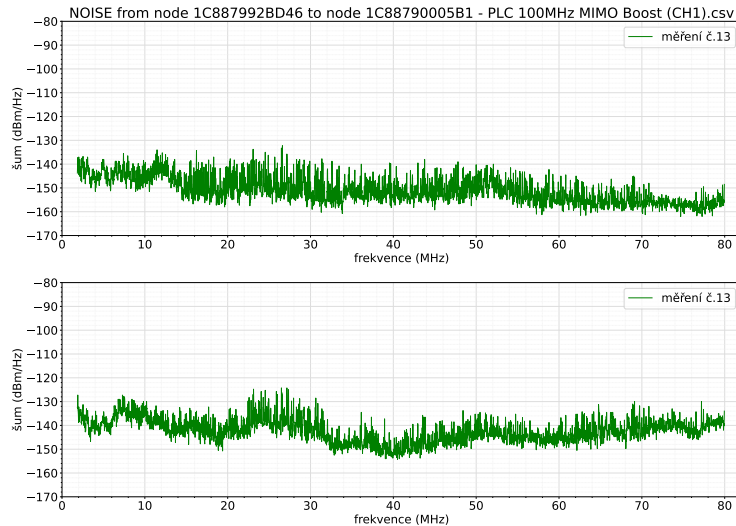
Z výsledků měření č. 10 a č. 11 vyplývá, že zapojený oddělovací transformátor, pomocí kterého není zapojena hlavní topologie sítě z obrázku 2.13, ovlivňuje frekvenční charakteristiku šumu. Z průběhu zelené křivky v grafu 2.26 je patrné, že po připojení oddělovacího transformátoru na stejný stůl jako hlavní topologie, oddělovací transformátor utlumuje šum kolem frekvence 28 MHz na druhém kanálu. Oproti tomu, po připojení oddělovacího transformátoru na opačný stůl jak hlavní topologie, dochází k výraznému útlumu v okolí 49 MHz na druhém kanálu jak je patrné na modré křivce v grafu 2.26.



Obr. 2.26: Porovnání frekvenční charakteristiky šumu zásuvek pro měření č. 10 a č. 11.

Speciální měření č. 12 a č. 13, kdy zásuvky byly nahrazeny záložním zdrojem UPS na grafu 2.27, je znázorněna frekvenční charakteristika šumu měření č. 13, která je velmi podobná frekvenční charakteristice šumu měření č. 12. Měření ukázala,

že průměrná hodnota šumu je pod -150 dBm/Hz, což je mnohem příznivější hodnota než pro měření č. 0. Z grafu 2.27 je patrné, že frekvenční charakteristika šumu má velké množství skokového zvýšení šumu, někdy téměř o 20 dBm/Hz. Toto velké množství skokových zvýšení šumu je způsobeno principem simulování sinusového průběhu o frekvenci 50 Hz záložním zdrojem UPS, který generuje sinusový signál s harmonickým zkreslením.



Obr. 2.27: Frekvenční charakteristika šumu pro měření č. 13.

2.7 Rozpoznávání neznámých zařízení pomocí strojového učení

Na základě teoretických poznatků o vlastnosti elektrické sítě, její šumové charakteristiky a vlivu připojených elektrických zařízení, byla vytvořena teoretická myšlenka možnosti detekovat připojené zařízení do sítě pomocí jejich vlivu na šumovou charakteristiku sítě.

Rozpoznávání jednotlivých zařízení bude probíhat pomocí metod strojového učení na základě natrénování modelu na předem naměřeném datasetu zařízení a jejich stavů používání.

2.7.1 Volba parametrů strojového učení

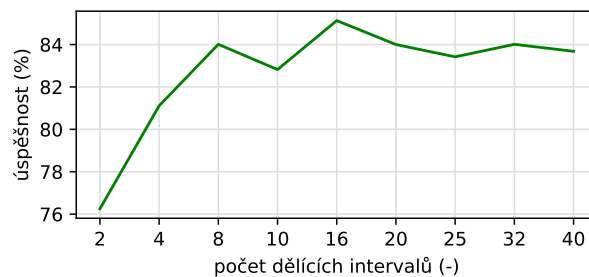
Pro detekci zařízení připojených do elektrické sítě byla zvolena open source knihovna CatBoost, fungující na principu rozhodovacích stromů. Tato knihovna poskytuje rychlé učení modelů strojového učení s vysokou přesností detekce neznámých dat a omezení nástupu přeučení modelu.

Výběr parametrů statistického zpracování dat

Naměřená data obou kanálů jsou rozdělena do frekvenčních intervalů. Následně je každý interval statisticky popsán pomocí:

- průměrné hodnoty
- minimální hodnoty
- maximální hodnoty
- nejčastěji vyskytující se hodnoty (modus)
- střední číselné hodnoty (medián)
- směrodatné odchylky

Výsledky úspěšnosti detekce ovlivňuje i počet intervalů na které je kanál rozdělen. Jak je patrné na grafu 2.28, při stejném nastavení všech zbylých parametrů se nejlepších výsledků dosahuje při rozdělení měřeného spektra na 16 intervalů. Tedy každý interval obsahuje interval 5 MHz z měřeného spektra.

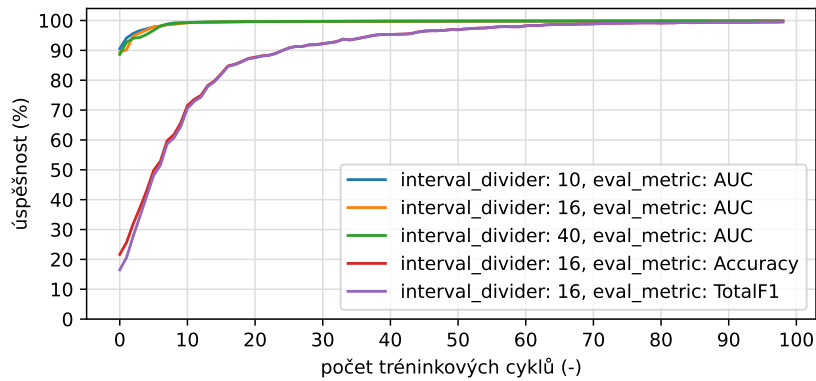


Obr. 2.28: Závislost úspěšnosti detekce zařízení na počtu intervalů.

Výběr parametrů nastavení funkce CatBoost

Pro funkci CatBoost lze nastavit mnoho parametrů pro zvýšení přesnosti učení a získávání správných výsledků. Pro trénování byly použity tyto parametry:

- „iterations“ určuje kolik tréninkových cyklů bude provedeno.
Po provedení testů při různém nastavení parametrů funkce CatBoost bylo zjištěno, že již během pár tréninkových cyklů je přesnost detekce na tréninkových datech více jak 90 %, jak je zobrazeno na grafu 2.29. Z tohoto důvodu je hodnota parametru „iterations“ nastavena na 100 iterací.
- „depth“ - určuje hloubku rozhodovacích stromů strojového učení.
Dle doporučení v dokumentaci knihovny CatBoost je ideální volit hodnotu parametru 6–10. Při hloubce 6 bylo již dosaženo uspokojivých výsledků, proto byl tento parametr zvolen pro finální výpočty na 6.
- „eval_metric“ - určuje učící vývoj parametrů pro dosažení přesnějších výsledků detekce.



Obr. 2.29: Křivky učení pro různé nastavení parametrů funkce CatBoost.

Jak je patrné z grafu 2.29 při nastavení parametru „eval_metric“ na funkci AUC je dosaženo vyšší přesnosti detekce během menšího počtu tréninkových cyklů, než u nastavení parametru na funkce Accuracy nebo TotalF1. Z tohoto důvodu byla funkce AUC použita jako finální parametr.

- „random_state“ - zamezuje náhodnosti výsledků během experimentování s nastavováním ostatních parametrů, parametr je zvolen náhodně na hodnotu 13.
- „od_type“ - typ detekce přeučení a zastavení dalších zbytečných tréninkových cyklů.

Hodnota parametru je nastavena na „Iter“ což zajišťuje, že pokud je detekováno přetrénování, je po určitém počtu iterací trénink ukončen.

- „od_wait“ - určuje kolik iterací se po detekci přetrénování pomocí „od_type“ bude vyčkávat, než dojde k ukončení tréninku.

Vzhledem k počtu tréninkových cyklů byl parametr nastaven na 20. Parametr nemá žádnou doporučenou hodnotu, jen je třeba stanovit dostatečně vysokou hodnotu, aby nedošlo k předčasnému ukončení tréninku, ale zase ne příliš velkou, aby parametr neztratil smysl. Například, pro zvolených sto tréninkových cyklů by bylo nastavení parametru „od_type“ na hodnotu 75 zbytečné, protože by k zastavení tréninku s velkou pravděpodobností nikdy nedošlo.

- „verbose“ - neovlivňuje samotné učení, pouze umožňuje výpis aktuálních hodnot během procesu učení.

Parametr je zvolen na hodnotu True pro vizuální kontrolu hodnot během optimalizace parametrů nastavení funkce.

- „use_best_model“ - po skončení učících tréninků se použije nejlepší tréninkový cyklus jako finální model.

Tento parametr společně s parametrem „od_type“, pomáhá k dosažení lepších výsledků tím, že zamezuje přetrénování a zbytečně dlouhému trvání tréninku, když se již přesnost detekce nezlepšuje.

Finální nastavení parametrů funkce CatBoost je uvedeno ve výpisu 2.1:

Výpis 2.1: Definice použitých parametrů CatBoost.

```
params={'iterations':100,
        'depth':6,
        'eval_metric':'AUC',
        'random_state':13,
        'od_type':'Iter',
        'od_wait':20,
        'verbose':True,
        'use_best_model':True}

model=CatBoostClassifier(**params)

model.fit(train, trainLabel,
          eval_set=(ref,refLabel),
          use_best_model=True,
          plot=True)

pred = model.predict(detect)
```

2.7.2 Detekce neznámých zařízení připojených do sítě

Testované elektrické zařízení

Pro tvorbu datasetu a následnou detekci připojených zařízení byly použity různé druhy zařízení, například: žárovky, ventilátor, mlýnky na kávu, stolní lampičky, počítačový monitory, stolní počítače, elektroměry a laboratorní přístroje. Některá zařízení lze využívat na různých úrovních, například ventilátor poskytuje pro zapnutý stav čtyři různé rychlosti, nebo monitor může zobrazovat různý obsah. Tato zařízení byla měřena při různém používání.

Princip detekce zařízení

Měřená data jsou načtena pro všechny tři scénáře zapojení. Tato data jsou cyklicky rozdělena do třech proměnných, aby každá proměnná obsahovala data ze všech třech scénářů zapojení. Každá proměnná je použita k jiné části strojového učení:

- train - training data - tato data jsou použita jako tréninková data strojového učení
- ref - validation data - tato data jsou použita pro řízení učení jako validační data

- detect - testing data - tato data jsou použita pro detekci modelem strojového učení jakožto neznámá data a z nich je následně vytvořena matice záměn

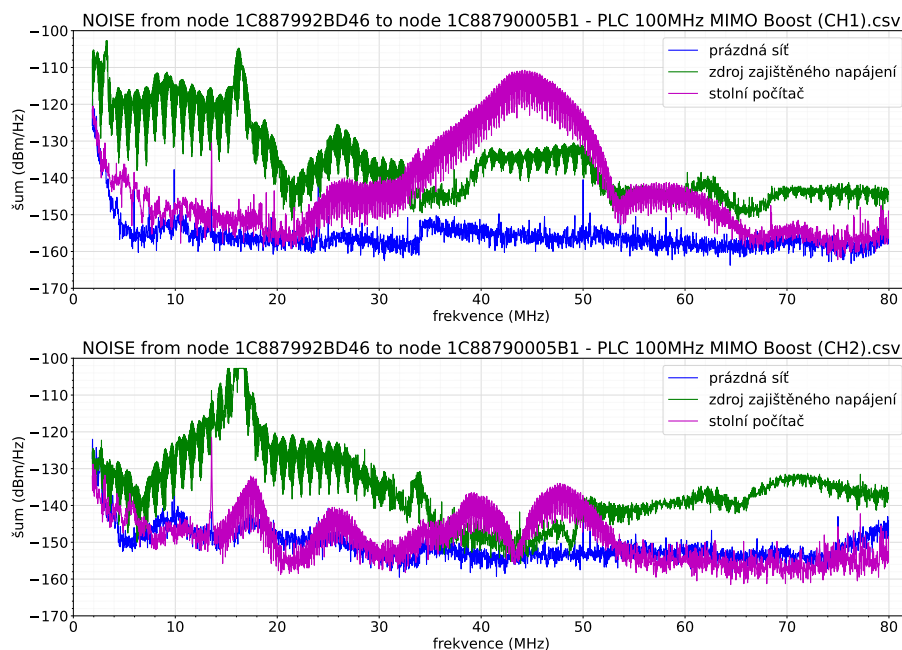
Data v proměnných train a ref jsou předána do funkce „model.fit()“ pro natrénování modelu strojového učení, jak je specifikováno ve výpisu 2.1. Následně na základě natrénovaného modulu je vytvořena predikce neznámých dat v proměnné detect pomocí funkce „model.predict(detect)“.

Výsledky úspěšnosti detekce bez kombinace měření

Byl vytvořen model strojového učení, kde pro tréninková data byla použita pouze data z prvního scénáře měření. Jako validační data byla použita pouze data z druhého scénáře měření a natrénovaný model rozpoznával data z třetího scénáře měření.

Výsledná přesnost detekce byla nízká, pouhých 20,33%. Z výsledků je však patrné, že některá zařízení mají výrazný vliv na síť, že je lze detekovat navzdory tomu, že detekce probíhá na topologii sítě od které model při tréninku nedostal žádná data.

Dobře detekovatelné zařízení jsou například: zdroj zajištěného napájení, počítačový monitor, stolní počítač a elektroměr.



Obr. 2.30: Frekvenční charakteristika šumu zařízení bez kombinace datasetů měření.

Tato zařízení byla detekována ve vysokém procentu případů, někdy až ve 100% případů, navzdory neznámosti topologie pro natrénovaný model strojového učení. Znázornění frekvenční charakteristiky šumu vybraných správně detekovaných zařízení je na grafu 2.30, použité hodnoty jsou z měření topologie na obrázku 2.15. Modrá křivka reprezentuje prázdnou síť bez připojení zařízení z datasetu, zelená křivka

reprezentuje zdroj zajištěného napájení, a fialová křivka reprezentuje stolní počítač v zapnutém stavu. Na průběhu jednotlivých křivek v grafu je patrné, že vliv těchto zařízení na frekvenční charakteristiku šumu sítě je tak výrazný, že rozpoznání těchto zařízení by bylo možné i pouhým pohledem.

Dosažené výsledky experimentu naznačují, že pro přesnost detekce na použitelné úrovni je potřeba zahrnout do tréninkových dat i data z topologie, na které bude finální detekce zařízení probíhat.

Výsledky úspěšnosti detekce při kombinaci měření

Na základě předchozího experimentu byly do tréninkových dat zahrnuty všechny tři scénáře měření. Výsledná úspěšnost detekce je 86,45 %. Z dosažených výsledků detekce lze vyvodit následující závěry.

Při detekci různých druhů žárovek vznikla velká skupina vzájemných záměn detekce. Tento fakt byl způsoben tím, že různé druhy žárovek a zářivek připojené pomocí stolní lampičky do sítě mají velmi podobná spektra. Model strojového učení téměř ve všech případech správně vyhodnotil, zda je zdroj osvětlení v zapnutém nebo vypnutém stavu. Úspěšnost detekce samotných žárovek je 76,53 %, což lze stále považovat za dobrý výsledek pokud omezíme výsledky pouze na parametr, zdali se jedná o zdroj osvětlení v zapnutém nebo vypnutém stavu, je úspěšnost detekce 98,46 %.

V případě rozpoznávání ventilátoru vznikl zajímavý výskyt chyb. Zatímco ve vypnutém stavu byl ventilátor rozpoznán ve 100 %, v zapnutém stavu vznikalo velké množství vzájemných záměn. Největší přesnost detekce vznikla pro rychlost 1 a 4, u kterých lze oba stavy poměrně dobře od sebe rozeznat.

Při detekci mlýnků na kávu vznikly podobné chyby záměnou jako při detekci žárovek, avšak výraznější chyby se vyskytovaly v případě rozpoznávání mlýnků v zapnutém stavu než ve stavu vypnutém.

Při detekci monitorů vznikly podobné záměny jako pro ventilátor. V 98 % bylo rozeznáno o jaký monitor se jedná, vznikla však záměna mezi samotným obsahem daného monitoru, kde v 1/4 případů byl obsah monitoru zaměněn za jiný. Záměna však vždy vznikla pro stejný monitor, a nedošlo k záměně monitorů.

Při omezení požadavku na přesnost detekce zařízení pouze na rozpoznání, o jaký typ zařízení se jedná, tedy všechny žárovky a zářivky, mlýnky na kávu nebo třeba monitor s různým obsahem jsou považovány za jedno zařízení, a nezáleží, zda je zařízení v zapnutém nebo vypnutém stavu, je výsledná úspěšnost detekce typu zařízení 98,61 %.

Na základě výsledků detekce lze konstatovat že pomocí PLC modemů je možné detekovat zařízení připojená do sítě pomocí strojového učení.

2.7.3 Detekce užívání počítače

Na základě dosažených výsledků z předešlého experimentu byl vytvořen nový scénář měření, pomocí kterého má být prozkoumáno, zda je možné rozpoznat různé stavy užívání počítače na standardní síti, bez přidání zařízení pro redukcí šumu.

Dataset stavů využívání počítače

Seznam typu práce na počítači, které jsou měřeny v datasetu jsou uvedeny v tabulce A.1 v příloze. V datasetu byla zahrnuta prázdná síť jakožto výchozí stav bez připojeného počítače. Dále byl počítač zaznamenán při běžné práci, v idle módu, při přehrávání 4K videa. Velkou částí datasetu bylo měření při hraní hry a při těžbě kryptoměn na různých částech hardwaru počítače.

Princip detekce zařízení

Stejně jako při detekci neznámých zařízení připojených do sítě je každý stav zaznamenaný v datasetu změřen vícekrát. V daném případě byl každý stav zaznamenaný v datasetu změřen čtyřicetkrát.

Měřená data byla načtena a rozdělena do třech proměnných, kde ze 40 měřených vzorků bylo 15 použito jako tréninková data, 15 jako validační data a zbylých 10 bylo použito k detekci naučeným modelem strojového učení a tvorbu matice záměn.

Parametry funkce CatBoost byli pro trénink použity stejné, jako pro detekci neznámých zařízení připojených do sítě, včetně rozdělení měřeného spektra obou kanálů na 16 intervalů. Jediná úprava parametru je změna hloubky.

Výsledky úspěšnosti detekce

Výsledky přesnosti detekce jsou zobrazeny v příloze v matici záměn B.1. Řádky matice značí reálné označení dat, a sloupce odhad modelu strojového učení. Maximální možný počet správných detekcí pro zařízení je 10, tedy správné rozpoznání všech neznámých vzorků. Bylo dosaženo úspěšnosti detekce modelem strojového učení 86,36 %, což je podobná hodnota jako, při detekci neznámých zařízení připojených do sítě.

Z výsledků lze usuzovat, že pomocí strojového učení lze poměrně přesně rozpoznat všechny měřené stavy. Chyby detekce vznikly u záměny standardní práce za těžbu pomocí procesoru a obráceně. Tato záměna je pochopitelná, jelikož při běžné práci byly otevírány a zavírány karty internetového prohlížeče, e-mailového klienta a podobný typ práce, který nevyžaduje práci grafických karet.

Další výrazná záměna je při rozpoznání dvou různých grafických karet, kde byly detekce vzájemně zaměněny, anebo byly označeny jako hraní hry, což je pochopitelná chyba vzhledem k tomu, že během hraní jsou grafické karty využívány. Proto vznikly dohromady čtyři záměny těžby kryptoměn na grafických kartách za hraní hry.

Závěr

Cílem semestrální práce bylo představení možností detekce zařízení připojených do elektrické sítě. V práci byly vysvětleny potencionální hrozby, které může elektrické zařízení mít na elektrickou síť.

Potřeba kontroly připojení zařízení do elektrické sítě je především pokud je v elektrické síti připojeno zařízení citlivé na vlivy vyšších harmonických, které ostatní zařízení v síti generují, jak je popsáno v teoretické části práce.

Měření vlivů připojení jednotlivých zařízení na elektrickou síť bylo pomocí PLC modemů modelu MOD957 od firmy Xingtera. Tyto PLC modemy umožňují kromě samotného posílání dat měřit provozní parametry elektrické sítě. Pro detekci jednotlivých zařízení byl vybrán šum na vedení, protože různá zařízení vykazovala nejvýraznější změny ze všech parametrů, a tedy je nejvhodnější pro způsob detekce.

Jelikož PLC modemy používané pro měření frekvenční charakteristiky šumu nejsou specializovaná zařízení pro měření, bylo provedeno porovnání výsledků měření pomocí PLC modemů s výsledky měření spektrálním analyzátozem. Výsledky ukázaly, že PLC modemy správně reagují na změnu úrovně šumu na měřeném frekvenčním spektru, avšak číselné hodnoty úrovně šumu měřené PLC modemem jsou přibližně dvojnásobné oproti hodnotám měřených spektrálním analyzátozem. Tento násobný posun hodnot nevytvářel problém pro další postup, jelikož pro další postup jsou důležité poměrové rozdíly mezi jednotlivými zařízeními, nikoliv jejich přesné hodnoty.

Měřená zařízení byly vybrány na základě teoretické části práce a následný dataset byl měřen na třech topologiích pro variaci dat použitých pro strojové učení pomocí rozhodovacích stromů. Data získaná pomocí PLC modemů byla rozdělena na kratší intervaly a následně byly intervaly statisticky popsány.

Byly vytvořeny dva modely strojového učení. První model nezahrnoval pro trénink data z topologie měření nejvíce podobné reálné topologii, ale pouze měření, kde byl šum vnější sítě redukován pomocí oddělovacího transformátoru a dlouhých prodlužovacích kabelů. V takovémto scénáři byla úspěšnost detekce pouhých 20 %. Výsledky ukázaly, že byla detekována taková zařízení, která mají výrazný vliv na frekvenční charakteristiku šumu sítě, jako například monitor nebo stolní počítač.

Druhý model zahrnoval při tréninku i měřená data na topologie nejvíce podobné reálné topologii. Výsledná úspěšnost byla 86 %. Většina chybných detekcí tohoto modelu se projevila u detekování stejných zařízení v různých stavech, například monitor s různým obsahem obrazu, kde výsledný model strojového učení správně rozeznal, o jaké zařízení se jedná, avšak zaměnil jednotlivé stavy. Při zanedbání rozpoznávání stavů jednotlivých zařízení a pouhém rozeznávání kategorií, jako například mlýnky na kávu, monitory, žárovky apod. vzrostla úspěšnost detekce až na 98 %.

Nakonec byl vytvořen speciální scénář, kde byla na reálné síti v kanceláři měřena frekvenční charakteristika šumu při různém používání stolního počítače a změřená data byla opět použita po strojové učení a následnou detekci. Úspěšnost detekce různých stavů používání počítače byla 86 %. Nejvíce záměn detekce vzniklo při rozpoznávání dvou různých grafických karet a hraní počítačové hry. Obě grafické karty jsou podobná zařízení a při hraní počítačové hry se využívají, tedy byla jejich vzájemná záměna předpokládána.

Výsledkem práce je zjištění, že pomocí strojového učení je možné detekovat různé zařízení připojené do elektrické sítě. Při přijetí určité úrovně chybovosti je možné také rozeznávat jednotlivé stavy daných zařízení. Z dosažených výsledků vyplývá, že pro správnou detekci zařízení je potřeba nejen měření frekvenčních charakteristik šumu samotných zařízení, ale i vliv na konkrétní síť, na které mají být daná zařízení detekována. Výjimkou jsou zařízení s výrazným vlivem na frekvenční charakteristiku sítě, jako například stolní počítač nebo monitor.

Literatura

- [1] MORAVEC, Jan: *Rozvodné sítě TN, IT a TT - popis, výhody a nevýhody. O energetice [online]*. Třebíč: Moravec, 2015, 9.3.2015 [cit. 2022-10-14]. Dostupné z URL:
<<https://oenergetice.cz/elektrina/rozvodne-site-tn-it-tt>>
- [2] JIŘIČNÁ, Ing. Barbora: *Elektrické sítě pro přenos energie Sítě pro střídavé napětí. Tzb info [online]*. Praha: České nakladatelství technické literatury, spol. s r.o., 2010, 18.7.2010 [cit. 2022-10-17]. Dostupné z URL:
<<https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/6647-elektricke-site-pro-prenos-energie>>
- [3] BLAŽEK, Rudolf: *Unikající proud. Co je to? A jak jej změřím?. Profi elektrika [online]*. Brno: Eximus cs, 2002, 21.01.2002 [cit. 2022-10-17]. Dostupné z URL:
<<https://elektrika.cz/data/clanky/dbromup020121>>
- [4] ČAJKA, Josef: *Elektrické signály a základní vlastnosti lineárních obvodů pro přenos zpráv. 2. vyd.* Brno: Vojenská akademie Antonína Zápotockého, 1961.
- [5] *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Praha: Sdělovací technika, 1997. ISBN 80-901-9361-7.
- [6] HUNĚK, Petr: *Eliminace elektromagnetického rušení stíněním*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Jiří Laurenc.
- [7] VLADISLAV, Kritskii: *Měření parametrů analogového záznamu*. Praha, 2016. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. František Rund, Ph.D.
- [8] LAUGHTON, M.A. a D.F. WARNE: *Electrical Engineer's Reference Book. 16th*. Oxford: Newnes, 2003. ISBN 0750646373.
- [9] MØLLER, Henrik, Michael Friis SØRENSEN, Dorte HAMMERSHØI a Clemen Boje JENSEN. *Head-related transfer functions of human subjects. 43th*. Denmark: Journal of the Audio Engineering Society, 1995.
- [10] GAGNI, Mirko, Fernando P. GUIOMAR, Stefan WABNITZ a Armando N. PINTO. *Simplified high-order Volterra series transfer function for optical transmission links. Optics Express. 2017, 25(3)*. ISSN 1094-4087. Dostupné z: doi:10.1364/OE.25.002446
- [11] CALLEGARO, Luca: *Electrical impedance: principles, measurement, and applications*. Boca Raton: CRC Press, 2013. Series in sensors. ISBN 9781439849101.

- [12] PŮR, Vratislav: *Impedanční přizpůsobení zařízení a jeho vliv na přenos informace*. Zlín, 2013. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Lubomír Macků, Ph.D.
- [13] SLÁČIK, Ján a Zdeněk KOLKA: *Síťová komunikace po napájecím vedení*. Brno, 2016.
- [14] SCHWAGER, Andreas, Daniel SCHNEIDER, Werner BÄSCHLIN, Altfried DILLY a Joachim SPEIDEL: *MIMO PLC: Theory, measurements and system setup*. *IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*. 2011, 2011, 48-53. Dostupné z: doi:10.1109/ISPLC.2011.5764447
- [15] CHAPMAN, David: *Application Note – Harmonics: Causes and Effects*. Cu0119. Brusel: European Copper Institute, 2011.
- [16] MAHESH, Batta: *Machine Learning Algorithms. 9th*. Gujarat: International Journal of Science and Research, 2018. ISSN 2319-7064.
- [17] KRÍVAN, Miloš: *Umělé neuronové sítě*. Praha: Vysoká škola ekonomická v Praze Nakladatelství Oeconomica, 2021. ISBN 978-80-245-2420-7.
- [18] HAGAN, Martin, Howard DEMUTH, Mark Hudson BEALE a Orlando DE JESÚS: *Neural Network Design. 2nd*. Lawrence: The University Press of Kansas, 2014. ISBN 978-0971732117.
- [19] A. M. Tonello, N. A. Letizia, D. Righini and F. Marcuzzi, *Machine Learning Tips and Tricks for Power Line Communications* in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 82434-82452, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2923321.
- [20] M. Somvanshi, P. Chavan, S. Tambade and S. V. Shinde, *A review of machine learning techniques using decision tree and support vector machine*, 2016 International Conference on Computing Communication Control and automation (ICCUBEA), Pune, India, 2016, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICCUBEA.2016.7860040.
- [21] S. Yadav and S. Shukla, *Analysis of k-Fold Cross-Validation over Hold-Out Validation on Colossal Datasets for Quality Classification*, 2016 IEEE 6th International Conference on Advanced Computing (IACC), Bhimavaram, India, 2016, pp. 78-83, doi: 10.1109/IACC.2016.25.

Seznam symbolů a zkratek

V	Volt	G	Elektrická vodivost	Re	Reálná část komplexního čísla
A	Ampér	B	Susceptance	Im	Imaginární část komplexního čísla
Ω	ohm	N_{in}	Úroveň vkládaného šumu	L	Fázový vodič
S	Siemens	N_{SA}	Úroveň šumu měřeného spektrálním analyzátozem	N	Nulový vodič
Hz	Hertz	N_{PLC}	Úroveň šumu měřeného PLC modemem	PE	Ochranný vodič
$^{\circ}$	Úhlový stupeň	τ	Časová konstanta	PEN	Ochranný vodič spojený s nulovým vodičem
rad	Radián	π	Ludolfovo číslo	I	Isolé
dB	Decibel	e	Eulerovo číslo	T	Terre
dBm	Decibel-milliwatt	j	Imaginární jednotka	N	Neutrė
s	Sekunda	SNR	Odstup signál-šum	C	Combinė
m	Metr	P_{signal}	Střední výkon signálu	S	Separė
t	Čas	Střední výkon šumu	$[P_{noise}]$ Střední výkon šumu	FM	Frekvenční modulace
f	Frekvence	A_{signal}	Střední hodnota amplitudy signálu	AM	Amplitudovė modulace
ω	Úhlovė rychlost	A_{noise}	Střední hodnota amplitudy šumu	PM	Fázovė modulace
φ	Fáze	X_{max}	Maximální amplituda	EMC	Elektromagnetická kompatibilita
Z	Impedance			PLC	Power-line communication, přenos po elektrické sítı
Y	Admittance				
U	Elektrické napětı				
I	Elektrický proud				
R	Elektrický odpor				
L	Indukčnost				
C	Elektrická kapacita				
X	Reaktance				

MIMO Multiple-Input Multiple-Output, Více Vstupů Více Výstupů	2D Dvojmrozměrný prostor	impedance vedení
CM common-mode	3D Trojmrozměrný prostor	LED Light-Emitting Diode, elektrolumi- niscenční dioda
UPS Záložní zdroj	LISN Line Impedance Stabilization Network, stabilizátor konstantní	PQ Power quality, kvalita elektrické energie
PC Personal computer, osobní počítač		

Seznam příloh

A	Tabulka měřených datasetů použitých pro strojové učení	85
B	Matice záměn výsledků detekce zařízení strojovým učením	87

A Tabulka měřených datasetů použitých pro strojové učení

Tab. A.1: Dataset stavů využití počítače.

Číslo měření	Typ práce	Poznámky
00	prázdná síť	-
01	PC OFF	-
02	standardní práce	-
03	těžba CPU	Intel - Core i7 2600, 95 W
04	těžba 2×GPU	-
05	těžba GPU 1	NVIDIA GeForce GTX 1080, 130 W
06	těžba GPU 2	NVIDIA GeForce GTX 1060, 130 W
07	těžba 2×GPU + CPU	-
08	hraní hry	-
09	přehrávání 4K videa	-
10	idle mode	-

B Matice záměn výsledků detekce zařízení strojovým učením

0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	0	9	0	0	0	0	0	0	1	0	
2	0	0	6	3	0	0	0	0	1	0	
3	0	0	1	9	0	0	0	0	0	0	
4	0	0	0	0	8	0	0	0	2	0	
5	0	0	0	0	0	7	3	0	0	0	
6	0	0	0	0	0	1	7	0	2	0	
7	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	
8	0	0	0	0	0	0	1	0	9	0	
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Truth

Predicted

Obr. B.1: Matice záměn výsledků detekce užívání počítače.