

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Optimalizace a bilance řízení toků energie

DISERTAČNÍ PRÁCE

PLZEŇ, 2015

ING. ALEŠ KRUTINA

Optimalizace a bilance řízení toků energie

DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu PhD

v oboru

Elektroenergetika

Autor: Ing. Aleš Krutina

Školitel: prof. Ing. Zdeněk Vostracký, DrSc., dr.h.c.

Datum státní závěrečné zkoušky: 1.11.2012

Datum odevzdání práce:

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval všem, kteří mě provázeli na cestě studiem a dodávali mi potřebnou kuráž a odhodlání.

Na prvním místě je to moje žena, která až dosud projevila velkou trpělivost, pochopení a sílu při hodinách, které jsem trávil zavřený ve své pracovně nad textem této práce.

Velmi významné místo v mém životě zaujal i můj školitel a nekonečný motivátor „Pan“ profesor Vostracký, jehož nekončící energie a optimismus mě doprovázeli po celou dobu studia, a který formoval mé názory a pohledy na svět i daleko nad rámec studia technické disciplíny.

Rád bych také poděkoval svým kolegům, které jsem měl to štěstí potkat. Jmenovitě musím zmínit Václava Ježka, Jiřího Polívku, Jaroslava Šnajdra, Luboše Piterku a Janu Jiříčkovou, kteří dokázali vést nekonečné rozhovory a diskuze nad technickými problémy a pomoci mi s pochopením administrativních procesů naší alma mater. Mimo nich bych rád poděkoval třem významným pedagogům a vědcům, které jsem měl to štěstí potkat a spolupracovat s nimi, a kteří výrazným způsobem ovlivnili moji profesní kariéru. Jsou jimi Doc. Vjačeslav Georgiev, Doc. Eduard Janeček a Prof. Miloš Šlégl.

Děkuji vám všem!

Prohlášení autora

Předkládám tímto k posouzení disertační práci zpracovanou na závěr doktorského studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Plzni, 30. srpna 2015

.....
Ing. Aleš Krutina

Anotace

Práce je zaměřena na problematiku toků energie, na způsoby jejich řízení v distribuční síti prostřednictvím komunikačních sítí a na progresivní technologie v odvětví energetika s jeho specifickými požadavky v oblasti komunikací. Jádrem práce se zaměřuje na komunikace po silových vedeních a to na úrovních nízkého i vysokého napětí. Dále je v práci představen nový systémový koncept komunikace v rámci chytré sítě a možnosti začlenění diverzních technologií; bezdrátový způsob komunikace. Práce se také zabývá legislativním rámcem a dopadem norem, které se silně dotýkají řešeného tématu. V závěru práce je řešen návrh neintruzivního vazebního prvku v planárním uspořádání na principu rogowskiho cívky a jeho začlenění do komunikačního řetězce.

Klíčová slova

energetika, komunikace, neintruzivní vazební člen, rogowskiho cívka, chytrá síť

Abstract

The thesis deals with energy flows and the ways of the grid controlling. The communication in the grid is the most significant aspect of nowadays. Therefore, the thesis is very focused on the communication aspects and a progressive technology in the meaning of power industry and its specific demands. The core of the thesis deals with the communication over the power lines on the MV and LV level. Moreover, the thesis shows new systematic concept of communication in the grid and the way of using a different technology such as wireless. It also deals with the legislative and norm restrictions which goes hand in hand with the topic. Finally, the design part of the thesis deals with the new planar design of rogowski coil as a non-intrusive coupler in the communication chain.

Keywords

coupler, communication, non-intrusive coupler, rogowski coil, smart grid

Obsah

1. Úvod	1
1.1 Motivace	1
1.2 Cíle disertační práce	2
1.3 Metodika práce	2
2. Současný stav řešené problematiky.....	3
2.1 Současný stav ve světě.....	6
2.2 Projekty a standardizace v rámci EU	7
2.3 Současný stav v ČR	7
3. Komunikační prostředky sítí VN a NN.....	8
3.1 Ripple control systems – HDO	9
3.1.1 Šíření signálu a jeho směrování pomocí line-trap.....	9
3.2 Komunikační koncept smart grid	11
3.2.1 Hierarchická struktura AMM, AMR, AMI	12
3.2.2 Možnosti řízení metodou DR.....	16
3.2.3 Standardizace konceptuálního návrhu SG a jeho dílčích prvků	17
3.3 Teorie komunikace po silovém vedení	19
3.3.1 Protokol PRIME	20
3.3.2 Protokol G3.....	23
3.3.3 Porovnání standardů PRIME a G3.....	28
3.4 Metody signálové vazby PLC	31
3.4.1 Implementace signálových vazeb	32
3.4.2 Impedanční přizpůsobení a jeho vliv na vázaný signál	35
3.5 Komunikace bezdrátovým způsobem	41
3.5.1 Protokol WM-BUS	41
3.5.2 Protokol ZigBee	43
3.6 Nové komunikační technologie	47
4. Výpočet a návrh neintruзивního vazebního prvku NN v planárním uspořádání	49
4.1 Návrh vazebního prvku	49
4.2 Analytický model a výpočet vazebního prvku	50

4.3	Simulační model vazebního prvku	51
4.4	Numerický model a návrh v systému COMSOL.....	54
4.4.1	Parametrický vstup do úlohy	54
4.4.2	Výpočty FEA.....	55
4.5	Korelace dosažený výsledků výpočtu	56
4.6	Realizace v návrhovém systému Altium	57
5.	Experimentální ověření	61
5.1	Měření šíření signálu PLC na hladinách NN a VN	61
5.2	Měření v zapojení pro měření proudu	64
6.	Přínos disertační práce	67
7.	Závěr	67
7.1	Význam a využití dosažených výsledků.....	69
8.	Literatura	70
9.	Publikace	73

Seznam obrázků

Obr. 1 - Rozhraní dle projektu OPEN Meter [14].....	7
Obr. 2 - Telegram dle specifikace ZPA Impuls-Impuls	10
Obr. 3 - Telegram dle protokolu VERSACOM	10
Obr. 4 - Mapa pokrytí signálem HDO	10
Obr. 5 - Line trap	11
Obr. 6 - Hiearchická struktura AMR s odpovědností přenesenou na utilitu	13
Obr. 7 - Hiearchická struktura AMM se sdílenou odpovědností	14
Obr. 8 - Rychlost zavádění chytrých měřidel v UK	18
Obr. 9 - Rozdělení frekvenčních pásem dle CENELEC	19
Obr. 10 - Blokové schéma vysílače PRIME [18].....	21
Obr. 11 - Datový rámec PRIME [18].....	21
Obr. 12 - Režimy činnosti uzlů v protokolu PRIME [18].....	22
Obr. 13 - Hiearchie sítě protokolu PRIME [18]	22
Obr. 14 - Struktura MAC rámce PRIME [18]	23
Obr. 15 - Blokové schéma implementace G3 (vysílač přijímač) [17]	24
Obr. 16 - Scrambler G3 [17].....	24
Obr. 17 - Konvoluční kodér G3 [17].....	25
Obr. 18 - Princip prokládání protokolu G3 [17]	25
Obr. 19 - Window funkce v protokolu G3 [17].....	25
Obr. 20 - Datový rámec G3	26
Obr. 21 - MAC rámec protokolu G3 [17].....	27
Obr. 22 - Frame control segment protokolu G3 [17].....	27
Obr. 23 - Spektrální hustota (PRIME)[18].....	29
Obr. 24 - Spektrální hustota (G3) [17]	29
Obr. 25 - Transformátorová vazba	32
Obr. 26 - Induktivní vazba feritovým kroužkem	33
Obr. 27 - Induktivní vazba solenoidem	33
Obr. 28 - Induktivní vazba přes rogowskiho cívku.....	34
Obr. 29 - Náhradní model rogovskioho cívky	34
Obr. 30 - Rogowskiho cívka v zapojení injektoru.....	35
Obr. 31 – Diference impedance v závislosti na změně převodu (výstupní impedance) [9].....	37
Obr. 32 - Diference impedance v závislosti na změně převodu (vstupní impedance) [9]	38
Obr. 33 – Koncept adaptivního vazebního prvku [9].....	38
Obr. 34 – Injektážní cívka.....	39
Obr. 35 – Frekvenční závislost indukovaného napětí [9].....	40
Obr. 36 – Řídicí deska injektáže pro zástavbu do krabice KU-68 a její blokové schéma	40
Obr. 37 - Základní struktura rámce WM-BUS.....	42
Obr. 38 - Rozšířený rámec WM-BUS	42
Obr. 39 - Specifikace aplikačních rámců dle protokolu M-BUS	42
Obr. 40 - ISO/OSI model standardu ZigBee.....	43
Obr. 41 - Frekvenční charakteristika indukovaného napětí při budícím proudu 2A.	51
Obr. 42 – Simulační schéma s potenciálovým vyrovnáním	52
Obr. 43 – Parametrická analýza zatěžovací impedance v rozsahu 5 až 20 ohmů (3kHz).....	53

Obr. 44 - Parametrická analýza zatěžovací impedance v rozsahu 5 až 20 ohmů (95kHz).....	53
Obr. 45 – Situace při komplexním zatížení (použity parametry vzdušného vedení NN).....	54
Obr. 46 - Rozložení závitů cívky na PCB – příčný řez poloměrem.....	55
Obr. 47 – Geometrie dopředného závitu	57
Obr. 48 - Geometrie vratného vodiče	58
Obr. 49 – Geometrie vratného závitu	58
Obr. 50 - Celkové uspořádání vrstev PCB	59
Obr. 51 - 3D model cívky.....	59
Obr. 52 - Ilustrativní řez cívkou.....	60
Obr. 53 – Přímé uzemnění	62
Obr. 54 – Statistika přenosu.....	62
Obr. 55 – Transformátor naprázdno	63
Obr. 56 – Statistika přenosu.....	63
Obr. 57 – Nastavení použitých modulací.....	64
Obr. 58 - Kalibrace cívky pro měření proudu.....	65
Obr. 59 - Zpracování signálu z jedné evoluce prvku	66

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Parametry modulátoru a FFT [4]	20
Tabulka 2 - Definice FCH protokolu G3 [17].....	26
Tabulka 3 - Parametry protokolů PRIME a G3 [18][17]	30
Tabulka 4 – Výstupní vazební impedance [9].....	36
Tabulka 5 – Vstupní vazební impedance[9]	37
Tabulka 6 - Režimy a přenosové rychlosti protokolu WM-BUS	41
Tabulka 7 - Clustery použité v profilu Smart Energy	45
Tabulka 8 - Zařízení definovaná profilem Smart Energy	46
Tabulka 9 - Počet závitů po obvodu desky podle čísla segmentu	55
Tabulka 10 - Vzdálenosti vrtání od středu symetrie desky (poloměry)	55
Tabulka 11 - Srovnání analytických a numerických výpočtů	57
Tabulka 12 - Naměřené parametry cívky	65

Seznam rovnic

Rovnice 1 - Rozmítaný signál.....	21
Rovnice 2 – Stanovení konstanty μ	21
Rovnice 3 – Proložení sloupce pro Interleaver G3 [17].....	25
Rovnice 4 – Proložení řádku pro Interleaver G3 [17].....	25
Rovnice 5 - Výpočet spektrální hustoty Welschovou metodou.....	29
Rovnice 6 – Rovnice vzájemné indukčnosti.....	33
Rovnice 7 – Rovnice vzájemné indukčnosti (upravená).....	33
Rovnice 8 – Rovnice závislosti impedance na transformačním poměru.....	36
Rovnice 9 – Základní rovnice pro solenoid.....	39
Rovnice 10 – Indukčnost solenoidu.....	39
Rovnice 11 – Magnetický tok solenoidu.....	39
Rovnice 12 – Vzájemná indukčnost.....	39
Rovnice 13 – Vzájemná indukčnost s koeficientem vazby.....	40
Rovnice 14 – Indukované napětí pro 3kHz (dosazení pro 2A sin signál a navržené uspořádání).....	50
Rovnice 15 – Indukované napětí pro 95 kHz (dosazení pro 2A sin signál a navržené uspořádání).....	50
Rovnice 16 – Indukčnost rogowskiho cívky (dosazení pro 2A sin signál a navržené uspořádání).....	50
Rovnice 17 – Vzájemná indukčnost rogowskiho cívky (dosazení pro 2A sin signál).....	50

Seznam symbolů a zkratk

SG - Smart Grids	Soubor opatření a technologií zvyšující flexibilitu, autonomnost a automatizaci v oblasti řízení sítí.
Embedded systémy	Někdy též vestavné systémy. Označují většinou elektronické systémy s vysokou mírou autonomie, kde klíčová a mnohdy i kritická část algoritmu je implementována přímo v daném elektronickém systému. Ke své základní funkci tedy nevyžaduje nadřazené řízení.
HDO	Hromadné dálkové ovládání. Jednosměrný způsob přenosu informace pomocí silového vedení.
SKŘ	Systém kontroly a řízení
AMM	Advanced metering management
AMR	Advanced meter reading
AMI	Advanced metering infrastructure
PpS	Podpůrné služby. Nástroj pro řízení stability soustavy.
COMSOL	Matematicko modelovací nástroj
PLC	Power line communication – komunikace po silovém vedení
BPL	Broadband power line – širokopásmová komunikace po silových vedeních
ERDF	Výzkumný institut francouzské energetiky EDF
CK CIRED	Český komitét CIRED, organizace sdružující odborníky v oboru energetika
VN	Vysoké napětí
NN	Nízké napětí
DDZ	Denní diagram zatížení
FIT	Failure in time – jednotka vyjadřující míru spolehlivosti systému. Počet poruch zařízení za jednu miliardu pohotovostních hodin.
MTBF	Mean time between failure – střední doba mezi poruchami
FMECA	Failure mode, effects and criticality analysis. Rozšíření klasické FMEA analýzy o přístup systémem Bottm-Up
DR	Demand-Response, způsob řízení pro vyrovnání DDZ
OZE	Obnovitelný zdroj energie
DTS	Distribuční trafo stanice
OFDM, DBPSK, DQPSK	Typy modulace signálu

FEC	Forward error correction, metoda pro zvýšení redundance resp. robustnosti přenášené informace
IIFT	Inverzní Fourierova transformace
FFT	Fast fourier transform – rychlá Fourierova transformace
M-BUS	Meter BUS, standardizovaná měřicí sběrnice
WM-BUS	Wlreless MBUS, bezdrátová varianta M-BUS
ISM	Industry-Science-Medical, vyhrazené frekvenční pásmo 2.4GHz
DRC	design review and check, systém kontroly návrhu plošného spoje
FEA	Finite Element Analysis - analýza pomocí metody konečných prvků
PCB	Printed circuit board, deska plošných spojů

1. Úvod

Již několik let žijeme v jednadvacátém století, jež je často označováno jako století vědy a techniky. Vývoj techniky jde po trajektorii, která již dávno překročila představy našich technických předchůdců, jakými byli T.A.Edison, N.Tesla či v minulém století W.Shockley, J.Bardeen a W.Brattain. Experimentální znalosti jdou dnes díky technice ruku v ruce i s teoretickými odhady J.C.Maxwela, J.Fouriéra či M.Planka. Dokonce i literární představy autorů J.Verna nebo A.C.Clarka jsou dnes v mnoha ohledech překonány. Postup techniky nám dává nevídané možnosti v naplňování našich představ a do velké míry předurčuje i pokrok celé společnosti. Jakým způsobem tento vývoj absorbovat a využít, aby byl co nejvíce pozitivní, je otázka pro některou z humanitních vědních disciplín. V oblasti techniky jde však o téměř nekonečný zdroj informací, námětů a vizí, které stojí za zkoumání, diskuzi či zpochybnění. Naplňování vizí či ověřování teorií vnímám jako jeden z velkých úkolů současné vědy, kdy je možné za pomoci současné techniky provádět experimentální důkazy dříve popsanych teorií.

1.1 Motivace

Právě výše zmíněné skutečnosti stály před téměř dvěma dekádami let u mého rozhodnutí pro studium techniky. Jsou to stejné cíle, které mě přivedly i ke studiu energetiky, jako velice specifického technického oboru a které jsou i základem mé motivace poznávat a zkoumat nové věci.

Motivací pro studium oboru energetika je energie sama. Je to právě energie ve všech jejích formách, která provází lidstvo již více než dva tisíce let. Její ovládnutí, ať už ve formě výroby, uchování nebo distribuce, je nekončícím během lidstva. Co je cílem tohoto běhu, je asi ta nejtěžší otázka, kterou si můžeme položit. Při pohledu do historie můžeme spatřit spoustu přelomových okamžiků, které souvisely s objevením a ovládnutím nové formy energie a které se v době před objevením zdály až utopické. Ovládnutí energie mění rozložení sil světa a zároveň významně určuje jeho hybatele. Význam a dostupnost energie pro lidstvo si bezdůkazně dovolím označit jako klíčový problém pro nadcházející století. Energie se postupně zařadila mezi základní životní potřeby, jako je voda, potrava či čisté životní prostředí, a zakládá tak i určitý humanitní étos ve vztahu člověka a energie.

Další velkou motivací této práce je vzrůstající multidisciplinarita technických oborů a s tím související nové výzvy a problémy, které toto spojení přináší. Právě prolnutí konzervativního oboru energetika s vysoce progresivním oborem elektronika bylo hlavním motivačním faktorem méj disertační práce. Řízení toků energie je ve své podstatě forma zvládnání energie jako takové, a tím i studium této problematiky nese určitý vyšší cíl zkoumání.

1.2 Cíle disertační práce

Kromě výše zmíněných motivačních cílů se tato práce ve faktické rovině zaměřuje na možnosti implementace a začleňování komunikačních prostředků chytrých sítí do současné infrastruktury distribučních sítí a to jak formou bezdrátovou, tak i formou drátovou. Dále se práce věnuje problematice signálové vazby na úrovních nízkého a vysokého napětí a návrhem tzv. neintruzivního vazebního prvku pro přenos informace po silových vedeních.

Cíle práce lze shrnout do následujících postupných bodů

- Za prvé se jedná o systémový návrh řešení s ohledem na možnosti řízení toků energií v přenosových sítích.
- V druhé rovině je pak cílem práce navrhnout komponenty, které umožní obecnou úlohu realizovat.
- V poslední fázi, jde o volbu řešení, které bude mít co nejmenší dopad na stávající infrastrukturu.

1.3 Metodika práce

Metodiku práce jsem volil s ohledem na stanovené cíle práce a dostupnost informací, techniky a softwaru tak, abych použitými nástroji dosáhl předpokládaných výsledků a zároveň minimalizoval jejich chybu. Metodou práce jsem se také snažil vyloučit či minimalizovat systematickou chybu a to zejména v částech systémového návrhu. Na základě metodických konzultací se školitelem prof. Vostrackým jsem zvolil následující postup práce:

- Důkladně budou prozkoumány dostupné prameny, zabývající se dotčenou problematikou a provedena rešerše, patentový průzkum a teoretický rozbor řešeného problému, firemní dokumentace.
- Analyzuji dostupné technologie v oblasti přenosu informace a tyto experimentálně ověřím.

- Provedu návrh vazebního prvku na základě numerického modelu z programu COMSOL a tento realizuji v návrhovém systému Altium Designer.
- Výsledky experimentálně ověřím v navržené ověřovací měřící sestavě.
- Dosažené výsledky zhodnotím a navrhnu další postup řešení problému.

2. Současný stav řešené problematiky

V současné době se v odborné komunitě již několik let hovoří o tzv. konceptu „Smart Grids“. Definice tohoto pojmu je však velmi komplikovaná a v odborných kruzích stále nezakotvená. K tomuto pojmu se momentálně přistupuje, jako k jistému souboru opatření, automatizačních prvků a algoritmů pro autonomní řízení celého přenosového řetězce. Širším pohledem lze však pod zmíněný pojem zahrnout i například sběr dat na všech úrovních sítě, prvky elektro-mobility, nové typy SKŘ atd. Smart technologie získala určitý punc obecnosti a pod slovy „Smart Grid“, neboli chytrá síť, lze tedy najít velmi širokou množinu techniky.

Hledáme-li však společný jmenovatel všech systémů a sub-systémů, které nesou označení Smart Grid, pak bude nepochybně v korelaci s bouřlivým rozvojem elektroniky, embedded systémů a především komunikačních prostředků. Komunikaci lze obecně označit jako páteř chytrých sítí, bez které celý princip chytré sítě ztrácí význam. Z kybernetického pohledu lze vzpomenout základní premisu řídicích systémů, tedy že systém, který není pozorovatelný, není ani říditelný.

V oblasti komunikací v energetice se za poslední dekádu postoupilo o významný krok kupředu. Jedná se zejména o komunikační standard IEC 61850, který hierarchicky popisuje vazbu prvků nejen v oblasti automatizace a řízení rozvodů, ale který přináší důležitý aspekt kompatibility mezi jednotlivými výrobci. Platforma, která udává trend v této oblasti, je postavena na úspěchu průmyslového Ethernetu, z něhož se v poslední dekádě stal robustní a silný nástroj, zejména v oblasti strojírenského průmyslu. S ohledem na konzervativní přístup celého odvětví energetika toto posloužilo jako jistý důkaz a ověření samotné technologie. Obecně lze konstatovat, že energetika jako taková progresivním technologiím příliš nepřeje, resp. vždy je nutné tuto technologii

ověřit ve specifických podmínkách energetického průmyslu. Na druhou stranu je potřeba říct, že ne vždy je průmyslově nasazená technologie v jiných odvětvích schopna čelit speciálním požadavkům energetiky.

Přenos informací v energetice však není úplně novou výzvou. Za posledních několik dekád byly prozkoumány a mnohdy i úspěšně ověřeny různé systémy přenosu. Jednou z nejstarších metod je komunikace po silovém vedení, která byla zkoumána už během druhé světové války a dále rozvíjena zejména v sedmdesátých letech. V ČR je tento způsob přenosu znám pod označením HDO¹ a je používán dodnes. Na tomto místě je potřeba si uvědomit, že vývoj tohoto systému má za sebou více než padesát let a proto srovnávání soudobých systémů s tímto není zcela na místě. Čtenáře jistě napadne, že pokud by se současné systémy vyvíjeli obdobně dlouhou dobu, mělo by srovnání mnohem větší relevanci. Systém HDO je ze své podstaty jednosměrný přenos informace. Mnohdy se však chybně označuje jako systém bez zpětné vazby, to však není zcela pravda. HDO nepochybně nemá aktivní zpětný kanál, avšak o působení HDO existuje zpětná informace v podobě skokové změny zatížení. Obdobné zpětné vazby bylo dříve využíváno i například pro interakci s diváky televizního programu, kdy na pokyn moderátora zvýšili svůj odběr rozsvícením světel. I v současném systému provozování HDO tedy existuje informace (zpětná vazba) o působení HDO. Na konci sedmdesátých let se začali prosazovat i technologie pro obousměrný přenos informace po silovém vedení. Jednou z úspěšných technologií zejména v USA byla implementace systému X10, kdy pomocí jednoduchého protokolu a modulace v základním pásmu bylo možné přenášet informaci na vzdálenost několika kilometrů. Při pohledu do historie protokolu X10 však zjistíme, že byl v osmdesátých letech vyvinut skotskou firmou Pico Electronics zejména pro domácí automatizaci. V obecném přiblížení je to příběh mnoha zařízení, která do energetiky vstupují na základě aplikací pro jiná odvětví. Protokol X10 však předznamenal obrovský vývoj v oblasti komunikací pro energetiku tak, jak je známe z dnešní doby. Nad standardem X10 se následně realizovala celá řada dalších vylepšení a patentů. Za všechny uvedme například článek pánů M.H.Shwehdiho a A.Z.Khan, kteří protokol X10 implementovali v roce 1996 s rozšířením o technologii modulace v rozprostřeném

¹ V anglosaské literatuře je tento princip znám pod označením „Ripple control“

spektru [1]. Princip modulace v rozprostřeném spektru je implementačně znám od poloviny devadesátých let, kdy jej představili např. pánové R.E. Ziemer a R.L. Peterson [2].

V souvislosti s přenosem informací po vedení je potřeba si uvědomit nejen naprostou nutnost interoperability, ale zejména elektromagnetické kompatibility. Smutným příběhem potvrzující nutnost těchto opatření je zřícení letu 435 společnosti Invicta v roce 1973 z Bristolu do Bazileje se 139 pasažéry na palubě. Letadlo provádělo standardní přiblížení pomocí přistávacího systému ILS (Instrument landing system) za nepříznivého povětrnostního počasí. Ve stejný okamžik došlo k vysílání na distribuční lince vedoucí rovnoběžně s prahem přistávací dráhy. Na základě této interference letadlo chybně vyhodnotilo vysílání jako signál systému ILS a pilot nastavil sestupnou trajektorii o 300m dříve. To vedlo k havárii letu, kterou nepřežilo 104 lidí.

Ironií osudu je, že PLC je od roku 2011 na základě amerického patentu (US 7868621 B2) nasazováno jako součást tzv. „safety-critical“ okruhu palubního napájení, kdy se pomocí PLC zpráv prověřují impedanční poměry na rozváděcích vodičích letadla a diagnostikuje se tak jejich potenciální narušení. Je patrné, že daná technologie je vždy pouhým nástrojem v rukou lidí a velice záleží na její implementaci. Obrovskou diskuzí na toto téma momentálně prochází Velká Británie v souvislosti se zaváděním systému BPL v distribučních sítích. Ukazuje se, že potenciál vzniku signálové interference je kolem jednoho procenta. To je však pro letecký průmysl již v kategorii vážné ohrožení. V souvislosti s technologií BPL jsou známy i výskyty rušení radiových přijímačů, které jsou zaznamenány na pacifickém pobřeží Spojených Států. Tyto a mnohé další argumenty vedou mimo jiné i k úvahám nad úzkopásmovými přenosy informací, které jsou v tomto pohledu mnohem méně nebezpečné.

Pro současný stav poznání byl důležitý i rok 2009, kdy francouzská ERDF v širším konsorciu firem vydala specifikaci úzkopásmové PLC tzv. třetí generace. Tato technologie ukázala zcela nové možnosti nasazení a využití PLC pro automatizaci zejména distribučních sítí, ale i pro systémy vzdálených odečtů. V současné době se na trhu začínají objevovat první integrované obvody, které tento systém přenosu implementují na úrovni křemíku. Velice pěkné shrnutí problematiky PLC podává profesor Ferreira z Johannesburgské univerzity ve svém

článku, na který čtenáře odkazují [3]. Další pramen, na který ve své práci odkazují je monografie profesora Fereiry a kolektivu [4].

2.1 Současný stav ve světě

V současně době se na světových fórech diskutuje zejména problematika chytrých sítí, chytrého měření a z toho plynoucí řízení spotřeby. Na tomto místě je potřeba si uvědomit, že v tomto ohledu je Česká republika ve značné výhodě oproti většině států evropské unie, což je dáno výše zmíněným systémem HDO. Tato zdánlivá výhoda však může v ČR oddálit nasazování progresivnějších technologií, a tak snížit konkurenceschopnost v oblasti české energetiky v budoucích letech.

Do vývoje chytrých sítí vstupuje v posledních letech i postoj Německa, jakožto klíčového hráče z pohledu evropského trhu s elektřinou a stability soustavy. Nutnost připravenosti sítě na budoucí začleňování nedeterministických zdrojů o velkém výkonu, navíc v masivním nasazení, ilustruje i program prosazovaný Angelou Merkelovou.

„The program, submitted by the Chancellor Angela Merkel, involves replacing 17 nuclear reactors that supply about a fifth of the nation's electricity with renewable energy, namely with offshore wind farms that will cover an area six times the size of New York City, which will require 2,800 miles of high voltage power lines, slightly longer than the distance from London to Baghdad“ [20].

V souvislosti s řízením toků energie se v zahraničních publikacích skloňuje zejména nasazení tzv. systému Demand-Response. Tento systém je podporován zejména ze strany vlády Spojených států. Při jeho nasazení lze efektivněji využívat zdroje v blízkosti spotřeby a omezit tak ztráty přenosem energie po venkovním vedení na vyšších napěťových hladinách. Při implementaci tohoto systému je potřeba vyřešit zejména způsob akvizice dat neboli měření "v reálném čase". Obecně systém Demand-Response vyžaduje přidanou chytrou soustavu zejména v koncových bodech přenosového řetězce, na oplátku však nabízí možnost implementace precizního řízení spotřeby po přesných výkonových kvantech, podporu ostrovních provozů či vyšší míru začlenění obnovitelných zdrojů např. pomocí konceptu tzv. virtuálních elektráren. Implementace zmíněného systému samozřejmě vyžaduje nasazení

možnosti nasazení zejména systémů chytrého měření v českých podmínkách. Tyto závěry pak byly představeny odborné veřejnosti v rámci konference CK CIRED 2011.

Další vývoj v této oblasti představují aktivity skupiny ČEZ v rámci projektu Vrchlabí Smart Region, který je veden formou pilotního projektu. Cílem tohoto projektu je ověřit dostupné chytré technologie pro energetiku a analyzovat možnosti jejich nasazení v prostředí České Republiky.

3. Komunikační prostředky sítí VN a NN

Komunikační prostředky chytrých sítí jsou obecně prostředky vedoucí k přenosu informace mezi řídicím a řízeným prvkem. Tato problematika se váže na řídicí a diagnostické systémy, často označované jako SKŘ². V energetice prodělaly SKŘ za poslední dekádu neuvěřitelný pokrok a v současné době tvoří robustní základ, na nějž se postupně napojují další systémy. Nevyřešenou otázkou zůstává problematika tzv. „Big Data“. Současné systémy dokáží poskytovat datové proudy v řádech gigabit za sekundu, která jsou v drtivé většině případů ukládána v datových centrech bez dalšího sofistikovanějšího využití. Tím však rostou nároky na pozdější zpracování. Na tomto problému se ukazuje, jak počítačový výkon, který stále roste, nedokáže řešit problém, pokud není podpořen správným algoritmem či systémem zpracování dat. Je patrné, že změna koncepce k větší decentralizaci SKŘ a online zpracování dat, je nevyhnutelným krokem, který energetiku čeká resp. je v některých oblastech techniky postupně zaváděn.

S pojmem chytrá síť je často také spojován pojem AMM, AMR a AMI. Tyto zkratky (viz seznam zkratek) tvoří základ systému vzdálených odečtů. Obecněji, obousměrnou komunikaci mezi odběrným místem a užitou. Tento systém tvoří základ nástroje pro řízení zátěže na straně spotřeby tzv. „Demand Site Management“. Přesto, že dnes již existuje celá řada scénářů jakým způsobem tyto systémy využívat, je celá podstata ukryta v obousměrné komunikaci,

² SKŘ – systém kontroly a řízení

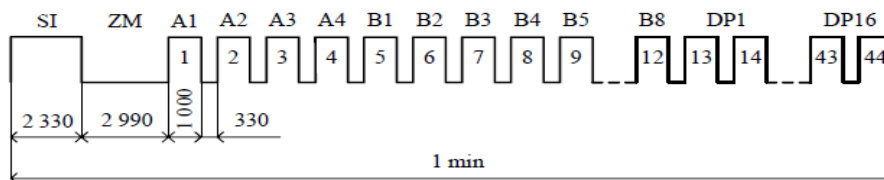
systemu správy a dostupnosti jednotlivých měřidel. V ČR však tento princip řízení zátěže není neznámý.

3.1 Ripple control systems – HDO

V Evropě byl systém hromadného dálkového ovládání implementován už v třicátých letech dvacátého století. Jejich prvotním účelem bylo kromě regulace odběru a vyrovnávání tzv. DDZ (denní diagram zatížení) také dálkově spínat veřejné osvětlení. Obecně tyto systémy pracují na frekvencích v řádu desítek až stovek hertz, které jsou superponovány na základní frekvenci 50 Hz. Nevýhodou těchto systémů je především značná energie vlastního signálu a s tím spojené nároky na napájení. Běžně se systémy HDO dodávají v kontejnerovém provedení. Při návrhu systému jako celku se musí také zohledňovat možnosti případné rezonance nebo „odsávání“ signálu HDO ostatními prvky. Problematická jsou především zařízení na kompenzaci účinníku. V oblasti HDO existují samozřejmě i mnohé další variace systému, které přidávají určitou formou zpětný komunikační kanál. V původní podstatě návrhu však nejsou a principiálně jdou proti vlastní koncepci systému HDO.

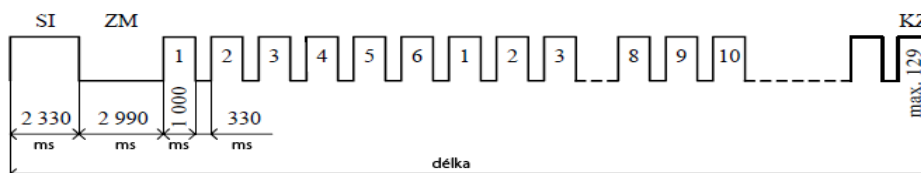
3.1.1 Šíření signálu a jeho směrování pomocí line-trap

HDO v současné době využívá několik desítek ovládacích telegramů, viz Obr. 2. Telegramy jsou koncipovány tak, aby umožňovali součinnost systémů HDO různých distributorů. Samotná regulace je dnes vykonávána automatizovaně na základě mnoha vstupních parametrů distribuční popř. i přenosové soustavy. To znamená, že oproti minulosti systém HDO reaguje i několikrát denně a celkový garantovaný čas sepnutí akumulčních zařízení je tedy rozložen do celého dne. Tím se v současné době mění význam používaného spojení "noční proud", který vnikl na základě původní myšlenky systému HDO kompenzovat či zamezit drahému odstavení parních turbogenerátorů velkých zdrojů v nočních hodinách. Z tohoto důvodu je dnes distributory označován režim působení HDO jako nízký tarif.



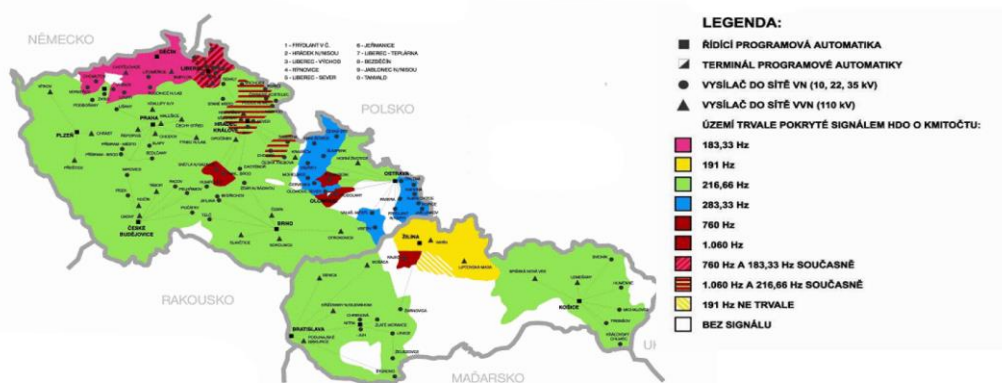
Obr. 2 - Telegram dle specifikace ZPA Impuls-Impuls (zdroj:zpa.cz)

V průběhu užívání systému HDO dochází ze strany různých výrobců i o vylepšování či rozšiřování základních funkcionalit systému. Tyto aktivity vedly i k vydání tzv. VERSACOM protokolu, viz Obr. 3, který je standardizován normou DIN 43861 a který nabízí rozhraní systému nezávislé na výrobci HDO komponent. V tomto standardu lze najít i funkcionality, o kterých se dnes bouřlivě diskutuje v odborných kruzích, jako je např. dálkové odpojení neplatičů.



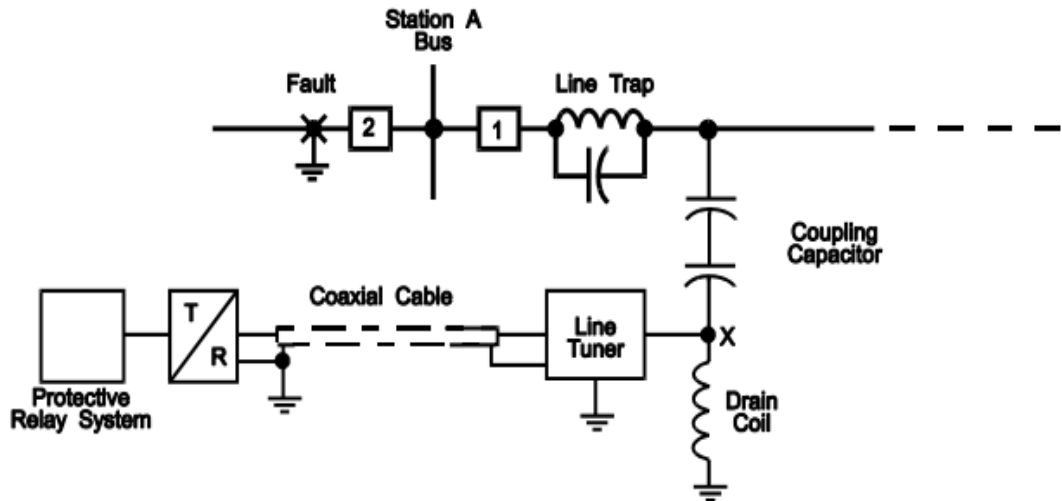
Obr. 3 - Telegram dle protokolu VERSACOM(zdroj:zpa.cz)

Lze konstatovat, že systém HDO je v ČR dobře zavedený, poměrně efektivně fungující systém řízení spotřeby, přesto je třeba poznamenat, že ani HDO nemá 100% pokrytí, a tedy efektivitu viz Obr. 4. Z pohledu chytrých sítí je paradoxně tento dobře fungující systém do budoucna možnou přítěží či blokujícím argumentem pro přechod na nové technologie, které v současné době vstupují do energetického průmyslu. Energetika je však obecně velice citlivý a důležitý segment průmyslu a mírný odstup od nejnovějších trendů může napomoci pozdější kvalitní a bezpečné implementaci chytrých systémů.



Obr. 4 - Mapa pokrytí signálem HDO (zdroj:čez.cz)

Následující obrázek demonstruje princip směřování signálu HDO pomocí tzv. signálových pastí. Princip je zcela zřejmý, ve větvi přípojnice je nainstalována pásmová zadrž. Nevýhoda takového řešení je zřejmá také na první pohled, jedná se totiž o podélnou větev a to znamená problémy s proudovým a napěťovým dimenzováním prvků.



Obr. 5 - Line trap (zdroj: abb.com)

Na obrázku je taktéž patrný základní princip vazby signálu a to intruzivní metodou přes vazební kapacitor a tlumivku. Blok „Line tuner“ má pak za úkol přizpůsobení injektovaného signálu vůči vedení. To však s proměnnou impedancí sítě není triviální úloha, a tak se prakticky volí empirická hodnota v místě instalace.

3.2 Komunikační koncept smart grid

Základní otázka přetrvávající v odborných kruzích již několik let zní: „Co je to smart grid?“. Jedním z cílů této kapitoly je, pokusit se na tuto základní otázku odpovědět v souvislostech. Původní myšlenka, která stála na začátcích konceptu smart grid byla vysokou měrou zautomatizovat manipulace v soustavě nebo automatizovaně získat veškeré dostupné informace pro rozhodování o těchto manipulacích. Na tomto místě je také potřeba si uvědomit, že koncept chytré sítě nevznikl přes noc. První hmatatelnější myšlenky byly představeny již kolem roku 2000, a to především ve vztahu k obdobnému konceptu tzv. mikro sítí. Při úvahách o mikro sítích bylo nutné počítat s vysokou mírou samoregulace takovýchto malých vydělených ostrovních provozů a začalo se s hledáním

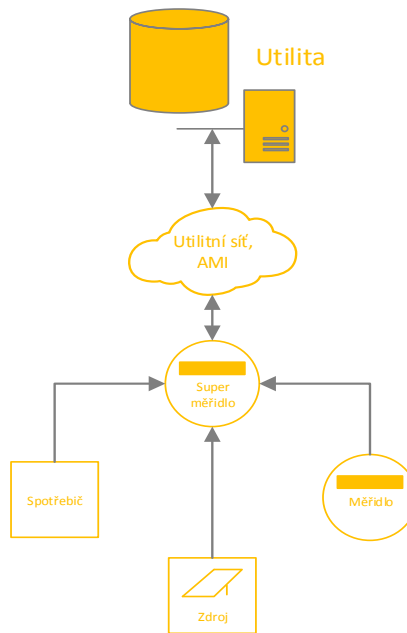
konceptu řízení těchto sítí. Jednou z prvních mikro sítí uvedených do provozu byla 9.9.2009 síť CAT (centrum pro alternativní technologie) ve Walesu. Zajímavostí je, že původní teoretické principy byli představeny již v publikaci z roku 1977 s názvem „An Alternative Energy Strategy for the United Kingdom“. Za pionýrské projekty chytré sítě se však často označují především dva, a to italský systém Telegestore z roku 2005 postavený na technologii BPL a systém radiové mesh sítě realizovaný roku 2003 v Austinu v Texasu.

Je nutné si uvědomit, že velkým přelomem v interoperabilitě systémů znamenal standard IEC61850, který po dlouhých letech přinesl alespoň teoretickou možnost propojovat budoucí energetické systémy. Zde je potřeba poznamenat, že pracovní skupina se k normě sešla poprvé roku 1995, tj. uplynulo již 20 let od prvního konceptu, a ani po dvaceti letech není norma plně implementována. I to je znakem oboru energetika a je patrné, že konceptuální změna systému je skutečně záležitostí jedné generace inženýrů. Zásadní přínos IEC61850 není ani tak ve zvolené technologii postavené na průmyslovém ethernetu, ale na struktuře průmyslových systémů, které tato norma převzala. To totiž umožňuje distribuovaný a vrstvený přístup k systému jako celku a zároveň to dává možnost systému růst do šířky, tj. absorbovat nové budoucí technologie. Velkým adeptem z pohledu nových technologií jsou i systémy vzdálených odečtů. Diskuze, v rámci které na úplném začátku padají argumenty poukazující na vyrovnanost systému HDO a AMM, je z pohledu roku nula technologie AMM více než lichotivá. Dá se předpokládat, že elektronické systémy se z pohledu vývoje nevydají zpět, ale spíše se dočkáme značného vylepšení.

3.2.1 Hierarchická struktura AMM, AMR, AMI

Při uvažování o tom, jakou strukturu by automatizované odečítání mělo mít, se nabízejí dva konceptuálně odlišné scénáře. Základní hledisko není, jak by mohlo čtenáře napadat, v technické implementaci, nýbrž v rovině rolí a odpovědností za přenosový řetězec.

První scénář vychází z myšlenky, že utilita jako správce a uživatel dat musí zaručit bezpečný a správný přenos dat od zákazníka do informačního systému utility. Tento scénář demonstruje následující obrázek.



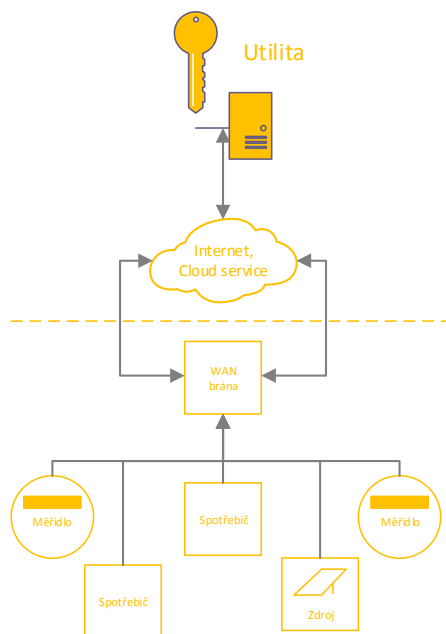
Obr. 6 - Hierarchická struktura AMR s odpovědností přenesenou na utilitu

Uvažujme tedy scénář, kdy za celý přenosový řetězec odpovídá utilita. Tento koncept má několik aspektů, které je potřeba rozklíčovat. Základním předpokladem tohoto konceptu je existence jakéhosi „super měřidla“, které dokáže fungovat zároveň v několika režimech, a to jako měřidlo elektrické energie, jako nadřazené měřidlo ostatních měřidel a jako distribuovaná řídicí jednotka pro zdroje a spotřebiče. Z výčtu je patrné, jak velké požadavky na dané zařízení plynou z pohledu rozhraní, kterými toto zařízení musí být vybaveno a jak sofistikovaná bude muset být implementace daného zařízení. Zároveň je zřejmá i klíčová role v přenosovém řetězci.

Předpokládejme nyní existenci takového zařízení s vyřešenými specifikačními problémy. Dalším význakem popisovaného konceptu je zodpovědnost za kompletní přenosový řetězec. Je tedy rolí a odpovědností distributora přenést informaci po infrastruktuře, kterou vlastní nebo poptává po třetí straně pro daný účel. V tento okamžik musí však utilita nebo jí pověřená spolupracující entita spravovat komunikační kanál ke každému měřidlu, což představuje nezanedbatelný logistický, personální i finanční aspekt. Jediná objektivní výhoda tohoto řešení je, že při využití stávající infrastruktury je vstupní investice zdánlivě malá. Z pohledu koncepce systému je jistě zajímavým tématem k zamyšlení, jakým způsobem by bylo možné tento přenosový řetězec rozdělit na izolované části, nebo dokonce dílčí část svěřit třetí straně, tak jako konvenční odečty

elektroměrů, při zachování parciální bezpečnosti všech rozhraní přenosové cesty.

Představme si nyní alternativní koncept, který spočívá ve sdílené odpovědnosti za odečet, a který demonstruje následující obrázek.



Obr. 7 - Hierarchická struktura AMM se sdílenou odpovědností

Analogií je ve své podstatě stávající stav, kdy zákazník musí umožnit odečet svých měřidel, tzn. je to jeho role i odpovědnost. Je otázkou, zda forma „umožnění odečtu“ je skutečně natolik zásadní a měla by být striktně určena normou. Nemůže být náhodou ponechání zvolení formy přenesení informace o stavu měřidla na zákazníkovi zásadním přínosem do konceptu automatizovaných odečtů a zároveň liberalizací v této oblasti, jak požaduje evropská komise? Jsem přesvědčen, že ano.

Tento koncept přináší po technické stránce požadavek na existenci zařízení pracujícího v režimu komunikačního rozhraní, které musí umožnit odečet měřidel přes standardizované rozhraní a nabídnout řídicí funkce spotřebičů a zdrojů. Pozornému čtenáři jistě neuniklo, že oproti předešlému konceptu, však neklade žádné požadavky na interoperabilitu měřidel mezi sebou. Redukuje tedy problém kompatibility zařízení z principu M:M na 1:M tj. z mocinné závislosti na lineární, která je dnes výrobcí elektronických systémů v jiných oblastech bez problémů dosažitelná. Oproti tomu koncept M:M je prakticky nedosažitelný a bude vždy pro část trhu diskriminační.

Mnohem zajímavější je na tomto konceptu však rozhraní vůči utilitě, které je otevřené. Představíme-li si tuto situaci do důsledku, můžeme v tomto konceptu hovořit o *unbundlingu* i v oblasti odečtů, tj. neexistuje potřeba těsné vazby mezi zákazníkem a distributorem (zároveň tato vazba není popřena) a celý proces odečtu může nabízet třetí strana, tj. obdoba stávajícího stavu. Zároveň je zde zcela otevřena forma přenosu informace od zákazníka k distributorovi. Z technického hlediska by distributor pouze specifikoval rozhraní do jeho informačního nebo řídicího systému, které v jeho oblasti musí komunikační brána nebo vyšší řídicí stupeň dodavatelského systému třetí strany implementovat pro oblast distribuce, a minimální reaktivní dobu odběrného místa, která je dána rozdílem času od povelu k akčnímu zásahu. To jakým způsobem by byli tyto požadavky plněny, zůstává technologicky nezávislé. Opět tedy není k radosti evropské komise omezován trh.

V souvislosti s touto otázkou se nabízejí úvahy i na téma bezpečnosti a dostupnosti této služby. Na tomto místě je však potřeba si uvědomit, jakým vývojem prochází komunikační infrastruktura a jakým způsobem soudobé systémy pracují. Z pohledu dostupnosti nabízí oba koncepty tzv. diversní způsob komunikace, tj. datová cesta může být zálohována diversní technologií. Jednou z těchto diversních cest může být i tzv. globální sim karta, která je schopna komunikovat po jakékoliv dostupné mobilní síti. Tím se výrazně snižuje nedostupnost služby. Je potřeba si uvědomit, že bezpečnostní parametry elektronických systémů jako je FIT resp. MTBF se neustále zlepšují. Stejně tak i dostupnost služeb např. mobilních operátorů, kteří dokáží poskytovat službu i v krizových situacích jako jsou např. povodně nebo sluneční bouře. Důležitou otázkou je identifikace kritické funkce systému a její kvantifikace. Pokud bychom udělali jednoduché rozdělení na krátkodobý, střednědobý a dlouhodobý výpadek systému AMR a na základě těchto kvantifikátorů zpracovali FMECA analýzu, dojdeme nepochybně k závěru, že komunikační cesta nebude tzv. „úzkým hrdlem“ systému. Provedení takové analýzy, však není primárním záměrem této práce, proto jej ponechám ve formě tvrzení, resp. osobního názoru autora, vycházejícího z dlouhodobých zkušeností z návrhů obdobných systémů. Pro jednoduchost bych komunikační kanál připodobnil signálu televizního vysílání nebo signálu zabezpečovacího zařízení. Nechám na čtenáři zhodnocení ukazatele MTBF zmíněných systémů pro domácnost v horizontu jednoho roku,

neboli kolik večerů ve standardní domácnosti v ČR nešla televize. Byť je tento průměr lehce úsměvný, poukazuje na určité zvykové dogma. Používáme bez omezení systémy, které byly historicky poruchové. Toto paradigma však přenášíme i na systémy, které jsou postaveny na úplně jiné technologii. Je tedy zcela nepochybné, že po technické i finanční stránce je dosažitelné takové systémy provozovat a udržovat i jejich kritické parametry.

S nástupem chytrých sítí je potřeba si uvědomit, že ve své podstatě stavíme energetický systém pro budoucí generace. To je také důvod, proč bychom koncepci, otevřenosti a rozšiřitelnosti systému měli věnovat patřičnou péči. Jen tak můžeme do budoucích sítí začleňovat a implementovat nové funkcionality, jejichž vlastnosti si nyní ani neumíme představit.

3.2.2 Možnosti řízení metodou DR

Jednou z progresivních metod řízení soustavy je i princip *Demand Response (DR)*. Princip DR otevírá celou škálu nových technických scénářů řízení soustavy, ale i nových obchodních modelů a možností motivace zákazníků.

Jak už anglický název napovídá, jedná se o systém založený na řízení požadavků a jejich následných odpovědích. V určitých aspektech je tento systém velice blízký systému HDO, avšak ne v plném rozsahu. Systém DR lze rozdělit na dva módy činnosti. První je založený na odložené spotřebě, tj. při největším zatížení sítě se omezí spotřeba domácnosti. Druhý mód je pak založen naopak na zvýšené spotřebě při odlehčování sítě. Zásadním rozdílem oproti systému HDO je však určitá míra stupňovitosti řízení a explicitní znalost zpětné vazby. Na straně spotřebitele lze tedy aplikovat obchodní modely založené například na explicitně definovaném objemu energie, který má být regulován, a to dokonce oběma směry, tedy kladnou i zápornou odchylku. Za takovou technickou připravenost získává odběratel jistou bonifikaci v ceně energie. Ve své podstatě se stává chytrým odběrným místem. Dle situace v místě instalace lze pak aplikovat různé scénáře regulace, včetně kladných požadavků v případě kombinované výroby tepla a energie nebo při integraci OZE. Při hlubší představě toho, jak DR funguje, lze uvažovat i o dalším dopadu této technologie do dispečerského řízení, a to pomocí tzv. podpůrných služeb (PpS) na straně spotřeby. Je to princip, kde se oproti konvenčnímu přístupu podílí na stabilitě

soustavy i odběratel. V distribuovaném pojetí takového systému jde o poměrně robustní nástroj. Při stoupajícím trendu integrace OZE v distribuční soustavě a v pojetí některých autorů, kteří vnímají distribuci do budoucna pouze jako určitý stabilizační prvek parciálních ostrovních systémů, může být právě tato metoda způsob, který dokáže udržet minimální základní zatížení distribuční soustavy a tím i její stabilitu.

Cílem tohoto odstavce je však poskytnout spíše základní pohled na technologii DR, a proto si dovolím pro hlubší detaily odkázat čtenáře na svůj publikovaný článek, který tuto problematiku hlouběji rozebírá, a kde se věnuji i určitým synergickým jevům systémů DR [5].

To, co je však v pozadí víceméně všech systémů vstupujících do segmentu energetiky, je absence standardizace této oblasti. U systému DR tomu není jinak. Existuje několik implementací, které zprvu vypadají jako standard daného řešení, po prostudování však najdeme pouze několik základních styčných bodů napříč výrobci. Ostatní části se povětšinou stávají nástrojem pro obsazení trhu, tj. rozšiřování systému vede k integračním problémům dané technologie.

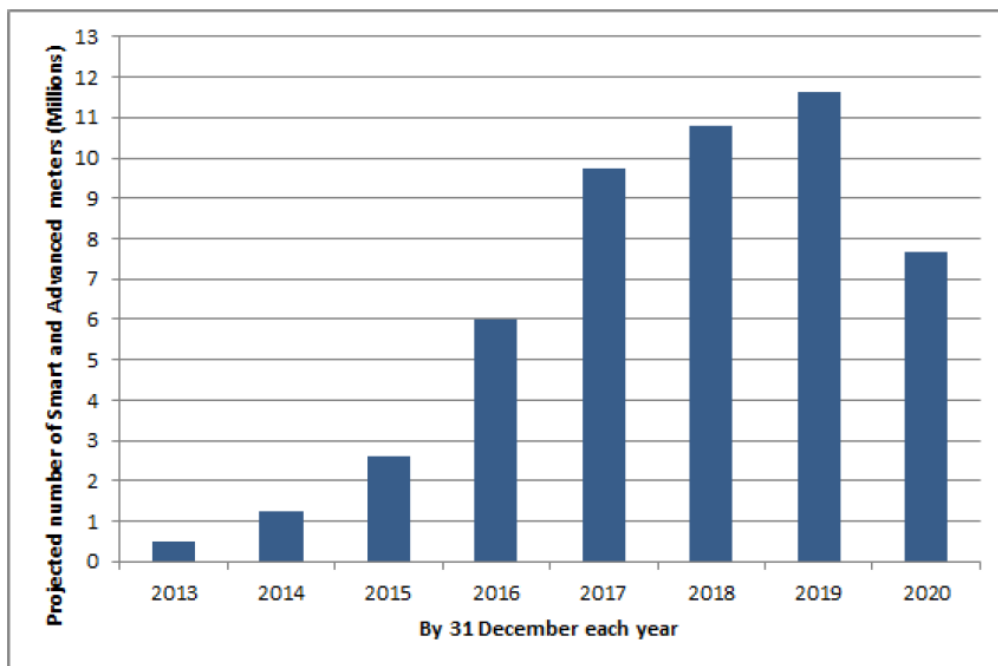
3.2.3 Standardizace konceptuálního návrhu SG a jeho dílčích prvků

Jak již bylo zmíněno v předchozím textu, v současné době neexistuje jednotná standardizace v oblasti SG. Často navíc dochází k zmatení pojmů a standardy dílčích technologických celků jsou vnímány jako standardizace celé oblasti. Je nepochybné, že zde chybí určitý standardní postup při koncipování chytrých sítí jako takových. Jde o určité a jasné význaky řešení, které lze ve své komplexnosti následně označovat jako SG. Výchozím bodem tohoto postupu může být existující standard IEC61850. Na tomto místě je třeba poznamenat, že zde nejde primárně o žádnou z jeho technických hlav či specifikací, ale jedná především o části věnující se systému, správě systému nebo principům sdílení informací. Obrovský dluh zde nesou zejména energetiky, které se věnují pilotním instalacím technologií, u nichž nemají vyřešenu integraci se stávajícími systémy. Pracovní skupina zabývající se pouze a výhradně touto otázkou napříč energetikami je pravděpodobně nedostižným snem všech zúčastněných.

Na poli evropské komise, resp. Unie, k takovým pokusům došlo. Jedním z nich byl i projekt Open meter, který však na základě lobby jednotlivých výrobců vyústil

k technické specifikaci dílčích rozhraní tak, aby v zásadě vyhověl požadavkům všech zúčastněných. Mnohem lepším vodítkem v této oblasti je „Smart Metering Implementation Programme“ britské vlády [6]. Tento program se systematicky věnuje rozvoji Smart Meteringu a to jak název napovídá po stránce implementační, tak i systémové. Zajímavé informace a pohled přinášejí i pravidelné reporty, které dokreslují reálnými čísly možnosti a rychlost postupné saturace odběratelů chytrými měřidly [7]. To ilustruje i následující obrázek, na kterém je demonstrován záměr britské vlády instalovat vrcholně až 11 milionů měřidel ročně. Zmíněný program je dán závazkem a strategií 2020 evropské komise, který Velká Británie přijala.

Zajímavý je také způsob, jakým k tomuto nelehkému úkolu bylo přistoupeno, tj. definice rolí všech dotčených orgánů státní správy, definice konceptu přenosu informace atd. Je velmi poučné, že ne vždy musí být standard spojen s číslem normy. Standardem můžeme rozumět i jasný a pevně stanovený implementační scénář. Je zřejmé, že na úrovni definice rozhraní lze pak technické řešení nalézt.



Obr. 8 - Rychlost zavádění chytrých měřidel v UK [7]

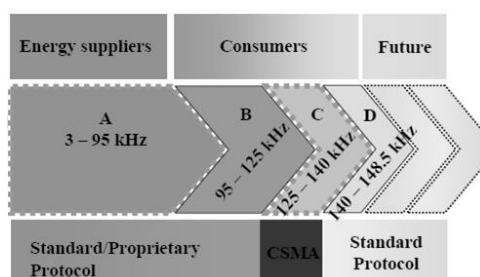
3.3 Teorie komunikace po silovém vedení

Další z možností je komunikace po silovém vedení. Tato část přenosu informace od spotřebitele k výrobci je v popředí zájmu hlavně distribučních společností. Komunikace po silovém vedení dává distributorům možnost využít stávající infrastrukturu v podobě distribuční sítě zejména na hladině nízkého napětí, tedy na spojnici DTS (distribuční trafo stanice) a koncového odběrného místa.

Mnohé technologie jsou dnes ve spojení se smart grids považovány za nové či průlomové, nicméně zpravidla lze o jejich převratnosti úspěšně pochybovat. Ne jinak tomu je i v případě PLC (power line communication) modemů. V minulých letech se uplatňovali i sofistikovanější technologie např. Insteon, LonWorks, BacNet či KNX. Všechny tyto alternativy však cílily především na segment domácí automatizace, tedy rozvody nízkého napětí. Jejich aplikace na vyšších napěťových hladinách nepřináší zásadní rozdíl v konstrukci modemu, jiné jsou však parametry přenosové trasy, a tedy i použitých modulací.

Jak je tedy patrné, v oblasti komunikace po silovém vedení se uplatňují různé technologie a modulace. Z tohoto důvodu vydal evropský standardizační orgán CENELEC nařízení upravující využívání frekvenčních pásem v rámci komunikace po silových vedení, viz následující obrázek. Jak je vidno, CENELEC rozděluje frekvenční spektrum na 4 základní pásma následujícím způsobem:

- A - výhradně pro Energetiku
- B,C,D - pro koncové zákazníky
- A,B,D - jsou definována protokolem
- C - přístup regulován pomocí metody CSMA



Obr. 9 - Rozdělení frekvenčních pásem dle CENELEC [14]

Pásmo A je tedy dedikováno výhradně pro poskytovatele energie, tedy distribuční a přenosovou soustavu, a pro realizaci PLC komunikace nabízí frekvenční pásmo 3 – 95 kHz.

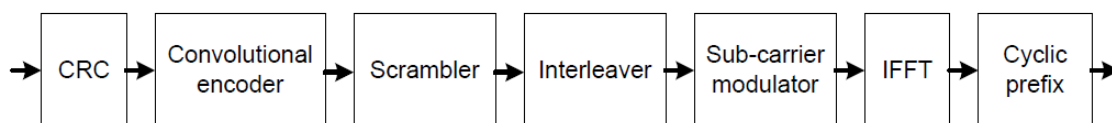
V prostředí standardů pro komunikaci po silovém vedení se nejčastěji srovnávají protokoly IEC61334, PRIME a tzv. PLC třetí generace označované jako G3. Většina ostatních dostupných protokolů nespĺňuje základní omezení definicí CENELEC a pro svoji činnost vyžaduje širší frekvenční pásmo (tzv. broadband). Protokoly PRIME a G3 jsou podporovány dvěma silnými hráči na evropském poli energetiky, a to společnostmi Iberdrola (PRIME) a EDF (G3). Vlna zájmu energetických společností o komunikační standardy je nesena především požadavkem na zavedení tzv. chytrého měření v rámci EU, což představuje miliony odběrných míst, a tedy i velkou investiční příležitost. Z těchto důvodů se pozornost na poli PLC zaměřuje především na zmíněné standardy PRIME a G3.

3.3.1 Protokol PRIME

Protokol PRIME [18] využívá frekvenční pásmo CENELEC A a OFDM modulaci s 97 nosnými kmitočky. První nosná je na kmitočku 41,992kHz a poslední na 88,867kHz. Pro IIFT se používá kmitočet 250 kHz.

Tabulka 1 - parametry modulátoru a FFT [4]

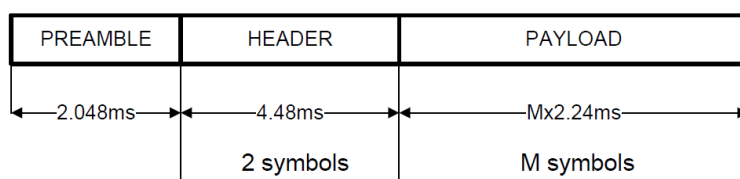
Parameter	Values	
Base Band clock (Hz)	250000	
Subcarrier spacing (Hz)	488.28125	
Number of data subcarriers	84 (header)	96 (payload)
Number of pilot subcarriers	13 (header)	1 (payload)
FFT interval (samples)	512	
FFT interval (μ s)	2048	
Cyclic Prefix (samples)	48	
Cyclic Prefix (μ s)	192	
Symbol interval (samples)	560	
Symbol interval (μ s)	2240	
Preamble period (μ s)	2048	



Obr. 10 - Blokové schéma vysílače PRIME [18]

Obr. 10 demonstruje blokové schéma vysílače dle specifikace protokolu PRIME. Je patrné, že neobsahuje žádný blok samoopravného kódování. Jeho absencí lze dosahovat vyšších přenosových rychlostí, nicméně výsledný kód je méně odolný proti rušení.

Na Obr. 11 je datový rámeček protokolu PRIME, který je složen z Preambule, hlavičky a datového segmentu. Preambule má charakter synchronizační značky a je generována pomocí rozmítaného signálu (tzv. chirp signal)



Obr. 11 - Datový rámeček PRIME [18]

Tento synchronizační symbol lze matematicky vyjádřit pomocí Rovnice 1.

$$S_{CH} = A \cdot \text{sign}(t/T) \cdot \cos[2\pi(f_0 t + 1/2 \cdot \mu t^2)]$$

Rovnice 1 - Rozmítaný signál

Kde A je amplituda, sign je funkce signum (0 nebo 1), T je perioda, f_f a f_0 jsou frekvence poslední a první nosné a μ je konstanta určená pomocí Rovnice 2.

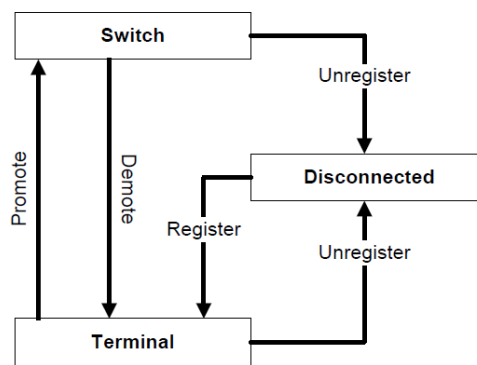
$$\mu = (f_f - f_0)/T$$

Rovnice 2 – Stanovení konstanty μ

Hlavičku datového paketu tvoří dva symboly. Pro přenos hlavičky se využívá 13 pilotní kmitočtů modulovaných jako BPSK. Datový segment (payload) pak přenáší data vyšších vrstev.

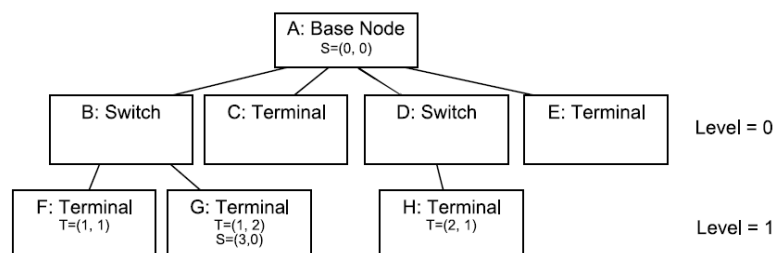
Protokol PRIME dále rozděluje zařízení na tzv. „base node“ a „service node“. Základní uzel (neboli base node) je prvek zajišťující běh sítě, tzn. přístup do sítě

pomocí asociace podřízených uzlů, šifrování, správa komunikačních kanálů atp. Naproti tomu „Service Node“ je entita představující výkonné prvky sítě. Její fungování je definováno třemi režimy disconnected, terminal a switch. Každý nový prvek přistupující do již ustavené sítě se hlásí v režimu disconnected. O připojení následně žádá „base node“ nebo „switch“. Pokud nedostane odpověď ani od jednoho výše zmíněného uzlu, začne vysílat tzv. rámec PPDU, kterým žádá okolní uzly typu „terminal service“, aby se pro něj staly uzlem typu „switch“ a přeposlali jeho žádost o připojení uzlu „base node“.



Obr. 12 - Režimy činnosti uzlů v protokolu PRIME [18]

Obr. 12 ukazuje diagram stavových přechodů jednotlivých uzlů v rámci protokolu PRIME. Z obrázku je také patrné, že uzel „base node“ může každý podřízený uzel jak povýšit, tak v případě zániku partikulárních vazeb i ponížit, resp. změnit jeho režim činnosti. V krajním případě může dílčí uzel dokonce odregistrovat a znemožnit mu přístup do sítě.



Obr. 13 - Hierarchie sítě protokolu PRIME [18]

Z Obr. 13 je patrná hierarchická struktura sítě tak, jak je organizována v rámci implementace protokolu PRIME. Je patrné, že jednotlivá zařízení jsou členěna na základě své „role“ v síti, ale také dle strukturální úrovně začlenění do dané sítě (v obrázku označené jako „Level“).

Nejspodnější úroveň komunikace je definována pomocí tzv. MAC (media access control) rámce. Jeho strukturu ukazuje Obr. 14. Je vidno, že je tvořen až pěti základními segmenty typu Beacon, SCP (Shared-contention period) a CFP (Contention-Free Period).



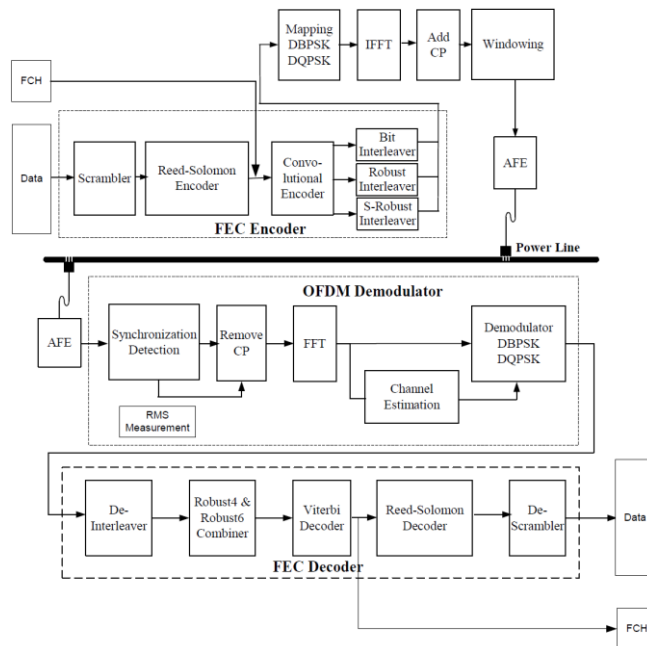
Obr. 14 - Struktura MAC rámce PRIME [18]

Segment „Beacon“ obsahuje datové struktury a algoritmické mechanismy umožňují základní identifikaci vysílaného rámce, synchronizaci jednotlivých uzlů a další režijní informace umožňující bezpečnou organizaci sítě. Segment SCP představuje dobu, kdy kterýkoliv z uzlů v síti může vysílat svůj obsah, samozřejmě po úspěšné arbitráži při přístupu na komunikační medium. CFP naopak představuje dobu, kterou si u „base node“ jednotlivé prvky dopředu vyžádali, a jejich komunikace je v tuto dobu garantovaná. Detailnější popis samotného protokolu překračuje rámec tohoto textu, proto čtenáře s hlubším zájmem o tuto problematiku odkazují na veřejně dostupnou specifikaci protokolu PRIME [18].

3.3.2 Protokol G3

Protokol je jedním z nových standardů v oblasti PLC komunikace. Pro jeho novost a inovativnost je označován jako PLC třetí generace neboli G3. Jeho vývoj je podporován zejména francouzskou distribuční společností EDF, ale i jinými silnými evropskými hráči na poli energetického průmyslu.

Tak jako výše popisovaný protokol PRIME používá i G3 na fyzické vrstvě pro svoji činnost frekvenční pásmo A definované komisí CENELEC (3-95kHz). Standard definuje 36 nosných OFDM, přičemž jednotlivé nosné jsou modulovány pomocí DBPSK a DQPSK. První nosná je na frekvenci 35,9 kHz a poslední na 90,6kHz.

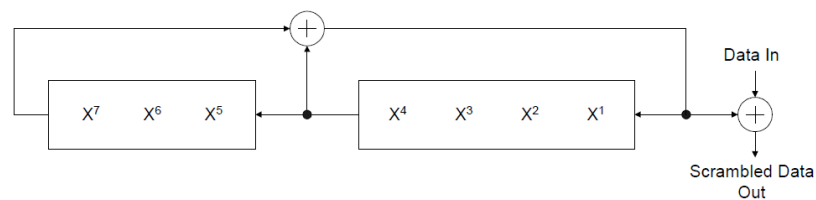


Obr. 15 - Blokové schéma implementace G3 (vysílač přijímač) [17]

Princip přenosu informace protokolu G3

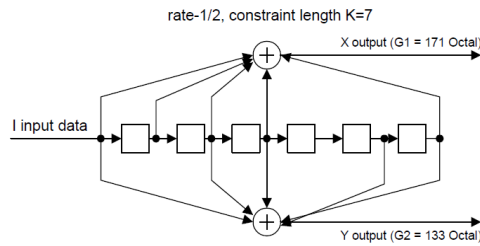
Princip vysílání a příjmu blokově představuje Obr. 15. Z obrázku je patrný modulární způsob zpracování vstupního signálu a jeho následná regenerace na přijímací straně.

Do bloku FEC vstupuje proud dat. Tato data jsou zpracována buďto v režimu „normal“ nebo „robust“, který přidává další redundanci. Zpracovaná data postupují dále do bloku „scrambler“. Tento blok zpracovává data pomocí bitového algoritmu, jenž ilustruje Obr. 16.



Obr. 16 - Scrambler G3 [17]

Distribuovaná data postupují do Reed-Solomonova kodéru, který data zabezpečuje přidáním osmibitovým slovem. Následuje další blok zpracování reprezentovaný konvolučním kóděrem o délce sedmi registrů a dvou XOR funkcí, tak jak jej ilustruje Obr. 17.



Obr. 17 - Konvoluční kodér G3 [17]

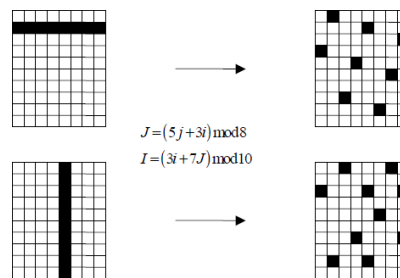
Zpracovaná data jsou dále prokládána blokem „Interleaver“. Prokládání obecně předchází dvěma druhům chyb, a to krátkodobému širokopásmovému rušení jednotlivých OFDM symbolů a chybám vlivem útlumu a rušení na jednotlivých nosných frekvencích. V rámci G3 se prokládá ve dvou osách dle Rovnice 3 a Rovnice 4.

$$J = (j \cdot n_j + i \cdot n_i) \% n$$

Rovnice 3 – Proložení sloupce pro Interleaver G3 [17]

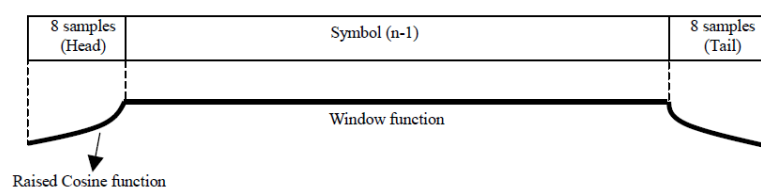
$$I = (i \cdot m_i + j \cdot m_j) \% m$$

Rovnice 4 – Proložení řádku pro Interleaver G3 [17]



Obr. 18 - Princip prokládání protokolu G3 [17]

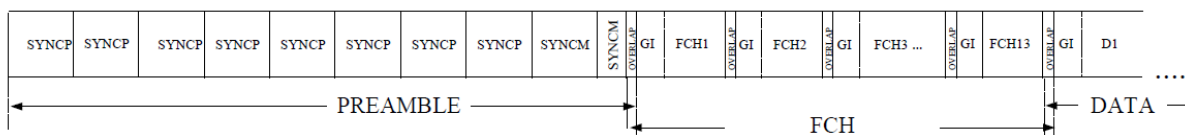
Výsledný signál je generován blokem IFFT. Jeden OFDM symbol je tvořen 256 vzorky. Posledních 30 vzorků je následně vloženo před samotný symbol. Z důvodů spektrální čistoty a omezení prosakování ve spektru je na výsledný signál aplikována tzv. okenní funkce (windowing) pomocí rostoucí kosinové funkce (raised cosine) viz Obr. 19. Tato funkce se aplikuje na krajních osm vzorků symbolu. Prvních a posledních osm vzorků se vzájemně překrývá na základě principu tzv. „overlappingu“.



Obr. 19 - Window funkce v protokolu G3 [17]

Datová komunikace protokolu G3

Datová komunikace je definována třemi částmi datového rámce tak, jak je ilustruje Obr. 20, tzn. preamble, hlavičky FCH (frame control header) a dat.



Obr. 20 - Datový rámec G3 [17]

Preamble je část zajišťující synchronizaci, nastavení AGC (automatic gain control) atp. a obsahuje osm synchronizačních P (jsou násobeny funkcí plus 1) symbolů následovaných jeden a půl symbolem typu M (jsou násobeny funkcí minus 1). Na část preamble navazuje část řízení rámce, která obsahuje informace nezbytné pro dekódování, resp. demodulování signálu. Na úrovni fyzické vrstvy jsou definovány i další struktury paketů. Jako příklad může sloužit potvrzovací rámec ACK (acknowledge), který obsahuje pouze preamble a FCH. V případě datového rámce samozřejmě následuje část obsahující samotná data.

Tabulka 2 - Definice FCH protokolu G3 [17]

Field	Byte	Bit number	Bits	Definition
PDC	0	7-0	8	Phase detection counter
MOD	1	7-6	2	Modulation type: 0 – ROBO; 1 – DBPSK 2 – DQPSK
FL	1	5-0	6	PHY frame length in PHY symbols
TM[0:7]	2	7-0	8	TM[0:7] – Tone map
TM[8]	3	7	1	TM[8] – Tone map
DT	3	6-4	3	Delimiter type: 000: Start of frame with no response expected; 001: Start of frame with response expected; 010: Positive acknowledgement (ACK) 011: Negative acknowledgement (NACK) 100-111: Reserved
FCCS	3	3-0	4	Frame Control Check Sequence (CRC5)
	4	7	1	
ConvZeros	4	6-1	6	6 zeros for convolutional encoder

Tabulka 2 představuje jednotlivé parametry FCH. Za povšimnutí stojí zejména konfigurační data algoritmu „Tone Map“ (TM), která zajišťují protokolu G3 vyšší odolnost proti rušení.

Vyšší vrstva protokolu G3 (tzv. MAC vrstva) vychází z normy IEEE 802.15.4, která definuje komunikaci v bezdrátovém nelicencovaném pásmu ISM (Industry Science Medical). Tento standard byl za poslední dekádu prověřen mnoha průmyslovými aplikacemi a jeho poslední revize z roku 2006 se ukazuje jako

velice robustní a progresivní standard. V rámci pracovní skupiny IEEE802.15.4e se v současné době pracuje i na specifikaci pro kritické aplikace v průmyslu. Zajímavý vývoj se ukazuje i v rámci pracovní skupiny IEEE802.15.4g, která se věnuje specifikaci a začleňování požadavků pro tzv. „smart utility“, které se přímo dotýkají segmentu energetiky. Kompatibilita právě s výše zmíněným standardem může být do budoucna velké plus standardu G3.

Definici MAC rámce protokolu G3 ukazuje obrázek 21. Rámec je složený ze segmentu MHR(MAC header) , MAC payload a MFR (MAC footer)

Octets:	2	1	0/2	0/2/8	0/2	0/2/8	0/5/6/10	Variable	2	
3	Segment Control	Frame Control	Sequence Number	Destination PAN	Destination Address	Source PAN	Source Address	Auxiliary Security Header	Frame payload	FCS
MHR								MAC payload	MFR	

Obr. 21 - MAC rámec protokolu G3 [17]

Pole „segment control“ má za úkol řídit tzv. segmentaci. Segmentace je prováděna na základě adaptivních algoritmů fyzické vrstvy, která přizpůsobuje kódování a modulaci aktuálnímu stavu komunikačního kanálu. Toto chování vedlo k požadavku na implementaci segmentace, která zaručuje, resp. hlídá správné sestavení rámců na přijímací straně (tzv. reassembling).

Pole „frame control“ obsahuje řídicí informace rámce, tzn. typ rámce, zabezpečení, adresaci, verzi protokolu, odpovídání. Obsah segmentu ilustruje Obr. 22. Za povšimnutí stojí zejména parametr „Frame Version“, který ukazuje připravenost protokolu G3 na budoucí začleňování do systémů s protokolem IEEE802.15.4. Tento parametr má do budoucna nést informaci o tom, zda je implementovaný protokol G3 kompatibilní s výše uvedeným protokolem IEEE802.15.4.

Bits: 0-2	3	4	5	6	7-9	10-11	12-13	14-15
Frame Type	Security Enabled	Frame Pending	Ack. Request	PAN ID Compression	Reserved	Dest. Addressing Mode	Frame Version	Source Addressing Mode

Obr. 22 - Frame control segment protokolu G3 [17]

Pole „sequence number“ zajišťuje správné přiřazování resp. odpovídání uzlu na rámce příslušného typu. Jako příklad může posloužit princip odpovídání či

doručenek na odeslané pakety. Použitím principu sekvencí je zaručeno, že režijní paket sítě typu „Beacon“ nebude vyhodnocen jako doručena na datový rámec.

Pole „Destination PAN“, „Destination Address“, „Source PAN“, „Source Address“ slouží pro adresaci v rámci sítě. Pole „Auxiliary Security Header“ nese informace o zabezpečení přenášeného rámce.

V segmentu „Frame payload“ se pak přenáší data vyšších vrstev ISO/OSI modelu. Patička MFR obsahuje zabezpečení cyklickým redundantním kódem (CRC16) s vybraným polynomem dle definic ITU-T ($G(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$)

MAC vrstva protokolu G3 definuje následující rámce:

- Beacon (ID 0) – Slouží nosič informace o asociaci jednotlivých zařízení a PAN ID.
- Data (ID 1) – Datový rámec je nositelem uživatelských informací či dat z vyšších vrstev protokolu.
- Acknowledgment (ID 2) – tento rámec je uvažován pro budoucí rozšíření resp. návaznost na IEEE802.15.4. Protokol G3 řeší potvrzování zpráv již na úrovni fyzické vrstvy. Tento druh paketu lze vhodnou parametrizací uzlu propagovat na základě potvrzení fyzické vrstvy do vyšších protokolárních vrstev.
- MAC Command (ID 3) – Pomocí tohoto rámce se řídí veškerá obsluha MAC vrstvy protokolu G3, tzn. asociace, „Tone Mapping“ atp.
- Rezerva (ID 4 - 8) – pro budoucí rozšíření protokolu.

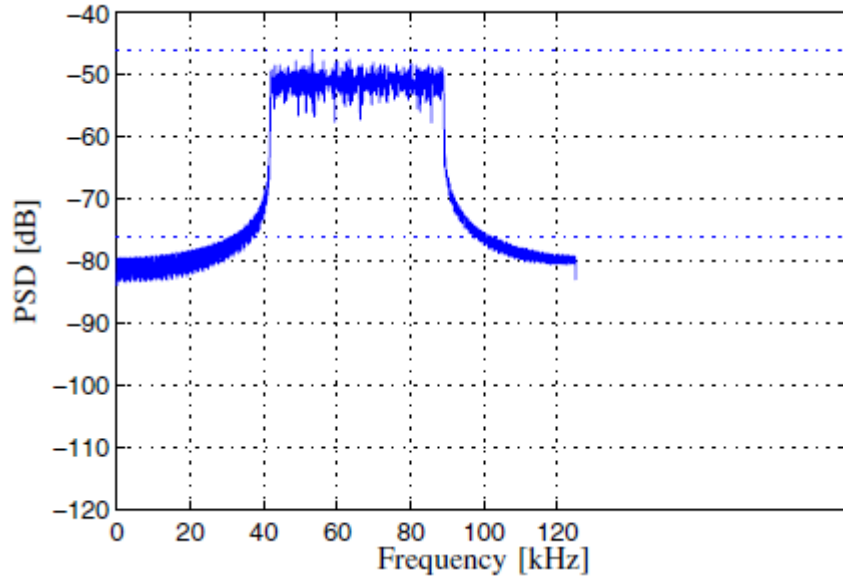
Z uvedených informací je patrné, že detailnější popis protokolu G3, tak jako v případě protokolu PRIME, přesahuje rámec tohoto textu. Proto čtenáře odkazují na veřejně dostupnou detailní specifikaci protokolu G3 [17] a související dokumentaci standardu IEEE802.15.4(2006) [19].

3.3.3 Porovnání standardů PRIME a G3

Podíváme-li se na Obr. 23 a Obr. 24 vidíme srovnání obou protokolů z pohledu spektrální hustoty pomocí tzv. Welschovy metody, která pro svůj výpočet používá princip překrývajících se oken, jejichž výpočet se řídí obecně známou Rovnicí 5, kde L je počet vzorků signálu, N je počet bodů FFT a M je počet segmentů (oken).

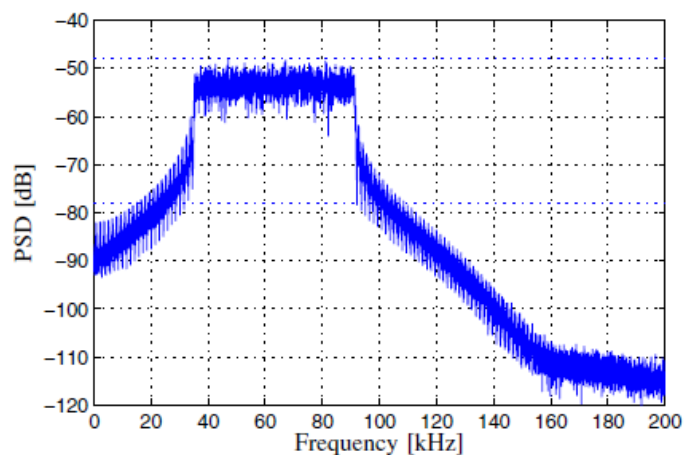
$$P = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{|w(Ns_i) \cdot FFT_i(x_i, Ns_i)|^2}{L}$$

Rovnice 5 - Výpočet spektrální hustoty Welschovou metodou



Obr. 23 - Spektrální hustota (PRIME)[18]

Z obrázků je patrný menší rozptyl energie v případě standardu G3, resp. nižší energie v oblastech vyšších a nižších frekvencí. Byť je tento rozptyl oproti standardu PRIME relativně nepatrný, lze hodnotit standard PLC G3 v této oblasti jako lepší.



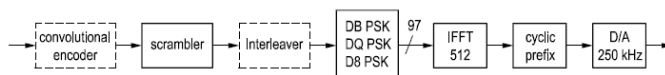
Obr. 24 - Spektrální hustota (G3) [17]

Parametry standardů PLC G3 a PRIME

V Tabulka 3 je uveden přehled použitých modulací, opravných kódů a frekvencí. Zásadní rozdíl je patrný zejména v použitých opravných kódech, počtu nosných, šířce jednotlivých kanálů a modulacích. Jak bude patrné dále, tento rozdíl je pro nasazení PLC v reálných podmínkách klíčový a výběr standardu do značné míry determinuje úspěšné či neúspěšné nasazení PLC technologie.

Tabulka 3 - Parametry protokolů PRIME a G3 [18][17]

PARAMETERS OF PLC G3 AND PRIME		
	PLC G3	PRIME
frequency range	35–91 kHz	42–89 kHz
sampling frequency f_s	400 kHz	250 kHz
OFDM		
FFT size M	256	512
length of cyclic prefix L_{CP}	30	48
windowing	yes	no
subcarrier spacing Δf	1.5625 kHz	488 Hz
No. of carriers used (one-sided)	36	97
max. data rate	33.4 kbps	128.6 kbps
Forward Error Correction	Reed Solomon code, convolutional code, repetition code	convolutional code
interleaving	per data packet	per OFDM symbol
modulation	DBPSK, DQPSK	DBPSK, DQPSK, D8PSK
differential encoding	in time	in frequency



Návaznost srovnávaných protokolů na protokol IEC 61850

Nespornou výhodou standardu G3 je také jeho začlenitelnost do datové objektových struktur protokolu IEC 61850 resp. vyšších vrstev ISO/OSI modelu. Datagramy protokolu G3 navazují na ISO/OSI model IEC 61850, ale také na protokol IEEE802.15.4 pro bezdrátové přenosy. Tato shoda je zajímavá především pro aplikační procesor, který danou komunikaci musí realizovat a který ve svém důsledku může s PLC komunikovat shodnými pakety jako s bezdrátovým rozhraním, které může být implementováno např. na straně chytrého měřidla. Je patrné, že při vývoji standardu G3 byl kladen důraz nejen na spolehlivost, ale také na co nejvíce synergických efektů tohoto protokolu. Návaznost G3 na IEC 61850 přináší také vyšší míru začlenění prvků do „smart grid“, jakými jsou např. ochrany. Naplňuje se tak část vize, která předurčovala standard IEC 61850 jako základní stavební kámen chytrých sítí. Otevírá se tak prostor pro smysluplné využití „chytrosti“ elektrizační sítě pro navýšení její rigidity, spolehlivosti a bezpečnosti.

3.4 Metody signálové vazby PLC

Z pohledu metod navázání signálu na silové vedení existuje mnoho hledisek pro jejich klasifikaci. Po studiu literatury zabývající se touto otázkou (např.[3]) a na základě zkušeností při implementaci jsem však došel k vlastnímu rozdělení těchto metod. Mnohdy se totiž nepřehledně směšují principy s implementací, a tím vznikají nejasnosti ohledně charakteristických vlastností a nároků jednotlivých metod. Mnou dále v práci používané rozdělení vazby dále v práci je tedy následující:

- Invazivní metody – jak už termín napovídá, při této metodě dochází k proniknutí do stávajících prvků vedení, a to dvěma způsoby
 - S rozpojením – v tomto případě dochází k fyzickému rozpojení obvodu (vedení). Tento způsob většinou přináší dobré výsledky z pohledu vazby, avšak zásadní nevýhodou je především montáž prvku do silové podélné větve, a tedy i mechanicko-elektrické nároky na něj kladené.
 - S intruzí – Invazivní metoda s intruzí představuje v rozumné úrovni efektivní zásah do stávající infrastruktury, avšak bez přímého rozpojení. Tuto situaci si lze dobře představit jako dotek přidaného zařízení na existujících živých částech.
- Neinvazivní – jsou metody, při nich nedochází k zásadní interakci přidávaného zařízení s existující infrastrukturou. V ideálním případě s žádnou interakcí.
 - Lehce intruzivní – označení lehce má v tomto dělení značný význam. Vyjadřuje pouze tu skutečnost, že přidávané zařízení využívá ke své správné funkci možnost intruze živých částí stávající infrastruktury, bez ovlivnění její další funkce. Tyto metody umožňují v principu (odhlédnuto od bezpečnostních nařízení) montáž za plného provozu. Za určitých okolností to může být i např. transformátorová napěťová signálová vazba.
 - Silně intruzivní – tento typ sice nevyžaduje přímé rozpojení ve smyslu elektrického obvodu, ale vyžaduje velkou montážní připravenost zařízení nebo místa kam má být vazební prvek

umístěn. To v praxi znamená např. požadavky na průřezy vedení v daném místě. Rozdíl oproti invazivní vazbě s intruzí je zejména ve fyzikálním principu vazby resp. v menším ovlivnění místa montáže. Typicky se jedná např. o vazbu feritovým kroužkem.

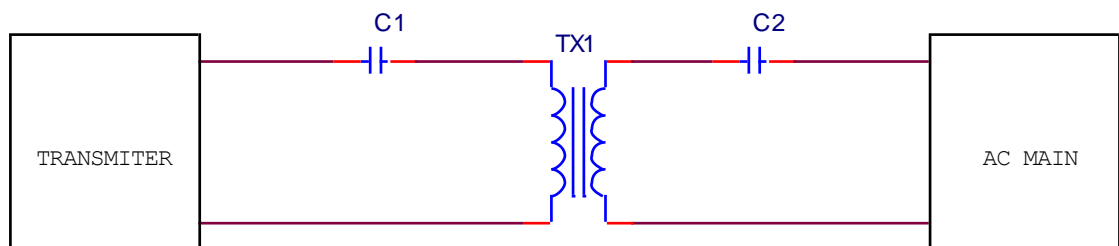
- Neintruzivní – Poslední, nejelegantnější, ale zároveň nejsložitějším typem vazby je neintruzivní. V těchto případech montovaná technologie zcela a bezvýlučně neovlivňuje mechanicky, ani elektricky (ve smyslu nutných přídatných opatření) stávající zařízení či vedení.

3.4.1 Implementace signálových vazeb

Za několik desítek let došlo k objevení základních principů přenosu informace pomocí signálové vazby. Několik základních implementací předkládá tato podkapitola.

Transformátorová vazba

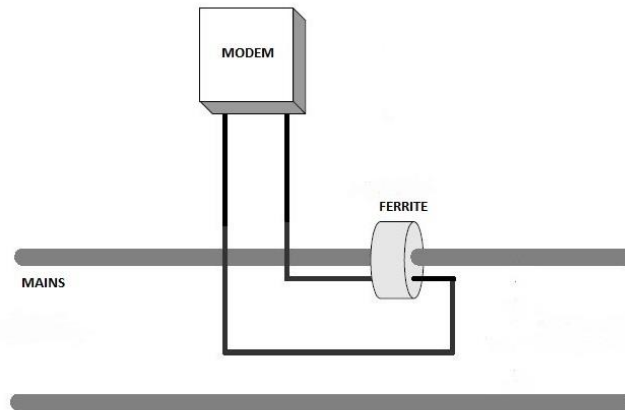
Jedna z elementárních vazeb, která je široce používána zejména pro své galvanické oddělení pomocí signálového transformátoru a potřebě prakticky pouze tří základních prvků, tj. dvou kondenzátorů a trafa. Kapacitory C1 a C2 slouží k oddělení DC složky na nízkých kmitočtech.



Obr. 25 - Transformátorová vazba

Induktivní vazba feritovým kroužkem

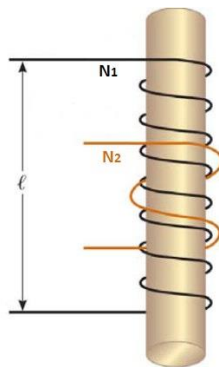
Tato vazba je využívána zejména pro vyšší kmitočty (od 2MHz). Její předností je efektivita a relativně snadná instalace, kdy feritový kroužek lze snadno montovat prakticky kamkoliv. Z obrázku je pak patrná i nutná intruze.



Obr. 26 - Induktivní vazba feritovým kroužkem [22]

Induktivní vazba přes solenoid

Vazba přes solenoid představuje jednoduchou možnost jak instalovat vazební prvek v podélné větvi. Počet závitů N_2 může být velmi malý např. 1, tedy cívka v obvodu nepředstavuje významnou indukčnost. Pro malovýkonový signál představuje výhodou vzduchové jádro, které se nesytí a není tak ani frekvenčně omezeno.



Obr. 27 - Induktivní vazba solenoidem [22]

Důležitým parametrem je samozřejmě vzájemná indukčnost M .

$$M = \frac{N_2 \phi_{12}}{I_1}$$

Rovnice 6 – Rovnice vzájemné indukčnosti

Po triviální úpravě:

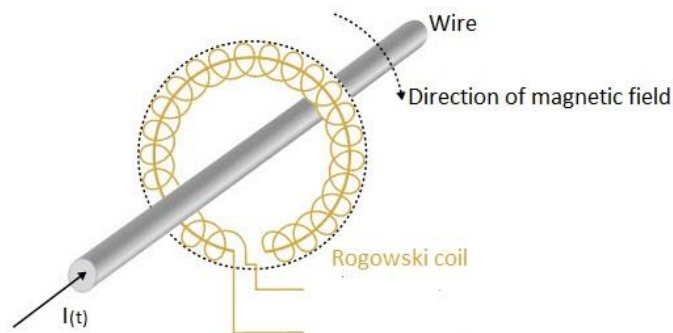
$$M = k\sqrt{L_1 L_2}$$

Rovnice 7 – Rovnice vzájemné indukčnosti (upravená)

Pomocí počtu závitů lze ovlivnit impedanční poměry, a tím i velikost injektovaného signálu. Princip impedančního přizpůsobení pomocí vzduchové cívky je zachycen v článku, který jsem publikoval s kolegou [9], a je diskutován i dále v kapitole 4.

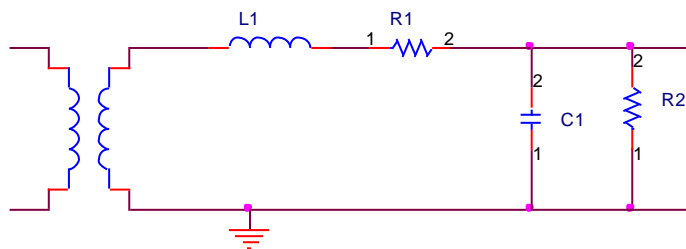
Induktivní vazba pomocí rogowskiho cívky

Trochu netypickým případem je vazba pomocí rogowskiho cívky. Z důvodu odkazu na toto uspořádání dále v textu si uvedeme některé vlastnosti, na které se text dále odvolává.



Obr. 28 - Induktivní vazba přes rogowskiho cívky [22]

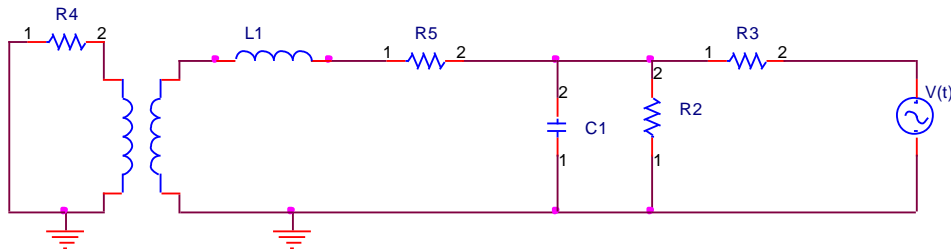
Na následujícím obrázku vidíme náhradní model cívky v klasickém pasivním zapojení. Kde prvky L1, R1, C1 a R2 představují vlastní indukčnost, kapacitu a odpor.



Obr. 29 - Náhradní model Rogovského cívky

Pro uspořádání v injektážním režimu se však model změní následujícím způsobem (viz následující obrázek). Na straně vedení představuje odpor R4 impedanci sítě (pro jednoduchost jako čistě ohmická) a odpor R3 představuje vnitřní impedanci vysílače. V rámci pokusných měření utilit, výrobců elektroniky a univerzit bylo stanoveno kolísání impedance sítě od 0.5 do 20 ohmů pro pásmo CENELEC A. Na tomto místě je nutné si ale uvědomit souvislost daného měření.

Obecně je impedance frekvenčně závislá veličina, tedy v tomto případě se nejedná o hodnoty sítě pro základních 50Hz, ale o prostupnost sítě pro signály o vyšších kmitočtech ve výše zmíněném pásmu CENELEC A.



Obr. 30 - Rogowskiho cívka v zapojení injektoru

Na tuto skutečnost bude poukázáno v kapitole 4 dále v práci, kde jsou výsledky simulací pro tento typ prvku.

Přímá kapacitní a odporová vazba

Jako poslední uvádím přímou kapacitní vazbu, která svým způsobem ukazuje další možnosti, které se však z důvodů galvanického oddělení v drtivé většině případů neaplikují. Stejným způsobem lze využít i odporový dělič. Obě tyto metody však s sebou přinášejí celou řadu problémů. Ve své práci se jimi dále nezabývám, přestože v nich je značný potenciál k dalšímu studiu a aplikacím. Zejména odporové kaskády dnes v aplikacích VN měření zažívají malou renesanci a výrobci s tímto principem přicházejí jako s horkou novinkou. Stojí mimo hlavní záměr této práce, jsou však zajímavým námětem pro další pokračování.

3.4.2 Impedanční přizpůsobení a jeho vliv na vázaný signál

Bez ohledu na použitou frekvenci, modulaci či protokol, jedním z nejvýznamnějších faktorů, které ovlivňují vazbu signálu na silové vedení je tzv. problém poslední míle resp. impedanční přizpůsobení signálu. Zkoumání poslední míle se stalo i zadáním evropské komise, která vydala a financovala výzvu, jejímž záměrem bylo zmapování rozsahů impedance v sítích Evropské unie pro uvažované komunikační frekvence v pásmu CENELEC A. Ukázalo se, že rozptyl impedance je mezi 0,25 až 20 ohmy. Při takto velkém rozptylu je patrné, že navázání signálu je klíčovou záležitostí. Základní problém navázání signálu velmi povedeně popisuje článek pánů Abrahama a Roye [11], na který odkazují. Důležitým závěrem této publikace je zanedbatelnost rozptylu

u vazebních prvků se vzduchovým jádrem. Další možný princip signálové vazby nabízí článek prof. Ferreiry [9]. Princip adaptivní vazby lze pak najít např. v [12] nebo [13]. Na detailní principy čtenáře odkazují, neboť vysvětlení této teorie překračuje záměr disertační práce.

Základní princip adaptivního přizpůsobení má však dva přístupy, a to pomocí signálového transformátoru s možností změny odboček, anebo pomocí obvodu impedančního přizpůsobení postaveného na operační síti. Oba přístupy mají svá pro a proti.

Vazební transformátor

Změna impedančních poměrů pomocí změny převodu transformátoru je dána jednoduchým vztahem níže.

$$\left(\frac{\text{Primár}}{\text{Sekundár}}\right)^2 Z_{\text{in}} = Z_{\text{out}}$$

Rovnice 8 – Rovnice závislosti impedance na transformačním poměru

Schopnost měnit impedanci je tedy dána počtem odboček. Následující tabulka dává informaci o chování takto řízené impedance z pohledu vysílací strany, tedy modemu. Hodnota 50 ohmů byla zvolena s ohledem na typickou výstupní impedanci elektronických prvků.

Tabulka 4 – Výstupní vazební impedance

Převod (1:X)	Impedance sítě				
	50 Ω	20 Ω	10 Ω	5 Ω	1 Ω
1	50	20	10	5	1
2	12.5	5	2.5	1.25	0.25
3	5.56	2.22	1.11	0.56	0.11
4	3.125	1.25	0.625	0.31	0.06
5	2	0.8	0.4	0.2	0.04
6	1.39	0.56	0.28	0.14	0.03
7	1.02	0.41	0.2	0.1	0.02

Všechny hodnoty v [Ω]

Pohled ze strany sítě udává následující tabulka. Je zřejmé, že nastavení nelze měnit v průběhu komunikace, tedy i nastavení odboček je v krátkém čase neměnné. Čtenář může namítnout, že při direktivním způsobu řízení metodou Master-Slave by bylo možné dosáhnout odpovídajících výsledků, je však nutné si uvědomit, že to má značný dopad do latencí systému, které jsou mnohdy

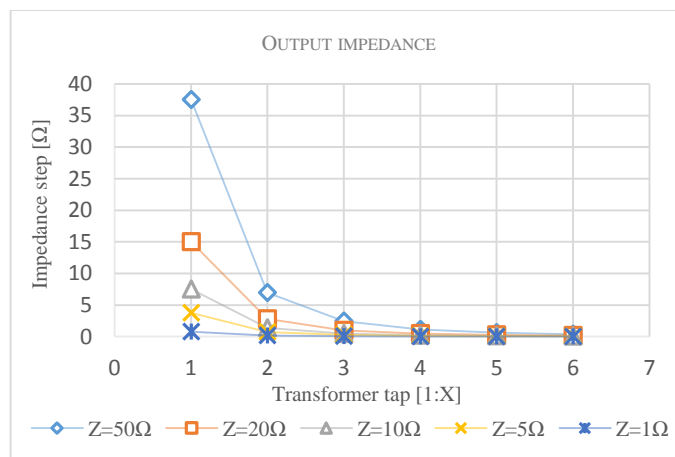
definovány na úrovni celého systému. Operace na přepnutí odbočky před odesláním zprávy by tak mohlo být mimo čas požadovaný na reakci měřidla.

Tabulka 5 – Vstupní vazební impedance

Tap ratio (1:X)	Grid impedance				
	50 Ω	20 Ω	10 Ω	5 Ω	1 Ω
1	50	20	10	5	1
2	200	80	40	20	4
3	450	180	90	45	9
4	800	320	160	80	16
5	1250	500	250	125	25
6	1800	720	360	180	36
7	2450	980	490	245	49

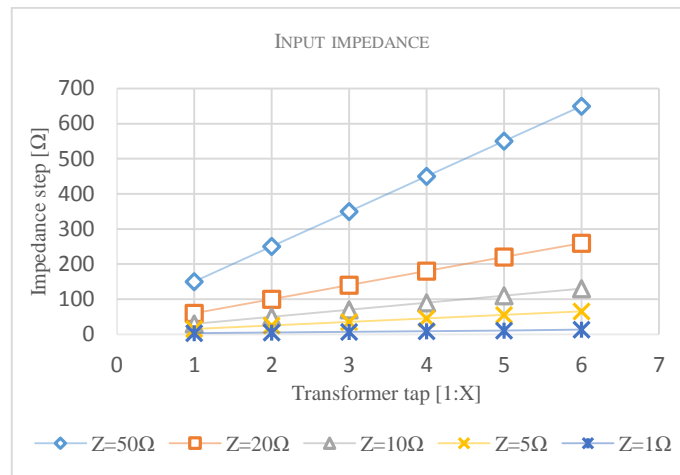
Všechny hodnoty jsou v [Ω]

Následující obrázky dokreslují situaci. V grafu je zaznamenána změna impedance v závislosti na jednotlivých krocích přepínání, resp. změny převodu.



Obr. 31 – Diference impedance v závislosti na změně převodu (výstupní impedance)

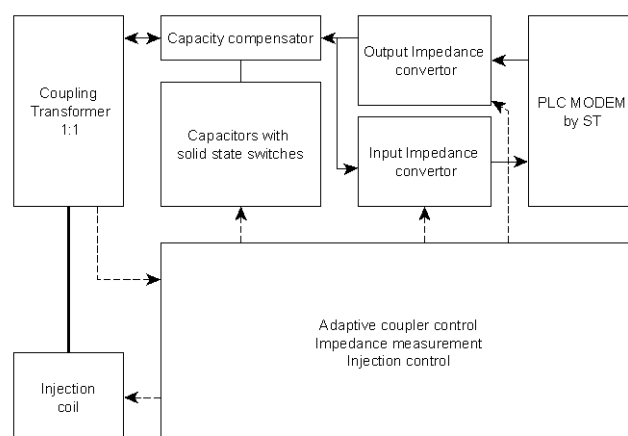
Je vidno, že první změna odbočky přináší největší změnu impedance, což je dáno kvadratickou závislostí impedance na převodu. Na Obr. 32, neboli z pohledu vstupní impedance, je chování lineární. Při pohledu na patřičnou tabulku (Tabulka 5) je patrné, že aplikovatelný je pouze horní trojúhelník dat nad diagonálou.



Obr. 32 - Diference impedance v závislosti na změně převodu (vstupní impedance)

Adaptivní vazba elektronickým způsobem

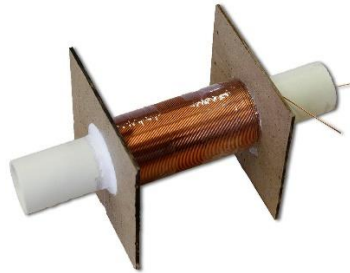
Následující obrázek popisuje koncept adaptivního vazebního prvku, který jsem zvolil pro ověření výše popsaných principů v reálném zapojení. Návrh takového přístupu s sebou nese dvě zásadní úskalí. Prvním je kompenzace impedance při zachování všech normalizačních požadavků pro pásmo CENELEC A (především výstupní výkon). Druhé úskalí je v zachování transparentnosti vazby, tj. je nutné použít signálový transformátor 1:1 a pouze kapacitní kompenzaci. Na tomto místě je potřeba čtenáři zdůraznit, že se nejedná o kompenzaci sítě, nýbrž kompenzaci vysílaného signálu. Celá úloha je tedy postavena naprosto odlišně od klasických kompenzací účinníku sítě. Bez tohoto uvědomění si mohou být některé uváděné informace matoucí. Pro detailní informace odkazuji na svůj článek ve sborníku konference IEEE [5]



Obr. 33 – Koncept adaptivního vazebního prvku

Jednou ze zásadních informací v tomto konceptu je znalost impedance. Jelikož impedance závisí na frekvenci, je nutné provést „skenování“ rozsahu

frekvencí a vyhodnotit impedanci frekvenčně buzeného signálu. Z tohoto důvodu je použita injektážní cívka, která dokáže „normovaný“ signál vytvořit a následně variací metody tří voltmetrů danou impedanci dopočítat.



Obr. 34 – Injektážní cívka

Použitá injektážní cívka je na Obr. 34. Cílem návrhu bylo pouze ověřit koncept. Proto byla zvolena cívka v jednoduché konfiguraci solenoid se vzduchovým jádrem. Tím byla zajištěna linearita odezvy na buzení cívky.

Následující rovnice a grafy demonstrují návrh cívky a dosažené parametry.

$$\mathcal{E}_L = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d}{dt} \iint \vec{B} \cdot d\vec{A} = -L \frac{dI}{dt}$$

Rovnice 9 – Základní rovnice pro solenoid

Vlastní indukčnost je pak:

$$\Lambda = \frac{N\Phi}{I} = \mu_0 n^2 \pi R^2 l$$

Rovnice 10 – Indukčnost solenoidu

Vlastní indukčnost tedy závisí na geometrických parametrech a proudu. Indukované napětí je ovlivněno i vzájemnou indukčností. Pokud tedy máme cívku o N_1 závitů, průřezu A , délce l a cívku o N_2 závitů můžeme odvodit:

Magnetický tok:

$$\Phi = BA = \frac{\mu_0 N_1 I_1}{l} A$$

Rovnice 11 – Magnetický tok solenoidu

Vzájemná indukce:

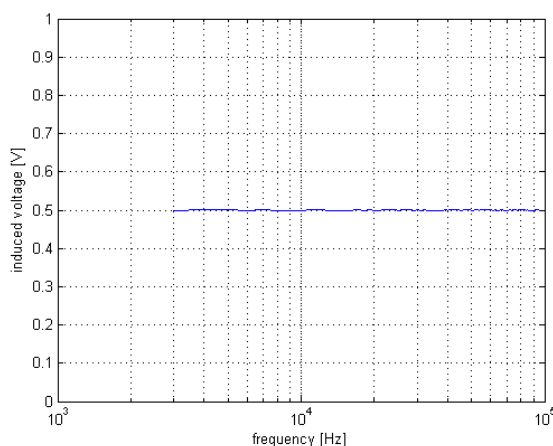
$$M = \frac{N_2 \Phi_{21}}{I_2} = \frac{\mu_0 N_2 N_1 A}{l}$$

Rovnice 12 – Vzájemná indukčnost

Tato rovnice se běžně upravuje do formy s koeficientem vazby k :

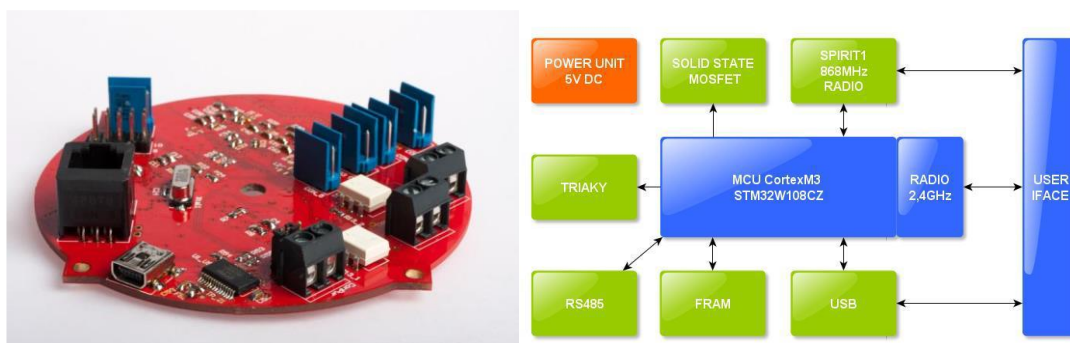
$$M = k\sqrt{L_1L_2}, 0 \leq k \leq 1$$

Rovnice 13 – Vzájemná indukčnost s koeficientem vazby



Obr. 35 – Frekvenční závislost indukovaného napětí

Na Obr. 35 je vidět výsledná závislost indukovaného napětí do čisté odporové zátěže a dosažení ploché frekvenční charakteristiky. Na Obr. 36 uvádím pro lepší představu realizaci řídicí části injektoru postavené na platformě ARM Cortex-M3.



Obr. 36 – Řídicí deska injektáže pro zástavbu do krabice KU-68 a její blokové schéma

Ověření tohoto konceptu byla pouze parciální úloha mimo hlavní záměr této práce. Ve světě se však této problematice věnují naplno dva týmy na *University of Cambridge* a *University of Johannesburg*. Na obě pracoviště jsem dosažené výsledky předal k dalšímu zkoumání, a zároveň s tím si tento koncept nezávisle ověřil. Zcela jistě se zde otevírá prostor pro další zkoumání, a to zejména v experimentální rovině. To zmiňuji i v námětech na další pokračování práce.

3.5 Komunikace bezdrátovým způsobem

3.5.1 Protokol WM-BUS

Protokol *wireless meter bus* (WM-BUS) je bezdrátovým rozšířením velice oblíbeného protokolu M-BUS pro aplikace v měřicí technice po drátových spojích. Fyzická vrstva tohoto protokolu je kompatibilní s definicí dle protokolu KNX (tzv. evropské měřicí sběrnice) resp. s normou IEEE 802.15.4.

Tento protokol je navržen pro Master-Slave architekturu v hvězdicovém uspořádání tak, jako výše zmíněný M-BUS. WM-BUS logicky navazuje a rozšiřuje zmíněný protokol. Lze ho tedy aplikovat i v transparentním režimu tzv. „bridge“, neboli bezdrátového přemostění. Z pohledu standardizace je tento protokol upraven evropskou normou EN 13757-4 z roku 2005 a jeho derivátů. V této normě jsou definovány jeho základní parametry jako přenosové rychlosti, přístup k přenosovému médiu, frekvence atp. ISO/OSI model protokolu definuje vrstvu fyzickou, linkovou a aplikační. Mezilehlé vrstvy je tedy v případě potřeby nutné implementovat až na úrovni aplikačních dat.

Protokol WM-BUS vychází z konceptu protokolu M-BUS, tedy rozlišuje dva režimy z pohledu směru komunikace (jednosměrná „1“ a obousměrná „2“) a tři základní režimy (R,S a T) z pohledu přenosové rychlosti, jak ukazuje Tabulka 6.

Tabulka 6 - Režimy a přenosové rychlosti protokolu WM-BUS

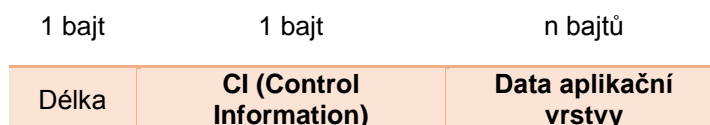
Přenosová rychlost	Označení jednocestné komunikace	Označení dvoucestné komunikace
4,8 kb/s	Není specifikováno	R2
32,768 kb/s	S1	S2
100 kb/s	T1	T2

Jako komunikační kanál využívá WM-BUS frekvenční pásmo ISM (*Industry Science Medical*) resp. jeho standardizovanou část pro Evropu 868 až 870 MHz. Z tohoto důvodu musí použité implementační prvky vyhovovat předpisu ETSI EN 300220 a CEPS/ERC/REC70-03, které se věnují problematice harmonických kmitočtů, maximálního vysílacího výkonu či omezení pracovního cyklu. Poslední dva jmenované parametry mají při implementaci tohoto protokolu poměrně zásadní význam. Upravují totiž periody pro sběr dat z měřidel. Pro ilustraci lze uvažovat případ omezení pracovního cyklu na 0,1%, což odpovídá asi pěti

měřením o délce 700ms za jednu hodinu. Tím je do značné míry limitován rámec nasazení této technologie v rámci chytrých sítí.

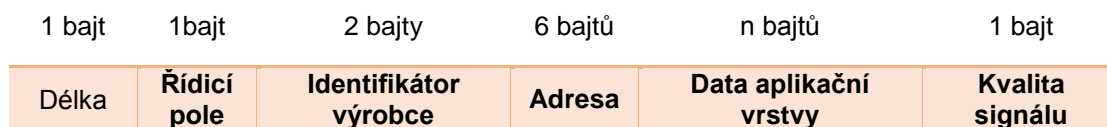
Pro WM-BUS je však ještě významnější norma EN13757-4, která upravuje způsob komunikace mezi měřidlem (master) a podřízenými uzly (slave) a specifikuje používané diagramy pro řízení a přenos informace.

Následující obrázek zobrazuje strukturu základního rámce protokolu WM-BUS tak, jak jej odesílá aplikační procesor do komunikačního modulu realizující samotný přenos informace.



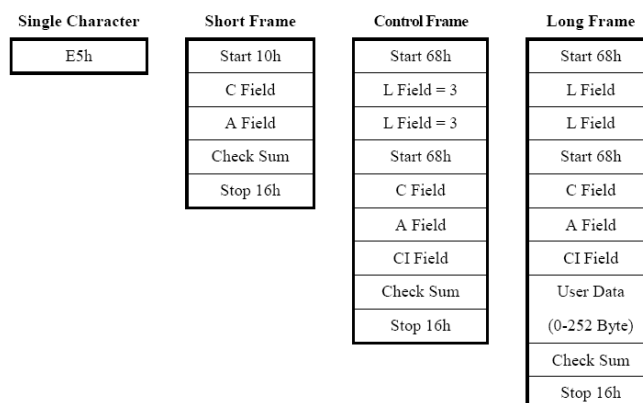
Obr. 37 - Základní struktura rámce WM-BUS

Komunikační modul, popř. komunikační procesor pak základní rámec rozšiřuje o pole zobrazené na Obr. 38.



Obr. 38 - Rozšířený rámec WM-BUS

Takto sestavený rámec je pak zakódován algoritmem AES-128 a je přenesen komunikačním kanálem. Data aplikační vrstvy jsou pak realizována dle specifikace protokolu M-BUS [14], jak ukazuje Obr. 39. Detailní popis protokolu M-BUS přesahuje rámec tohoto textu, proto odkazuji čtenáře na podrobnou dokumentaci [14] ze seznamu literatury.



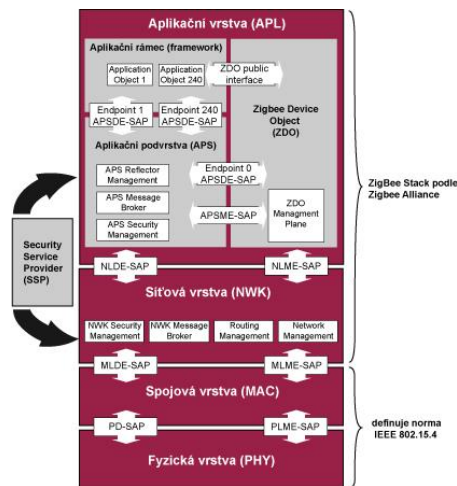
Obr. 39 - Specifikace aplikačních rámců dle protokolu M-BUS [16]

Popisovaný protokol WM-BUS se z pohledu chytrých sítí jeví jako velice perspektivní, o čemž svědčí i jeho zahrnutí do závěrečných doporučení projektu OpenMeter [14]. Tento standard těží zejména z propojení průmyslem

osvědčeného protokolu M-BUS a stejným způsobem validovaného bezdrátového standardu IEEE 802.15.4 [19]. Toto spojení dává protokolu WM-BUS velmi dobrou výchozí pozici zejména z pohledu nasazení v rámci tzv. chytrého měření, a to jak elektrické energie, tak i měření plynu, tepla či vody. Z pohledu přenosového řetězce elektrizační soustavy se tento standard jeví jako vhodným pro koncové body resp. odběratele. Zvláštní význam bude mít zejména pro tzv. aplikace za měřidlem, resp. pro navazující systémy tzv. chytrých domů či v návaznosti na řídicí systémy distributora pracující na principu Demand-Response.

3.5.2 Protokol ZigBee

Standard ZigBee vychází z původního standardu IEEE 802.15.4 [19], který v roce 2003 vyplnil mezeru na poli bezdrátových komunikací. Tento původní standard organizace IEEE dal prostředek všem, kteří žádali odolný bezdrátový přenos dat v průmyslovém prostředí a zároveň zařízení s extrémně malou spotřebou energie. Standard ZigBee volně navazuje na původní standard IEEE 802.15.4 a definuje vyšší protokolové vrstvy, jak je schematicky vidět na Obr. 40.



Obr. 40 - ISO/OSI model standardu ZigBee

O standardizaci vyšších vrstev se stará konsorcium firem seskupené v organizaci *ZigBee Alliance*. Tato organizace vydává nové definice či normy a zároveň validuje všechny výrobky, které chtějí používat značku ZigBee. Jedná se o certifikaci spojenou s prohlášením o shodě daného výrobku s normami ZigBee Alliance. Tímto postupem je docíleno vzájemné kompatibility zařízení bez ohledu na konkrétního výrobce. Zároveň však tato certifikace svým

způsobem omezuje trh, neboť ceny certifikací se pohybují okolo 20.000,-USD, což jistě není zanedbatelná částka.

Pro komunikaci v rámci standardu IEEE 802.15.4 byly definovány následující frekvence a modulace:

- 868 MHz (DSSS,OQPSK,ASK, CCS)
- 2.4 GHz (DSSS,OQPSK,ASK,CSS)
- 3.1 – 10 GHz UWB (CSS)

Po uveřejnění bezdrátového standardu ZigBee došlo k masivnímu nasazování této technologie napříč obory. To s sebou však přineslo některé problémy ohledně kompatibility resp. datové reprezentace jednotlivých paketů. Z tohoto důvodu byly definovány tzv. clustery.

ZigBee cluster library

Cluster library je sada funkcí a definic, které popisují vlastnosti různých zařízení a definují, jakým způsobem mají být tyto funkce navázány na standard ZigBee. Tímto způsobem je zaručena kompatibilita a možný další rozvoj standardu ZigBee.

Ve zmíněné knihovně clusterů najdeme sady definic pro oblasti, jako jsou měření, vytápění, vzduchotechniku, osvětlení, čerpadla a jiné. Tyto definice pak široce popisují a standardizují rozhraní dílčích prvků resp. zařízení například pro zapnutí, odepnutí, diagnostiku atd.

ZigBee – Aplikační profil

Po nadefinování různých clusterů se ukázalo, že pro praktické nasazení je obtížné v každém zařízení implementovat všechny funkce daného clusteru. Pro některá zařízení bylo navíc nutno implementovat více než jeden cluster vzhledem k přesahu jejich funkčnosti napříč více obory. Nejen z těchto důvodů byly tedy nadefinovány tzv. aplikační profily, které obsahují pouze vybrané a potřebné definice jednotlivých clusterů. Mezi aplikačními profily nalezneme následující:

- ZigBee Smart Energy
- ZigBee Home Automation

- ZigBee Remote Control
- ZigBee Health Care
- ZigBee Building Automation
- ZigBee Telecommunication Services

V rámci těchto profilů nalezneme definice všech potřebných funkcí a stavů, které jsou potřeba v rámci dané implementace. Jak je patrné ze seznamu výše, taková definice existuje i pro segment energetiky.

ZigBee Smart Energy Profile

Profil ZigBee Smart Energy je souhrn připravených funkcí a nabízí celou řadu zajímavých implementací, ať už pro dálkový odečet energií, nebo pro zátěžový management atd. Hlavní přínos tohoto aplikačního profilu je v případě ZigBee Smart Energy zvýšení efektivity spotřeby energie a také nové možnosti pro její řízení.

Při sestavování aplikačního profilu je potřeba implementovat funkce hned z několika clusterů. Pro sestavení Smart Energy profilu bylo nutné implementovat i některé zdánlivě nesouvisející funkce, jak ukazuje následující tabulka.

Tabulka 7 - Clustery použité v profilu Smart Energy

Funkční doména	Cluster ID
General Basic	0x0000
General Identify	0x0003
General Alarms	0x0009
General Time	0x000A
General Commissioning	0x0015
General Power Configuration	0x0001
General Key Establishment	0x0800
Smart Energy Price	0x0700
Smart Energy Demand Response and Load Control	0x0701
Smart Energy Simple Metering	0x0702
Smart Energy Message	0x0703
Smart Energy Smart Energy Tunneling (Complex Metering)	0x0704
Smart Energy Pre-Payment	0x0705

Všechny tyto clustery však ve své komplexnosti dávají možnost, jak efektivně a rychle vytvořit implementaci různých prvků z oblasti energetiky. V aplikačním

profilu však nalezneme i specifikace jednotlivých prvků či přístrojů pro energetiku, jak ukazuje Tabulka 8.

Tabulka 8 - Zařízení definovaná profilem Smart Energy

Zařízení	Device ID
Generické	
Range Extender	0x0008
Smart Energy	
Energy Service Portal	0x0500
Metering Device	0x0501
In-Premise Display	0x0502
Programmable Communicating Thermostat	0x0503
Load Control Device	0x0504
Smart Appliance	0x0505
Prepayment Terminal	0x0506
Reserved	0x0507 – 0x5FF

Energy service portal

Toto zařízení slouží jako informační brána či rozhraní mezi spotřebitelem a poskytovatelem energie.

Metering device

Představuje prvek zajišťující měření veličin. Tento přístroj nemusí nutně představovat pouze tzv. chytrý elektroměr, ale může implementovat měření jakékoliv veličiny.

In-Premise display

Je zobrazovací jednotka, která umožňuje uživateli získat aktuální informace např. o denní spotřebě energie, neplánovaných výpadcích atd.

Programmable communicating thermostat

Je zařízení, nad jehož rámcem lze implementovat inteligentní zátěžový management, a využít tak například přebytky energie z obnovitelných zdrojů.

Load control device

Toto zařízení zcela implementuje zátěžový management na rozličných úrovních. Zařízení přijímá události z oblasti regulace a zátěžových charakteristik, na jejichž základě připíná či odpíná příslušné zátěžové skupiny. Klasickou

řízenou zátěží jsou například elektrický boiler, cirkulační čerpadla, venkovní osvětlení či bazénové pumpy a jiné.

Smart Appliance

Definuje chování nových inteligentních spotřebičů, které budou umožňovat větší zapojení do regulace a zátěžového managementu. Chytré spotřebiče umožňují díky vloženým systémům lepší integraci do domácnosti a také vyšší efektivitu využití energie.

Smart Energy profil nabízí celou řadu předpřipravených funkcí a definic, které velmi dobře pokrývají zejména nejnižší položený segment distribuční sítě, tedy domácnosti. Umožňuje také získat data a informace o spotřebě energie v topologických bodech, které jsou doposud „slepými“ místy na mapě spotřeby.

Velkou výhodou standardu ZigBee jsou nejen definice a normy v oblasti energetiky, ale také široké portfolio kompatibilních a navazujících zařízení resp. profilů například v oblasti automatizace budov. To přináší v implementační rovině některé zajímavé synergické jevy, které mohou dále napomáhat rozvoji jak standardu ZigBee, tak interakce dílčích energetických systémů a přístrojů. O perspektivnosti tohoto standardu vypovídá i druhá revize profilu Smart Energy 2.0, která dále rozvíjí koncept Smart Grid.

Přestože je ZigBee poměrně novým komunikačním standardem (od roku 2003), stále více se ukazují jeho přednosti a vhodnost pro nasazení nejen v systémech dálkových odečtů energií (AMR), ale i jako součást Smart Grid. Ve své podstatě se jedná se o bezdrátový přenosový kanál pracující mimo jiné i v nelicencovaném pásmu ISM 2,4GHz. Oproti stávajícím komunikačním prostředkům (HDO) má velkou výhodu zejména v možnosti obousměrné komunikace, tzn. jak ve směru spotřebitel distributor, tak i opačně. Další výhodou je pak úplná nezávislost na přenosovém vedení.

3.6 Nové komunikační technologie

Z pohledu navazujících prací je na tomto místě nutno zmínit i naprosto novou a velmi perspektivní technologii zejména pro aplikace chytrého měření. Jedná se o technologii firmy SigFox resp. Blue Cell Networks, která se postupně z fáze pilotních provozů dostává do aplikačního nasazení.

Princip této technologie je postaven na šíření signálu v nelicencovaném pásmu (to velmi zlevňuje použití technologie v praxi) na frekvenci 868MHz pro Evropu a 902MHz pro USA. Koncept je postaven na velmi úzkých komunikačních kanálech, po kterých může zařízení přenést zprávu o délce 12ti bajtů, tj. zhruba jednu textovou zprávu systému SMS. Zároveň platí omezení na maximální počet 140ti zpráv za den. Celý koncept navazuje na trend tzv. chytrých věcí IoT, který je zmíněn výše v textu, a který do velké míry může změnit trh v této oblasti. V ČR se do pilotního testování zapojil operátor T-Mobile, jenž je součástí koncernu Deutsche Telekom, který je jedním z lídrů v této oblasti. Z popisu činnosti této technologie je patrné, že pro systémy AMR může být tato technologie zlomová v bilanci nákladů na investice na pořízení této technologie. Odhadovaná cena zařízení včetně ceny služby jako takové je asi 6USD, kdy rozpad ceny je 5USD za zařízení a 1USD za službu. Dolar ročně za čtení jednoho odběrného místa v periodě až 140ti měření denně dává této technologii značné perspektivy. Velkou výhodou této technologie je také bezesporu připravenost součástkové základny, neb komunikační čipy na frekvencích 868MHz jsou na trhu více než 15let a jsou aplikačně prověřeny. Všechny tyto aspekty dávají této technologii opravdu značný potenciál na využití v systémech vzdálených odečtů. Jejich dopad do pokročilých systémů AMI či AMM je námětem na další testování a diskuzi, neboť datový tok je v těchto systémech řádově vyšší. V těchto systémech se však mohou uplatnit v práci výše zmíněné inovativní principy systémového konceptu.

4. Výpočet a návrh neintruzivního vazebního prvku NN v planárním uspořádání

4.1 Návrh vazebního prvku

Při návrhu vazebního prvku je třeba postupovat v souladu s matematicko-simulačními nástroji. Bez využití těchto nástrojů se návrh stává experimentem a jeho konvergence není zaručena. Pro návrh byl využit simulační systém COMSOL. Pro návrh lze však použít jakýkoliv nástroj ze srovnatelné třídy. V tomto systému je následně třeba modelovat rozložení a tvar jednotlivých závitů s hodnotícím kritériem intenzity elektrického pole v ose uvažovaného uspořádání. Počet evolucí závitových kružnic pak vyplyne z požadavku právě na intenzitu pole ve výše zmíněném místě a je důležitým výstupem simulace.

Simulační návrh samotného závitu má tři kritéria, a to ortogonální plochu závitu, technologickou izolační vzdálenost a velikost budícího proudu. Plocha závitu je stanovena na základě prostorového uspořádání výsledné cívky, intenzity pole a požadovaného počtu evolucí kružnic cívky. Tyto parametry se samozřejmě liší v závislosti na podmínkách žádané aplikace. Obecnou snahou je při návrhu tuto plochu maximalizovat. Technologická izolační vzdálenost je dána konstrukční třídou plošného spoje a minimální vzdáleností první evoluce cívky od osy vazebního vodiče. Velikost budícího proudu musí být stanovena opět na základě dostupné technologie plošného spoje a konstrukční třídy. Minimum je šestá konstrukční třída, která je v praxi dosažitelná.

Po stanovení těchto parametrů pomocí matematického modelování lze cívku realizovat pomocí návrhového systému pro výrobu plošných spojů. Použitý nástroj by měl obsahovat minimálně DRC (design review and check) modul pro kontrolu izolačních vzdáleností. Realizovaný tvar napojení závitu představuje obrázek 47 a 49. V daném případě záleží zejména na způsobu napojení, kdy je potřeba respektovat požadavek na maximální ortogonální plochu závitu. Konkrétní rozměry a provedení je nutné přizpůsobit na požadované aplikační omezení, tj. na vzdálenost první evoluce závitů od osy vazebního vodiče a maximální průměr vazební cívky.

Vazební prvek umožňuje tzv. stohovatelnost. K tomu účelu jsou po jeho obvodu vytvořeny konstrukční otvory po 15 stupních. Stohovatelností prvků lze zvýšit úroveň injektovaného signálu. Závislost je lineární na počtu přidaných prvků.

4.2 Analytický model a výpočet vazebního prvku

Pro analytický návrh jsem vycházel ze základních rovnic pro návrh konvenční rogowskiho cívky, tj. při znalosti geometrických rozměrů a počtu závitů cívky lze na základě následujících rovnic odvodit vlastní a vzájemnou indukčnost a z nich dále jednoduchou úpravou dojít i k hodnotám indukovaného napětí pro žádané frekvence signálu.

Indukované napětí

$$U_{ind_3kHz} = -j2\pi f \int \mathbf{B}dS = 2 \cdot \pi \cdot 3000 \cdot 4,69713e^{-7} = -j8,9mV$$

Rovnice 14 – Indukované napětí pro 3kHz (dosazení pro 2A sin signál a navržené uspořádání)

$$U_{ind_95kHz} = -j2\pi f \int \mathbf{B}dS = 2 \cdot \pi \cdot 95000 \cdot 4,69713e^{-7} = -j280,4mV$$

Rovnice 15 – Indukované napětí pro 95 kHz (dosazení pro 2A sin signál a navržené uspořádání)

Indukčnost rogowskiho cívky

$$L_{rog} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^9 \phi_i N_i = \frac{1}{2} (2,704e^{-8} \cdot 52 + \dots + 3,949e^{-8} \cdot 471) = 45,447\mu H$$

Rovnice 16 – Indukčnost rogowskiho cívky (dosazení pro 2A sin signál a navržené uspořádání)

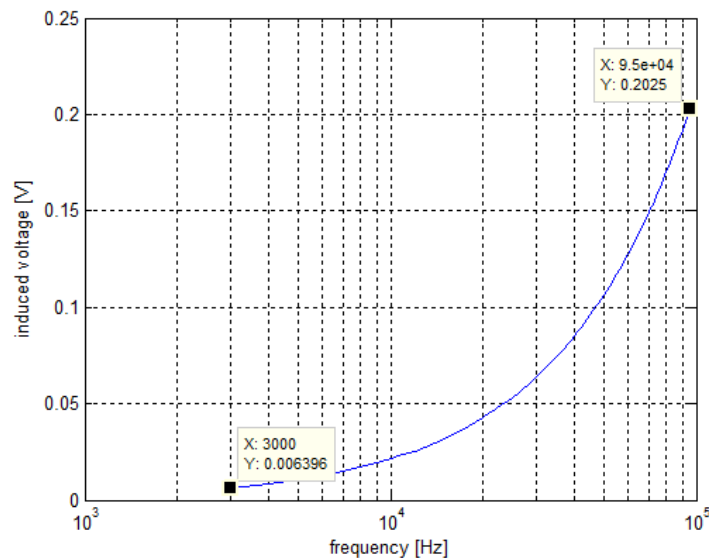
Vzájemná indukčnost

$$M = \frac{1}{I} \int \mathbf{B}dS = \frac{1}{2} \cdot 4,69713e^{-7} = 0,2349\mu H$$

Rovnice 17 – Vzájemná indukčnost rogowskiho cívky (dosazení pro 2A sin signál)

Na Obr. 41 je v logaritmickém měřítku vidět lineární závislost frekvenční charakteristiky na indukovaném napětí při velikosti budícího proudu 2A. Pozornému čtenáři by jistě neuniklo, že tato linearita není obecnou vlastností rogowskiho cívky. Funkcí frekvence je samozřejmě i vlastní impedance cívky,

kteřá velmi závisí na konstrukčním uspořádání. Chování cívky ve vyšších frekvencích je následně ovlivněno parametry jako např. mezizávitová kapacita či svod proti zemi. Takovéto chování je však zpravidla pozorovatelné až od řádu 100 kHz, kde začíná odchylka od lineárního průběhu. Při znalosti chování cívky, lze však cívku využít až do rozsahu asi 10 MHz. Za touto frekvencí dochází k vlastní rezonanci cívky a pro tyto kritické frekvence je cívka nepoužitelná. Nutno však dodat, že tyto vlastnosti lze ovlivnit právě konstrukčním uspořádáním a technologickým postupem výroby. Pro detailní vhlad do problematiky návrhu rogowskiho cívky odkazují čtenáře na článek pánů Musinga, Guilloda, Gerbera a Biela ze švýcarského technického institutu [20], kteří ve svém článku tuto problematiku z pohledu metodiky měření řeší.

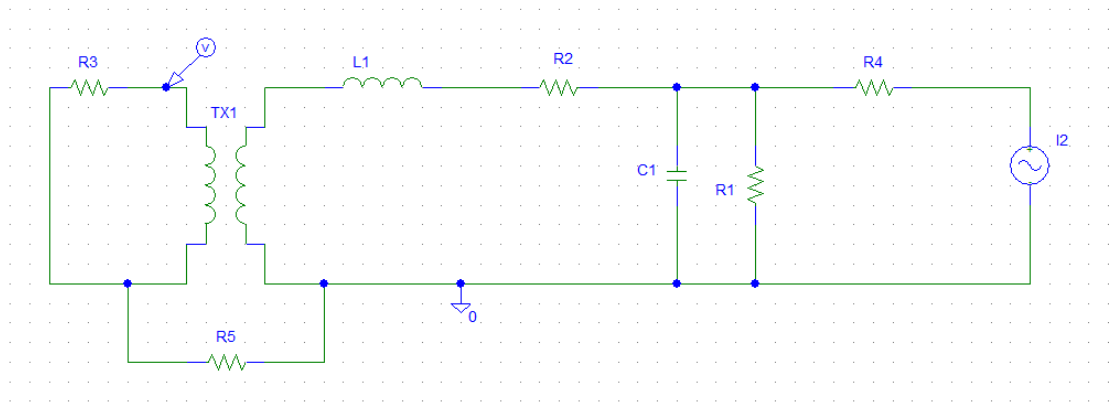


Obr. 41 - Frekvenční charakteristika indukovaného napětí při budícím proudu 2A.

4.3 Simulační model vazebního prvku

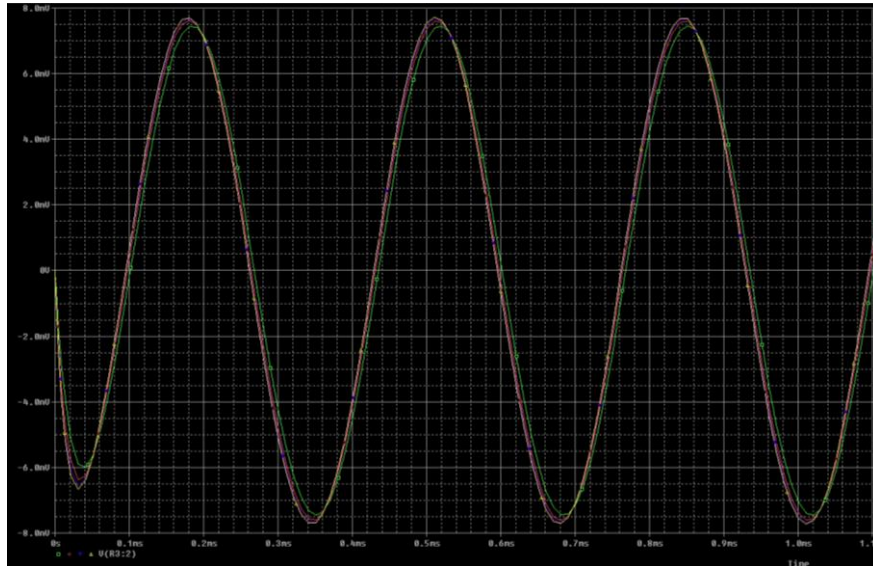
Na základě analytických předpokladů bylo sestaveno náhradní schéma rogowskiho cívky a provedeny orientační simulace pro různé úrovně zatížení sítě. Použité náhradní schéma zachycuje obr. 42. Pro simulaci muselo být schéma „uměle“ doplněno o vyrovnání potenciálu mezi galvanicky oddělenými zeměmi. Tato úprava je dána čistě ze simulačních důvodů a na dosažené výsledky neměla žádný vliv. V praxi se ovšem lze setkat i s reálným použitím takové úpravy, a to především v situacích, kdy jsou galvanicky oddělené oba konce. Zpravidla se však jedná o jiný typ aplikace. Parametry vazebního prvku vycházejí

z matematického modelu nad reálnou geometrií, viz dále. Simulační nástroj byl zvolen jako diverzní metoda ověření předpokládaných parametrů vazebního prvku. Odpor R4 simuluje výstupní impedanci vázaného signálu. V tomto simulačním uspořádání se sinusovým proudovým zdrojem nemá samozřejmě relevanci. Odpor R3 pak simuluje zatěžovací impedanci sítě (pro jednoduchost pouze čistě ohmickou).

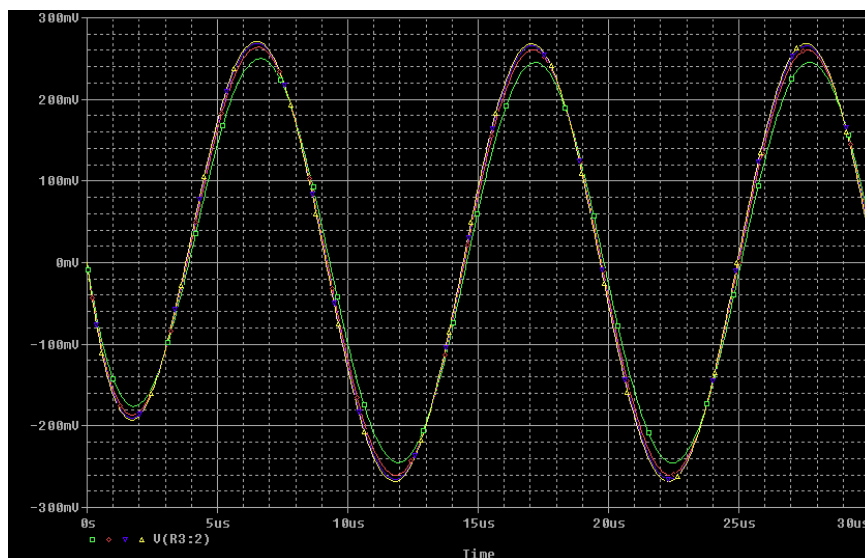


Obr. 42 – Simulační schéma s potenciálovým vyrovnáním

Z následujících obrázků by se mohlo zdát, že vliv zatěžovací impedance není významný. Uvažujeme však pouze čistě odporovou zátěž. V případě obecně komplexní zátěže se situace bude významně měnit, tuto situaci demonstruje Obr. 45 kde uvažujeme výstup vazebního prvku připojeného na vzdušné vedení. Je patrné, že při této reálné situaci dochází ke dvěma nepříjemným jevům. Je to pokles energie signálu, což samo o sobě nemusí představovat na přijímací straně významný problém. Mnohem nepříjemnější vlastností je posun fáze, resp. změna skupinového zpoždění signálu v závislosti na frekvenci a impedanci sítě. Jedná se opět o řešitelný problém, avšak jeho kompenzace je netriviální.

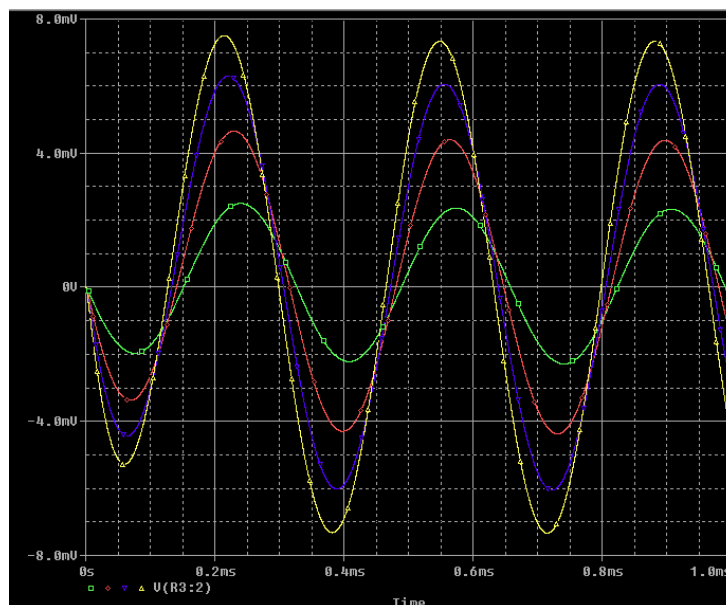


Obr. 43 – Parametrická analýza zatěžovací impedance v rozsahu 5 až 20 ohmů (3kHz).



Obr. 44 - Parametrická analýza zatěžovací impedance v rozsahu 5 až 20 ohmů (95kHz).

Problematicnost situace si musíme představit v míře komplexnosti nasazení této technologie, tedy při průchodu signálu přes různé „impedanční domény“ sítě, dané především transformací nebo kompenzací, může v krajně limitním případě dojít k vzájemnému odečítání signálů na stejné frekvenci. Změna impedance sítě pak může způsobovat určité chvění signálu (jitter). Toto hledisko je marginální, může však nastávat v místech s kompenzačními měniči s řízenou injektáží.



Obr. 45 – Situace při komplexním zatížení (použity parametry vzdušného vedení NN)

Adaptivní vazba signálu, která omezuje vznik výše popsaných negativních vlivů, je jedním z velmi aktuálních témat a je to velmi silné téma na případné pokračování práce. Tato práce zmíněné téma pokrývá však pouze vágně, a to především s ohledem na složitost dané problematiky.

4.4 Numerický model a návrh v systému COMSOL

Pro podporu mechanického návrhu a CAD návrhu v systému Altium byl použit simulační nástroj COMSOL, pomocí kterého bylo simulováno rozložení závitů. Zároveň bylo možné ověřit mechanické rozložení závitů v jednotlivých evolucioních.

4.4.1 Parametrický vstup do úlohy

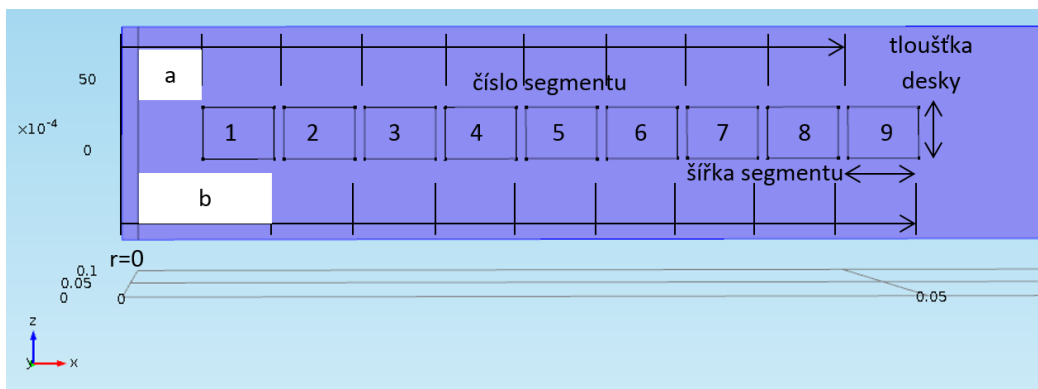
Vstup do úlohy byl omezen zejména dosažitelnou technologií při výrobě PCB (viz kapitola 4.4). Na základě technologických omezení bylo specifikováno následující rozložení závitů a celkové mechanické uspořádání.

Pro návrh bylo zvoleno následující uspořádání:

Tloušťka desky : 3,2 mm

Šířka segmentu: 4,2 mm

Minimální střední rozteč spojů: 0,8 mm



Obr. 46 - Rozložení závitů cívky na PCB – příčný řez poloměrem

Rozdělení jednotlivých evolucí závitů ukazuje následující tabulka.

TABULKA 9 - POČET ZÁVITŮ PO OBVODU DESKY PODLE ČÍSLA SEGMENTU

číslo segmentu	1	2	3	4	5	6	7	8	9
počet závitů	39	78	11 7	15 7	19 6	23 5	27 4	31 4	35 3

Poloměry jednotlivých evolucí ukazuje následující tabulka.

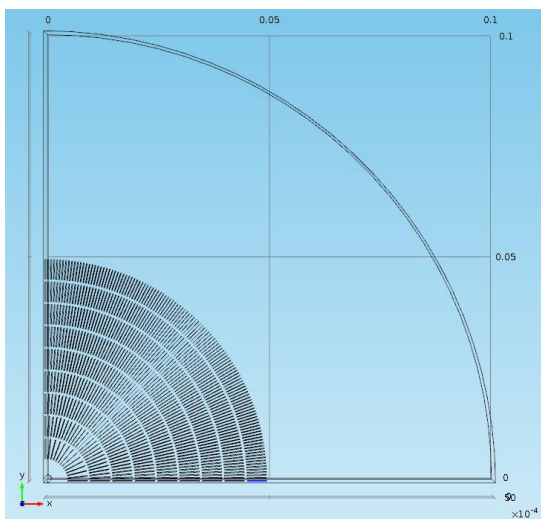
TABULKA 10 - VZDÁLENOSTI VRTÁNÍ OD STŘEDU SYMETRIE DESKY (POLOMĚRY)

číslo segmentu	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a [mm]	5	10	15	20	25	30	35	40	45
b [mm]	9,2	14, 2	19, 2	24, 2	29, 2	34, 2	39, 2	44, 2	49, 2

4.4.2 Výpočty FEA

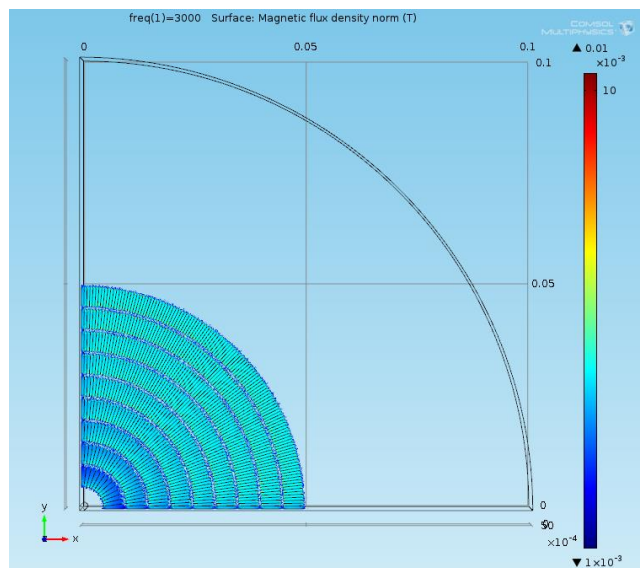
Následující obrázky představují navrženou geometrii vlastního modelu, nad kterým byly provedeny výpočtové iterace a výsledky vlastních výpočtů.

Následující obrázek demonstruje mechanické rozložení závitů, dle vstupu úlohy.



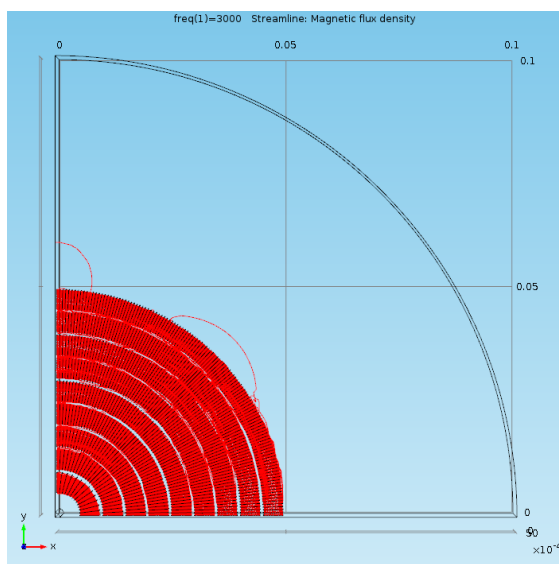
Obrázek 1 - Rozložení idealizovaných závitů na výseči cívky – rovina desky PCB

Na dalším obrázku je zachycena hodnota indukce pro nejhorší případ tedy $f=3\text{kHz}$.



Obrázek 2 – Magnetická indukce uvnitř cívky

Další obrázek demonstruje rozložení siločar magnetického pole uvnitř cívky. Rozptýlení siločar na poslední evoluci závitů je dáno mírnou nestabilitou simulace, resp. díky nastaveným okrajovým podmínkám (viz porovnání výsledků simulace a analytického řešení).



Obrázek 3 – Siločary magnetického pole uvnitř cívky

4.5 Korelace dosažený výsledků výpočtu

Dle následující tabulky je zřejmé, že výpočty FEA jsou ve srovnání s analytickou metodou v souladu, kromě vlastní indukčnosti injektážní cívky. Nestabilita řešení posledního závitů byla způsobena vlivem integrace

magnetického toku na okraji úlohy, kdy vlivem okrajové podmínky a nutnosti úpravy úlohy ve smyslu stability došlo k vyššímu rozptylu.

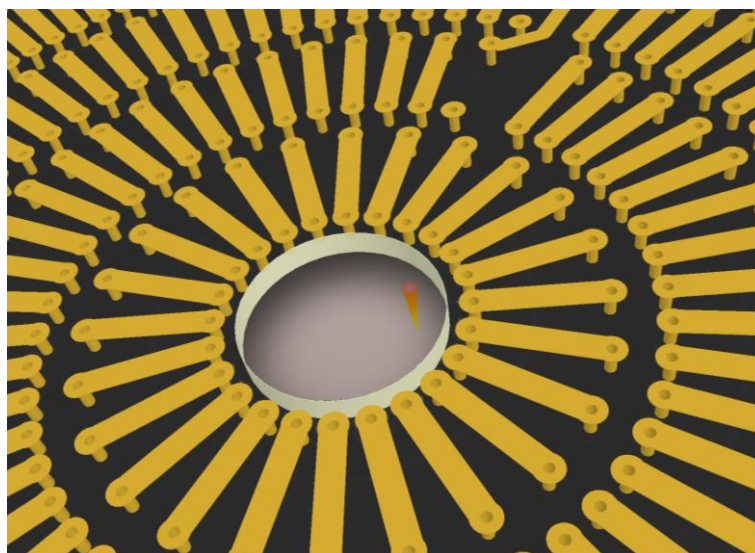
TABULKA 11 - SROVNÁNÍ ANALYTICKÝCH A NUMERICKÝCH VÝPOČTŮ

	L_{rog} [μH]	M [μH]	$U_{\text{ind. 3kHz}}$ [mV]	$U_{\text{ind. 95kHz}}$ [mV]
FEM	45,447	0,235	8,9	280,4
Analyticky	64,004	0,236	8,9	281,8

4.6 Realizace v návrhovém systému Altium

Pro realizaci cívky byl zvolen návrhový systém Altium Designer, který umožňuje precizní návrh cívky. Tento návrhový systém umožňuje i funkci tzv. řízené impedance tj. na základě výrobní technologie a elektrických parametrů zvoleného vícevrstvého spoje dopočítává impedanci tažené cesty. Toho lze s výhodou využít pro dimenzaci budícího proudu, neboť při znalosti impedance spoje a budícího proudu lze stanovit Jouleovi ztráty a tedy ohřev samotného PCB.

Na Obr. 47 je znázorněno uspořádání tzv. dopředného závitu rogowského cívky. Geometrie cívky má velký vliv na výsledné parametry pole, resp. indukovaného napětí. Na zmíněném obrázku je patrný i tzv. prokov, což je spojení mezi jednotlivými vrstvami plošného spoje. Jeho technologické provedení (zpravidla pokovením) do značné míry předurčuje proudovou zatížitelnost v režimu injektáže.



Obr. 47 – Geometrie dopředného závitu

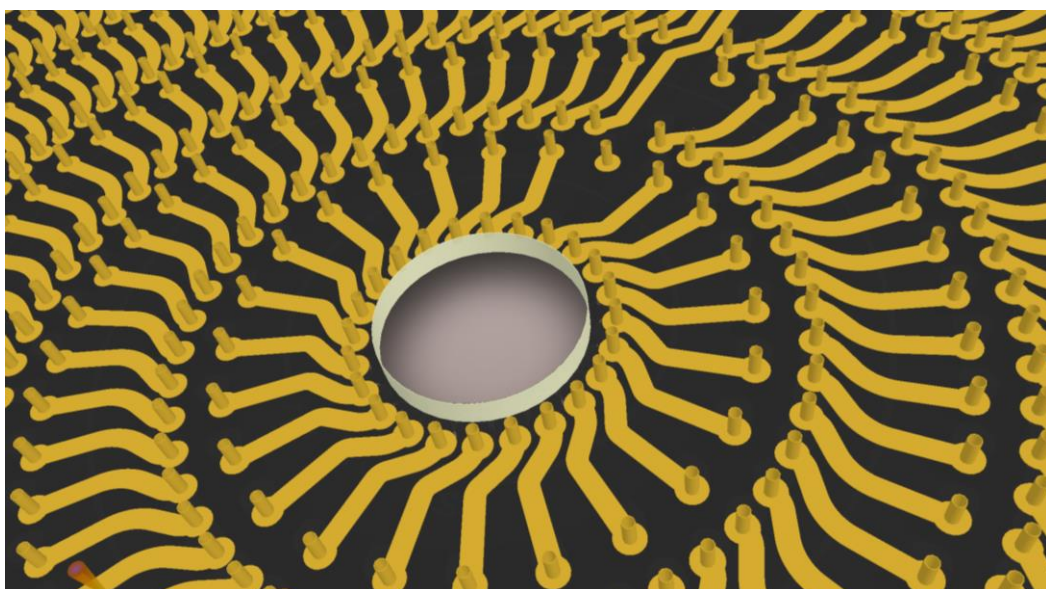
Na Obr. 48 je znázorněna geometrie vratného vodiče. Z principu rogowského cívky požadujeme, aby plocha ortogonálního průřezu vodiče byla co nejmenší. Větší plocha vratného vodiče byla zvolena s ohledem na odpor této dráhy a s tím

souvisejícího oteplení PCB. Z 3D modelu je také patrný návrhový princip rogowskiho cívky s koncem a možností rozevření. Tato vlastnost však nebyla požadována.



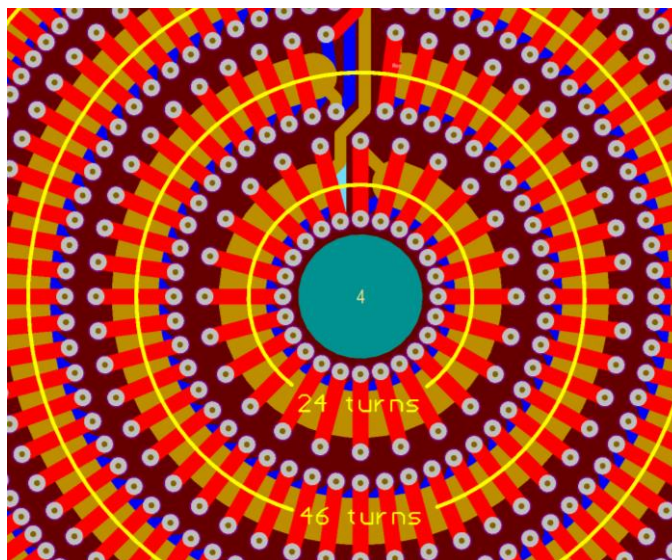
Obr. 48 - Geometrie vratného vodiče

Na Obr. 49 je pak zobrazena vrstva s vratným vodičem cívky. Pozornému čtenáři je jistě na první pohled patrný kompromis, který je z konstrukčního hlediska nutné učinit. Pro dosažení maximální intenzity pole je samozřejmě nutná co největší ortogonalita po celém obvodu závitů. Existují sice principy s téměř plnou ortogonalitou závitů, nicméně většinou je to za cenu menšího počtu závitů v sumě celého designu. Mírné zalomení závitů před vstupem do „druhé otáčky“ je tedy nezbytným kompromisem.



Obr. 49 – Geometrie vratného závitů

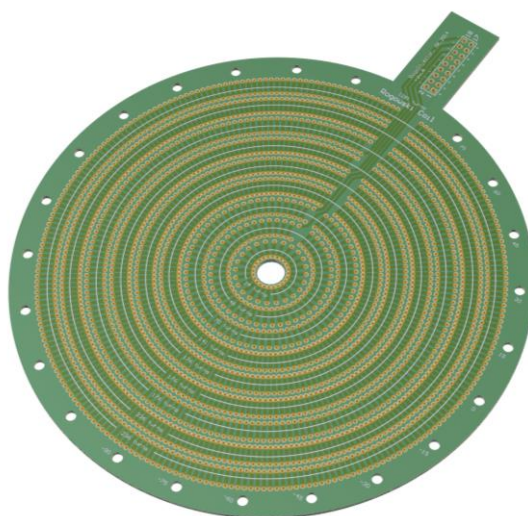
Pokud by byl vratný závit konstruován jako rovný s definovaným úhlem, dal by se stanovit jeho ortogonální průmět pomocí „ $\cos \varphi$ “. Z obrázku je také patrné, že s rostoucí vzdáleností jednotlivých evolucí závitů od středu se tato chyba zmenšuje. Zároveň evoluce blíže středu mají menší počet závitů.



Obr. 50 - Celkové uspořádání vrstev PCB

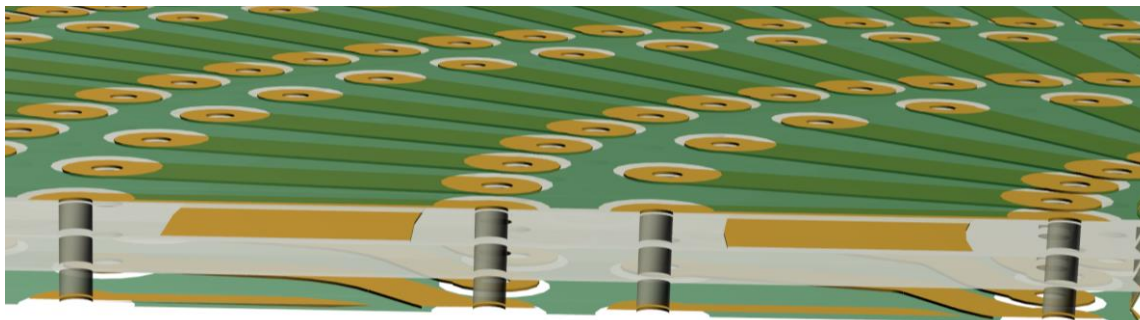
Obr. 50 představuje výřez z návrhového systému Altium při všech aktivních vrstvách plošného spoje, jak byli popsány výše. Žlutě vysvicovaná vrstva je pouze informativní vrstva, která je na závěr nanášena sítotiskem na plošný spoj pro lepší orientaci při zapojování a měření.

Obr. 51 pak představuje výstup v podobě fotorealistického 3D modelu, který lze následně použít pro návrh mechanického uložení, či pro návrh mechaniky plastů.



Obr. 51 - 3D model cívky

Obr. 52 zobrazuje řez 3D modelem cívky. Čtyři černé vertikální sloupky představují tzv. „prokovy“ ve dvou evolucích závitů. Z řezu je také lépe patrné uložení vratného vodiče ve druhé vrstvě spoje. Zeleně je znázorněna tzv. „nepájivá“ maska spoje, která nemá přímý vliv na konstrukci cívky, ale ovlivňuje výpočet impedance cest.



Obr. 52 - Ilustrativní řez cívkou

Konstrukční popis a způsob realizace této cívky je v době psaní textu této práce v řízení na duševní ochranu a dá se předpokládat, že v době publikace bude součástí patentu nebo průmyslového vzoru.

5. Experimentální ověření

V průběhu studia a při aktivitách spojených s disertační prací jsem realizoval několik zajímavých experimentů. Následující kapitola tedy popisuje některá sestavení a dosažené výsledky. Hlavní částí je pak ověření výše popsaného návrhu rogowskiho cívky v planárním uspořádání.

5.1 Měření šíření signálu PLC na hladinách NN a VN

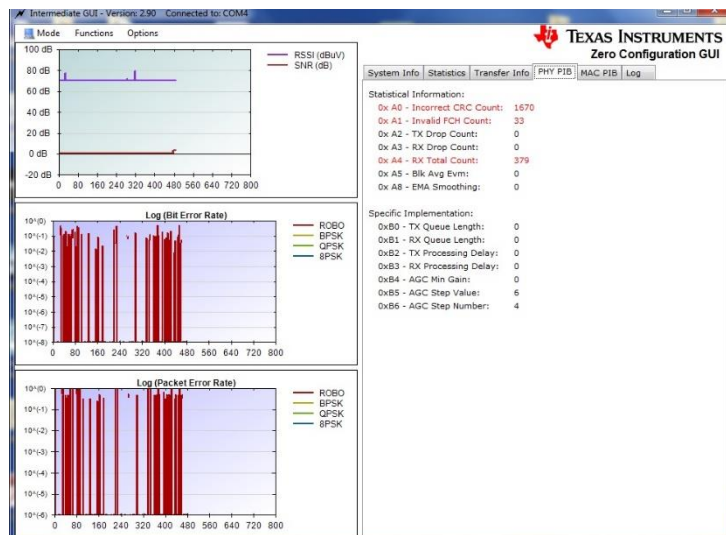
Cílem tohoto experimentu bylo ověření robustnosti v práci popsaných protokolů pro komunikaci po silových vedeních. Soustředil jsem se zejména na protokol G3 a jeho možnosti prostupu přes transformátory VN/NN a zpět. Tedy ověření trasy z NN přes VN zpět na NN.

K tomuto experimentu jsem využil zázemí laboratoře ETL, která je v gesci katedry energetiky a která disponuje příslušným přístrojovým vybavením (včetně kalibrací) a certifikací pro provádění těchto experimentů.

Motivací experimentu bylo také se co nejvíce přiblížit k reálným vlastnostem přenosové trasy. Proto jsem zvolil měřící trafo 30kV na 100, které je v laboratoři ETL pravidelně podrobováno experimentům na částečné výboje a které je v poli běžně používáno. Pro druhý přestup mezi hladinami NN a VN byl použit vestavěný autotransformátor v ovládacím pultu laboratoře. Detailní popis zařízení záměrně neuvádím, neboť se jedná o principiální experiment a přesné přístroje v cestě signálu nejsou pro tento typ experimentu žádoucí.

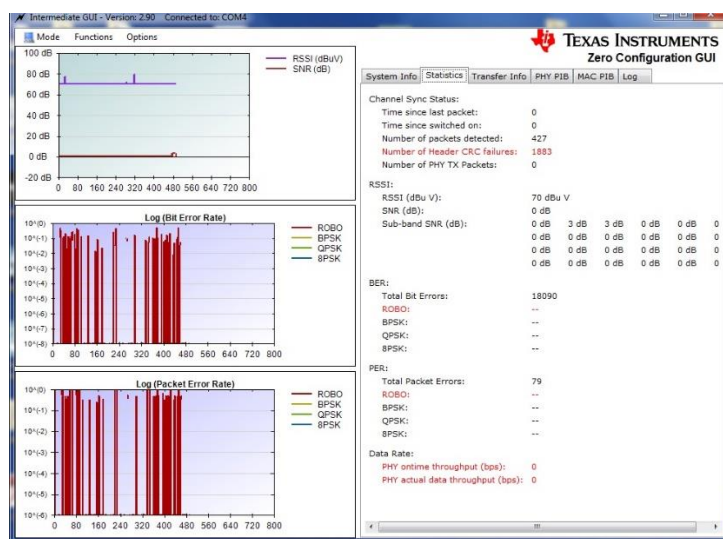
Pro přenos signálu jsem použil demo kit PLC modemu od společnosti Texas Instruments, který je postaven na součástkách TMS320F28PLC84 a AFE031. Jedná se o speciálně vyvinuté integrované obvody pro komunikaci v chytrých sítích v pásmu CENELEC A.

Měření byla provedena pro dva scénáře. První byl s přímo uzemněným koncem trafa na straně NN a druhý s neuzemněným koncem, resp. s přímo-vázaným vazebním prvkem modemu. V obou scénářích došlo k přenosu informace, ale s výrazně odlišnými výsledky. Je pochopitelné, že přímo uzemněný konec modemu (bez shuntu, resp. z pohledu modemu bez impedančního přizpůsobení) není standardní přenosový stav. Může nám však simulovat např. poruchový stav na vedení.



Obr. 53 – Přímé uzemnění

Obr. 53 ilustruje situaci s přímo uzemněným vývodem modemu a druhým vývodem naprázdno. Takováto situace představuje pro modem ve své podstatě signálový zkrat, resp. extrémně nízkou impedanci, proti které svůj signál injektuje. Z obrázku i doprovodného grafu řídicího softwaru je patrná vysoká chybovost signálu.

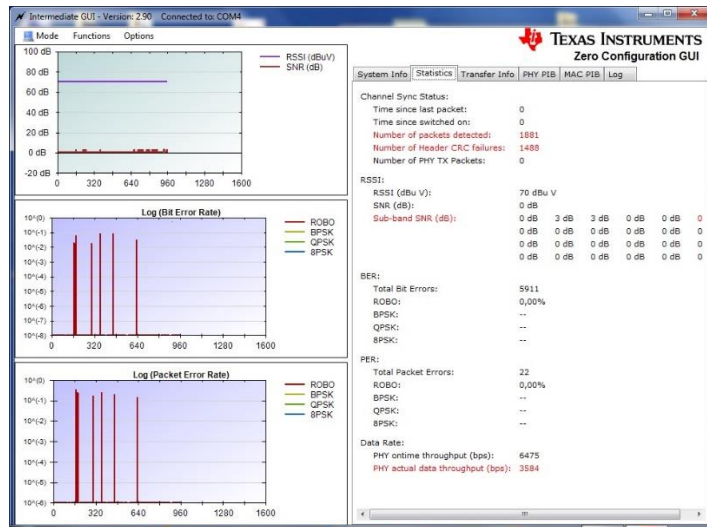


Obr. 54 – Statistika přenosu

Při pohledu na výslednou statistiku přenosu signálu na Obr. 54 je třeba si uvědomit vlastnosti protokolu G3. Jak bylo výše detailně popsáno, protokol G3 disponuje robustními samoopravnými kódy (Reed-Salomon). To vede k tomu, že pokud je paket porušen jen částečně, lze informaci na druhém konci přenosového kanálu plnohodnotně obnovit. Pokud bychom se tedy věnovali pouze celkové statistice přenesené informace, mohli bychom mylně vyhodnotit kvalitu a robustnost použité technologie. To je i důvodem, proč je ve výsledných

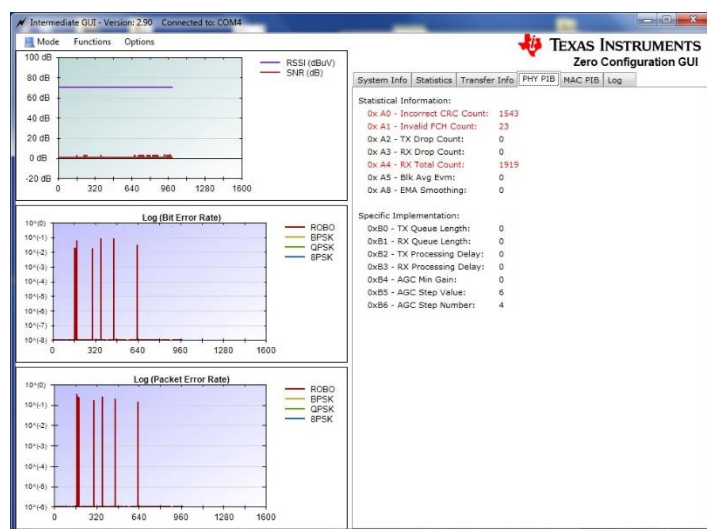
statistikách uveden rozpad chyb na jednotlivé vrstvy ISO/OSI modelu protokolu G3. Z výše uvedených obrázků lze pak usuzovat na chyby ve fyzické nebo linkové vrstvě. Při pohledu na celkovou chybovost přenosu je však patrné, že výsledek není uspokojivý.

V druhém scénáři byl však výsledek mnohem lepší. Na tomto místě je třeba upozornit, že se pohybujeme na hraně použité technologie, kdy při komunikaci přes dva transformátory bez bypassu byly očekávány velmi špatné výsledky.



Obr. 55 – Transformátor naprázdno

Při pohledu na Obr. 55 je vypovídající už dosažená přenosová rychlost tj. 6,4kBit. V předchozím scénáři byla tato rychlost vinou chybovosti na různých úrovních přenosového kanálu prakticky nulová. V tomto sestavení tedy protokol G3 a jeho systémová specifikace prokázala svoje dobré vlastnosti.

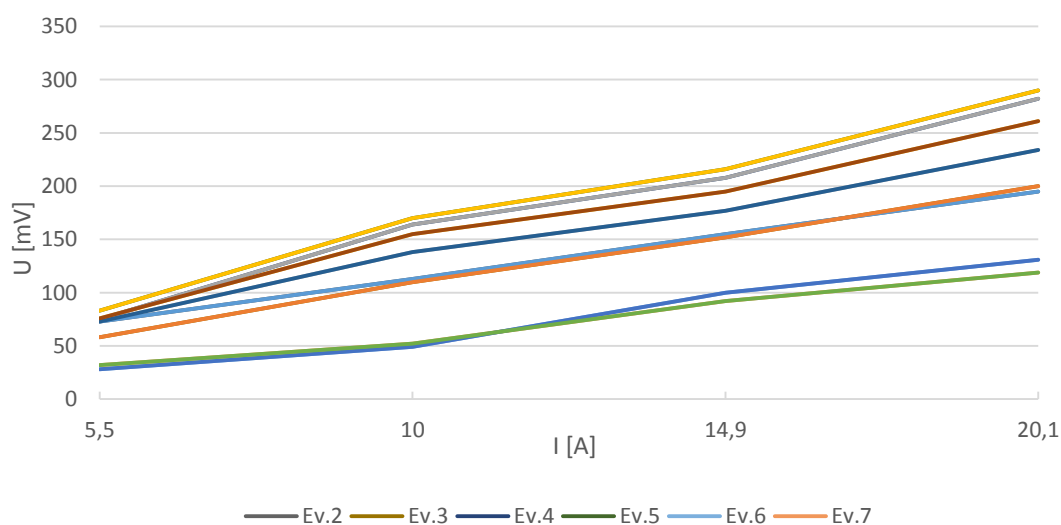


Obr. 56 – Statistika přenosu

Tabulka 12 - Naměřené parametry cívky

Evoluce závitů	Ev.1	Ev.2	Ev.3	Ev.4	Ev.5	Ev.6	Ev.7	Ev.8	Ev.9
Počty záv. v evoluci	24	46	70	141	176	176	176	236	236
R [mΩ]	400	1000	1200	1600	580	600	700	1300	1200
U [mV] při I = 5,5 A	-	73	58	75	83	28	32	73	76
U [mV] při I = 10 A	-	113	110	164	170	49	52	138	155
U [mV] při I = 14,9 A	-	155	152	208	216	100	92	177	195
U [mV] při I = 20,1 A	-	195	200	282	290	131	119	234	261

Přes zmíněné vlastnosti se však nejedná o řádové rozdíly, ale spíše o vysvětlení a poukázání na důvody, které vedou k nutnosti kalibrace dané cívky. Tato kalibrace je však potřeba pro danou výrobní sérii provést pouze jednou. Výše uvedené hodnoty byly naměřeny v laboratoři přístrojů na katedře energetiky. Topologie měření byla sestavena dle principu na Obr. 28.



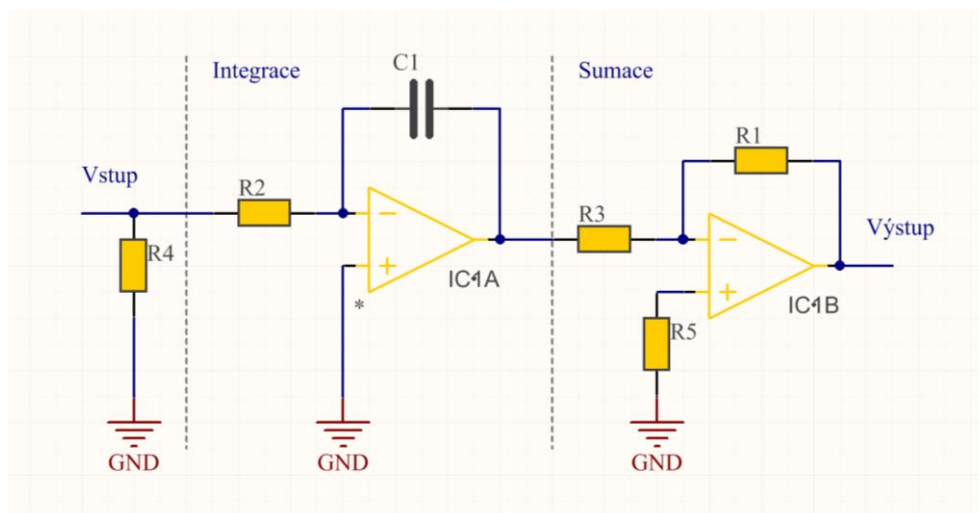
Obr. 58 - Kalibrace cívky pro měření proudu

Obr. 58 demonstrativně ukazuje způsob a výsledek základních kroků kalibrace cívky. Závislost indukovaného napětí je v případě rogowskiho cívky obecně lineární funkce, která má však na svém grafu dvě rezonanční frekvence dané konstrukčním řešením tj. reálnými parametry cívky. V případě tohoto uspořádání se však jedná prakticky o devět nezávislých cívek, kde každá z nich má jinou rezonanční frekvenci.

Samotné měření napětí na cívce má svá specifika. Na základě teoretického rozboru víme, že napětí na svorkách je přímo úměrné derivaci měřené proudu.

Pro převod proudu na napětí je tedy potřeba výstupní napětí integrovat. Pro základní ověření lze však využít i tzv. samointegrační vlastnosti cívky, kdy při zatížení reálné cívky ohmickou zátěží získáme na výstupu integrační člen. Tento princip byl uplatněn pro zmíněné měření výše. Zátěž byla v tomto případě $1\text{M}\Omega$ (R_4 na Obr. 59). Ryze praktickou poznámkou je pak i nutnost uvědomění si, že i samotná sonda osciloskopu má konečně velký vstupní odpor v řádech $\text{M}\Omega$ a je potřeba s touto hodnotou pracovat.

Pro následné vyhodnocení je optimální využít elektronické zařízení, které realizuje integrátor s velkým vstupním odporem, následovaný sumačním zesilovačem, který vybrané dílčí měřící cívky sečte, jak jej ilustruje Obr. 59



Obr. 59 - Zpracování signálu z jedné evoluce prvku

Na obrázku výše je uvedené schéma zapojení pro měření jedné evoluce závitů. Na základě požadované aplikace je možné do části sumačního zesilovače navázat další evoluce. Výsledkem by bylo pouze připojení stejně velký odporů R_3 do stejného místa schématu. V případě jednoduchého měření lze sumační zesilovač nahradit prostým sledovačem pro impedanční oddělení zpracovávaného signálu.

Je zřejmé, že pokročilé funkce vazebního prvku jsou dosažitelné až na základě digitálního zpracování signálu. V takovém případě je možné vynechat i integrační člen a provést číslicovou integraci až v rámci signálového procesoru.

6. Přínos disertační práce

Přínos disertační práce lze identifikovat ve dvou základních rovinách. V prvním přiblížení jde především o systémový návrh a způsob komunikace v tzv. chytrých sítích. V kapitole 3 je rozpracován koncept komunikace, který není aktuálně nikde v odvětví energetiky uplatňován. Jedná se konkrétně o způsob integrace cloud systémů do struktury distribuovaných řídicích systémů. Tento koncept má přesah zejména do oblasti AMM a AMR, do které přináší zcela nový způsob realizace těchto úloh.

V druhé rovině se jedná především o zcela původní návrh neintruzivního vazebního prvku pro komunikaci po silových vedeních pomocí rogowskiho cívky v planárním uspořádání, který současně realizuje funkci injektoru nevýkonových signálů pro přenos informace. Tento návrh je v době odevzdání již v řízení na duševní ochranu. Bližší pohled a vysvětlení podává kapitola 7.1.

7. Závěr

Tato práce se věnuje jednomu z nejdiskutovanějších témat posledních let v oboru energetika, a to možnostem a způsobům integrace řídicích a monitorovacích systémů chytrých sítí do stávající infrastruktury. V konceptuální rovině se tato práce zaměřuje na možnosti a optimalizaci přenosu informací s ohledem na minimální dopad do stávajících řídicích systémů a infrastruktury.

Tuto otázku řeší zejména kapitola 2 a 3. Kapitola 2 dává obecný vhled a pojednání o standardizaci v dané oblasti a poukazuje na určité rizikové aspekty v dotčené oblasti. Kapitola 3 se pak detailním způsobem věnuje možnostem implementace a integrace nových technologií do stávající infrastruktury. Určitým závěrem či zjištěním této kapitoly je především absence možnosti integrace technologií pro přenos informace, které výrobci a dokonce i některé normativy označují jako komplexní řešení pro SG. Detailní analýza na vstupu této kapitoly odhalila významné překážky nejen na úrovni aplikace, ale především v nižších vrstvách implementace jednotlivých komunikačních topologií či protokolů. Ukázalo se, že schopnost integrace parciálních systémů je velmi zásadním momentem při implementaci SG, a to dokonce i při existenci normativů, které mají značný potenciál tuto oblast pokrýt (IEC 61850).

Dalším závěrem kapitoly 3 je také posouzení způsobu vazby malovýkonového signálu na silové vedení a zhodnocení vlivu impedančního přizpůsobení při použití konvenčního způsobu vazby, tj. transformátorová vazba. Dále jsou zde uvedeny základní analytické vzorce a výpočty vztahujících se k řešené problematice popř. odkazy na literaturu, která některé specifické úlohy řeší ve větší míře. Mimo hlavní těžiště práce je výstupem této kapitoly také návrh a částečná realizace adaptivně řízeného vazebního prvku pro zvýšení účinnosti injektáže pomocí standardní transformátorové vazby. Tato problematika je ve světě řešena jako samostatně stojící téma a v rámci této práce představuje spíše námět na další pokračování. Pro další studium je zde uveden odkaz na další články autora vztahující se k této oblasti.

Těžištěm práce a hlavním výstupem kapitoly 4 je kompletní výpočet a návrh neintruзивního vazebního prvku NN v planárním uspořádání, kde jsou vysvětleny základní postupy a úskalí tohoto návrhu. Celá problematika je zde řešena synteticky pomocí třech odlišných metod návrhu, které jsou vzájemně porovnávány. Na prvotní analytický model navazuje simulační model realizovaný v SW PSPICE, který analytickým způsobem zkoumá možnosti různých stavů připojení vazebního prvku. Na tuto teoreticko-simulační část volně navazuje část konstrukční, kde jsou na matematickém modelu navrhovaného řešení v SW COMSOL validovány výsledky analyticko-simulační části. Kapitulu 4 pak uzavírá vlastní realizace v návrhové systému Altium3D. Výsledkem této kapitoly je především samotný prototyp neintruзивního vazebního prvku, ale také mnohá technologická doporučení vedoucí k jeho vyrobiteľnosti.

Závěrečná kapitola 5 poukazuje na některé zajímavé experimenty doprovázející návrh a oživení výše zmíněného vazebního prvku. V této části jsou řešeny pouze základní a elementární měření, která měla prokázat samotnou funkci zařízení. Precizní experimentální ověření by vyžadovalo významně složitější specifikaci a zejména realizaci experimentu, což není v souladu z původním plánem a metodikou práce. Je to však jedním ze zajímavých námětů na další pokračování práce. Specificky bych poukázal na oblast měření vyšších harmonických proudů či velkých derivací poruchových proudů s potlačením vlastní rezonance senzoru, což je značnou limitací konvenčně řešených rogovského cívek a navržené řešení tuto možnost v teoretické rovině nabízí.

7.1 Význam a využití dosažených výsledků

Mnohé výsledky této práce byly již zmíněny. Kladné ohlasy vzbuzují zejména dvě části této práce, a to adaptivně řízený injektážní prvek a neintruзивní vazební prvek v planárním uspořádání. Silné ohlasy na druhý zmíněný vedly k přihlášce řešení k duševní ochraně, kdy velký zájem vzbudily dvě významné společnosti v oboru energetika. Na základě těchto reálných ohlasů a poptávek si dovolím tento výstup práce označit jako významný. Proti původním předpokladům se jako perspektivnější a významnější jeví využití zmíněného vazebního prvku pro režim měření proudu, a to především z důvodu škálovatelnosti, stohovatelnosti a zejména planární realizaci samotného prvku.

8. Literatura

- [1] M. H. Shwehdi, A. Z. Khan, A POWER LINE DATA COMMUNICATION INTERFACE USING SP SPECTRUM TECHNOLOGY IN HOME AUTOMATION, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, July 1996
- [2] R.E. Ziemer and R.L. Peterson, Digital Communications and Spread Spectrum System, Macmillan, New York, 1985
- [3] H. C. Ferreira, M.Grové, O. Hooijen and A. J. Han Vinck, "Power line communication: an overview," in IEEE AFRICON 4th, vol 2. Issue 24-27, pp. 558–563, 1996.
- [4] FERREIRA, H. C., ed. et al. Power line communications: theory and applications for narrowband and broadband communications over power lines. Chichester: John Wiley & Sons, 2010. xxvii, 507 s. ISBN 978-0-470-74030-9.
- [5] KRUTINA, A.: PpS na straně spotřeby na základě principu Demand-Response. Sborník konference EPE 2012, Brno, ISBN 978-80-214-4514-7
- [6] Výroční zpráva britské vlády o stavu zavádění Smart Grid, [online], URL:<https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/266685/second_annual_report_smart_meters.pdf> [cit.2015-9-30]
- [7] Výroční zpráva obritské vlády o zavádění chytrého měření, [online], URL:<https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/276656/smart_meter_roll_out_for_the_domestic_and_small_and_medium_and_non_domestic_sectors.pdf> [cit.2015-9-30]
- [8] Health Impacts of Radio Frequency Exposure From Smart Meters, [online], URL:<<http://ccst.us/publications/2011/2011smart-final.pdf>>, [cit.2015-9-30], ISBN 978-1-930117-42-6
- [9] KRUTINA, A., BARTOVSKÝ, J. PLC communication in Smart Grid : the self-tune adaptive coupler. In Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE 2014). Piscataway: IEEE, 2014. s. 165-168. ISBN: 978-1-4799-3806-3

- [10] M.P. Sibanda, P.A. Janse van Rensburg, H.C. Ferreira, "A Compact Economical PLC Band-Pass Coupler with Impedance Matching", 2013 IEEE 17th International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, 2013
- [11] K. C. Abraham, S. Roy, "A Novel High-speed PLC Communication Modem", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 4, October 1992
- [12] Y.Sun, G.A.J.Amaratunga, „High-Current Adaptive Impedance Matching in Narrowband Power-line Communication Systems“, 2011 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, IEEE, 2011
- [13] M.Rapp, K. Dostert M.Gotz, "Power line channel characteristics and their effect on communication system design," Communications Magazine, IEEE , vol. 42 Issue:4 , pp. 78 - 86, Apr. 2004
- [14] OPEN Meter project, Description of current state-of-the-art technologies and protocols [online], URL:<<http://www.openmeter.com>> [cit.2015-9-30]
- [15] Dokumentace projektu SET Plan, [online], URL:<http://ec.europa.eu/energy/technology/set_plan/set_plan_en.htm> [cit.2015-9-30]
- [16] Stránky se specifikací M-BUS, [online], URL:<<http://www.m-bus.com>> [cit.2015-9-30]
- [17] Specifikace standardu PLC G3 a navazující dokumentace, [online], URL:<<http://www.maxim-ic.com/products/powerline/pdfs/G3-PLC-MAC-Layer-Specification.pdf>> [cit.2015-9-30]
- [18] Specifikace protokolu PRIME, [online], URL:<http://www.prime-alliance.org/Docs/Ref/PRIME-Spec_v1%203%20E_201005.pdf>, [cit.2015-9-30]
- [19] Specifikace IEEE802.15.4(2006), [online], URL:<<http://profsite.um.ac.ir/~hyaghmae/ACN/WSNMAC1.pdf>>, [cit.2015-9-30]
- [20] German major shift from nuclear to renewables: myths and realities, URL:<<http://www.energymarketprice.com/SitePage.asp?Command=ArticleView&ID=8378>> [cit.2014-1-21]

- [21] T. Guillod, D. Gerber, J. Biela, Design of a PCB Rogowski Coil based on the PEEC Method, ISBN: 978-3-8007-3414-6
- [22] Mutual inductance [online],
URL: <<http://www.phys.ttu.edu/~huang24/Teaching/Phys2401/LectureNotes/Chapter 32B.pdf>> [cited 3-5-14]

9. Publikace

- [1] VOSTRACKÝ, Z., PÍCLOVÁ, P., POLÍVKA, J., ŠNAJDR, J., KRUTINA, A. INCREASING OF TRANSMISSION ABILITY AT HIGH VOLTAGE OVERHEAD LINES AMPACITY MODEL. In Proceedings of the 12th International Scientific Conference – Electric Power Engineering 2011. Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, 2011. s. 53-56. ISBN: 978-80-248-2393-5
- [2] KRUTINA, A. Aplikace ZigBee v chytré síti Micro-Grid. In *Elektrotechnika a informatika 2009. Část 3., Elektroenergetika*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2009. ISBN: 978-80-7043-811-4
- [3] VOSTRACKÝ, Z., KRUTINA, A., POLÍVKA, J., PÍCLOVÁ, P., ŠNAJDR, J. Možnosti využití vyšší přenosové schopnosti vedení. In *Sborník anotací a příspěvků semináře Efektivní energetika XII*. VŠB-Technická univerzita Ostrava: Ediční středisko VŠB-TU Ostrava, 2011. s. 37-40. ISBN: 978-80-248-2412-3
- [4] LIŠKA, J., JANEČEK, E., KRUTINA, A., KRAUS, V., HOLÍK, M. *Časofrekvenční metody zpracování signálů pro detekci událostí*. Plzeň : ČEPS, a.s., 2011. 1 - 46 s.
- [5] VOSTRACKÝ, Z., PÍCLOVÁ, P., KRUTINA, A., POLÍVKA, J., ŠNAJDR, J., KADERA, M., JIŘÍ, V. Potenciální proudové zatížení přenosového řetězce. In *Proceedings of the 6th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering 2011*. Košice: Equilibria, s. r. o., 2011. s. 92-95. ISBN: 978-80-553-0724-4
- [6] GEORGIEV, V., JEŽEK, O., KRUTINA, A., SOBOTA, J., SCHLEGEL, M. ZigBee-based wireless measurement system. In *Process Control 2010*. Brno: Tribun EU, 2010. s. 1-9. ISBN: 978-80-7399-951-3
- [7] KRUTINA, A. Komunikační hranice ostrovního provozu v chytré síti. In *Elektrotechnika a informatika 2010. Část 3., Elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2010. s. 39-40. ISBN: 978-80-7043-915-9
- [8] SCHLEGEL, M., BALDA, P., SOBOTA, J., JEŽEK, O., MERTL, J., GEORGIEV, V., KRUTINA, A. *Měřicí systém "dýchání" obráběných klikových hřídelů s bezdrátovým přenosem dat*. 2010.

- [9] KRUTINA, A., ŠNAJDR, J., VOSTRACKÝ, Z. *Software pro diagnostiké testování komponenty řídicího systému ČEPS pro výpočet teploty vedení*. 2011.
- [10] KRUTINA, A. PpS na straně spotřeby na základě principu Demand-Response. In *Proceedings of the 13th International Scientific Conference – Electric Power Engineering 2012*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012. s. 121-123. ISBN: 978-80-214-4514-7
- [11] KRUTINA, A. AMR/AMI – Automatic Meter Reading & Advanced Metering Infrastructure. In *Electric Power Engineering and Ecology - Selected Parts IV.. Praha : BEN - technická literatura, 2012, s. 34-38*. ISBN: 978-80-7300-461-3
- [12] KRUTINA, A., BARTOVSKÝ, J. PLC communication in Smart Grid : the self-tune adaptive coupler. In *Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE 2014)*. Piscataway: IEEE, 2014. s. 165-168. ISBN: 978-1-4799-3806-3
- [13] BARTOVSKÝ, J., HOLÍK, M., KRAUS, V., KRUTINA, A., ŠALOM, R., GEORGIEV, V. Overview of Recent Advances in Hardware Implementation of Mathematical Morphology. In *20th Telecommunications Forum TELFOR 2012*. Bělehrad: IEEE, 2012. s. 642-645. ISBN: 978-1-4673-2984-2
- [14] KRUTINA, A. ANALÝZA STANDARDŮ PRO KOMUNIKACI PO SILOVÉM VEDENÍ. In *Elektrotechnika a informatika 2011. Část třetí. Elektroenergetika.. Plzeň: Západočeská univerzita, 2011. s. 27-30*. ISBN: 978-80-261-0017-1
- [15] VOSTRACKÝ, Z., HALLER, R., KOŽENÝ, J., SEDLÁČEK, J., ROT, D., ŠNAJDR, J., KRUTINA, A., POLÍVKA, J., PÍCLOVÁ, P., VÁCLAV, B. *Možnosti proudového zatěžování vedení vvn/zvn - II.etapa*. Plzeň : ČEPS, a.s., 2011. 27 s.
- [16] LIŠKA, J., POUPA, M., HOLÍK, M., KRAUS, V., KRUTINA, A., KUBÍN, Z., GEORGIEV, V. The blade flutter measurement based on the blade tip timing method. In *Recent Researches in System Science*. Corfu Island: WSEAS Press, 2011. s. 270-275. ISBN: 978-1-61804-023-7 , ISSN: 1792-4235
- [17] KRUTINA, A., JIŘIČKOVÁ, J. ANALÝZA STANDARDŮ PRO KOMUNIKACI PO SILOVÉM VEDENÍ. In *Referáty 15.konference ČK CIRED*. Tábor 2011: CIRED 2011, 2011. s. 1-8. ISBN: 978-80-905014-0-9

- [18] VOSTRACKÝ, Z., HALLER, R., SEDLÁČEK, J., ŠNAJDR, J., KRUTINA, A. *Implementace dynamické zatížitelnosti vedení do podoby DLL*. Plzeň : ČEPS, a.s., 2011. 9 s.
- [19] KRUTINA, A., POLÍVKA, J., PÍCLOVÁ, P., ŠNAJDR, J., VOSTRACKÝ, Z., KADERA, M., VELEK, J. Potenciální proudové zatížení přenosového řetězce. In *Proceedings of the 6th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering 2011*. Košice: Technical University, 2011. s. 92-95. ISBN: 978-80-553-0724-4
- [20] KRUTINA, A., FRANK, L. Emulovaná chytrá síť s PpS na straně spotřeby. In *12 th International Scientific Conference - Electric Power Engineering 2011*. Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, 2011. s. 431-433. ISBN: 978-80-248-2393-5
- [21] KRUTINA, A. ZigBee Smart Energy profil v síti Smart Grid. In *Electric power engineering 2010*. Brno: University of Technology, 2010. s. 71-73. ISBN: 978-80-214-4094-4
- [22] VOSTRACKÝ, Z., HALLER, R., KOŽENÝ, J., ŠNAJDR, J., KRUTINA, A., PÍCLOVÁ, P., ROT, D., SEDLÁČEK, J., POLÍVKA, J., BÖHM, V. *Možnosti proudového zatěžování vedení vvn/zvn - I.etapa*. Plzeň : ČEPS, a.s., 2011. 44 s.
- [23] KRUTINA, A., KRAUS, V. Communication Limits and Isolated-Network Operation. In *Electric Power Engineering and Ecology - Selected Parts II..* Praha : BEN - technická literatura, 2011, s. 8-11. ISBN: 978-80-7300-418-7
- [24] HOLÍK, M., KRUTINA, A., BARTOVSKÝ, J., GEORGIEV, V., KRAUS, V. SPECTRIG – device for triggering and spectroscopy with the pixelated particle detector. In *20th Telecommunications Forum TELFOR 2012*. Bělehrad: IEEE, 2012. s. 959-962. ISBN: 978-1-4673-2984-2