

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Štajner** Jméno: **Dan** Osobní číslo: **456111**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analýza a výběr komunikačních technologií pro Smart grid

Název bakalářské práce anglicky:

Analysis and selection of communication technologies for Smart grid

Pokyny pro vypracování:

1. Pojem Smart grid, význam pro energetiku, výhled do budoucnosti a jeho následná implementace
2. Analýza a výběr komunikačních technologií vhodných pro smart grid s potenciálem širšího nasazení v sítích ČEZ Distribuce, a.s.
3. Technicko-ekonomické vyhodnocení vybraných technologií, návrh jejich začlenění s využitím vstupních dat
4. Závěrečné vyhodnocení a doporučení

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Onřej Tupý, ČEZ Distribuce, a.s. Vyskočilova 1461/2a, 140 00 Praha 4

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **20.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Onřej Tupý
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta elektrotechnická

Analýza a výběr komunikačních technologií pro Smart grid
se zaměřením na distribuční síť

Analysis and selection of communication technologies for
Smart grid in distribution networks

bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

Autor: Dan Štajner

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Tupý

Praha 2018

Prohlášení

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

V Praze dne.....

.....

Dan Štajner

Poděkování

Touto formou bych rád poděkoval zadavateli a vedoucímu práce, panu Ing. Ondřeji Tupému, jehož znalosti přímo z oboru mi byly značným přínosem. Zároveň děkuji panu doc. Ing. Zdeňku Müllerovi, Ph.D. za jeho pomoc s konkretizací směřování práce, panu Ing. Zbyňku Kocurovi, Ph.D. za cenné připomínky v technické oblasti práce a v neposlední řadě panu doc. Ing. Jiřímu Vašíčkovi, CSc., který mi svými četnými radami napomohl v otázce stylistické i obsahové.

Abstrakt

Tato bakalářská práce seznamuje čtenáře s pojmem energetických sítí Smart grid a s koncepty a prvky, které jej utvářejí. Práce si klade za cíl na základě analýzy užšího výběru komunikačních technologií, ve spojení s teoretickým rozbohem architektury sítí, zvolit vhodnou technologii pro zprostředkování last-mile komunikace distributor-spotřebitel především pro potřeby smart meteringu. Výběr je podpořen vstupními daty, poskytnutými zadavatelskou společností ČEZ Distribuce a.s., která zahrnují jak technické požadavky na parametry na přenos, tak výši nákladů spojených s implementací.

Klíčová slova: Smart grid, smart metering, last-mile komunikace, architektura sítí, Internet věcí, optické vlákno, PLC, celulární sítě, ZigBee, NarrowBand-IoT

Abstract

The basis of this thesis is to inform the reader about the term Smart grid and its concepts and elements. This paper aims to provide analysis of closer selection of communication technologies combined with theoretical breakdown of network architectures. Based on the analysis, it pursues to choose suitable technology for last-mile communication between electric utility and consumer, mainly for purposes of smart metering. The selection is supported by input data provided by the submitter, ČEZ Distribuce a.s.. The data include technical requirements on communication channel and expenditures linked to implementation.

Keywords: Smart grid, smart metering, last-mile communication, network architecture, Internet of Things, optical fiber, PLC, cellular networks, ZigBee, NarrowBand-IoT

Obsah

Úvodní slovo	0
1. Smart grid.....	1
1.1. Srovnání dnešní elektrizační soustavy a sítí Smart grid.....	1
1.2. Definice Smart grid	2
1.3. Typické znaky Smart grid [1], [2]:	3
1.4. Technologie ve Smart grid a prostředky pro jeho zefektivnění.....	5
1.4.1. Problematika diagramu denního zatížení a řešení ve Smart grid	5
1.4.2. Obnovitelné zdroje v distribuční síti	5
1.4.3. Microgrid	6
1.4.4. Elektromobily, úložiště elektrické energie.....	6
1.4.5. Energetické řízení (Energy Management)	6
1.4.6. Řízení poptávky (Demand Side Management), reakce na poptávku (Demand Response), způsoby oceňování elektřiny.....	7
1.4.7. Pokročilá infrastruktura měření (Advanced Metering Infrastructure)	8
1.4.7.1. Smart metering	8
1.4.8. Chytrá zařízení (Intelligent Electronic Devices)	9
1.4.9. Další dopady Smart grid.....	9
1.4.10. Shrnutí k aplikacím	10
2. Komunikace.....	11
2.1. Komunikační síť	11
2.2. Komunikace v dnešní energetické síti	11
2.3. Komunikace ve Smart grid.....	11
2.3.1. Stěžejní parametry pro popis komunikačního kanálu [4], [7].....	12
2.3.2. Požadavky na komunikační síť	13
2.3.3. Zpracování, analýza a řízení na základě přijatých informací	14
3. Architektura sítí.....	15
3.1. WAN, NAN, HAN	15
3.1.1. WAN (Wide Area Network)	15
3.1.2. NAN (Neighbourhood Area Network)	15
3.1.3. HAN (Home Area Network).....	15
3.2. Referenční model ISO/OSI [10].....	16
3.3. Model TCP/IP [10]	18
3.4. Internet věcí	19
3.4.1. Internet protocol (IP)	19
3.4.2. Cloud computing	19
3.5. Architektury IoT sítí ve Smart grid.....	20
3.5.1. Základní obecné architektury.....	20

3.5.1.1.	Třívrstvá (three-layered)	20
3.5.1.2.	Čtyřvrstvá (four-layered)	21
3.5.2.	Speciální architektury pro HAN	21
3.5.2.1.	Energy efficient architecture	21
3.5.2.2.	Last-meter SG architecture	22
3.5.2.3.	Web enabled SG architecture	25
3.5.2.4.	Shrnutí k architektuám vhodných pro HAN.....	25
3.6.	DLMS/COSEM, IEC 61850	25
3.6.1.	DLMS/COSEM	26
3.6.2.	IEC 61850	27
4.	Komunikační technologie	30
4.1.	PLC	30
4.1.1.	Kategorizace PLC technologií	30
4.1.2.	Problémy PLC sítí	31
4.1.3.	Příklady nepříznivých jevů	32
4.1.4.	Shrnutí k PLC	32
4.2.	Optické vlákno	32
4.2.1.	Komunikace s využitím optického kabelu	32
4.2.2.	Struktura optického kabelu, podmínky pro přenos	33
4.2.3.	Typy vláken	34
4.2.4.	Uspořádání a používané materiály	35
4.2.5.	Technické parametry vícevidových a jednovidových vláken	35
4.2.6.	Shrnutí k optickým kabelům	36
4.3.	Celulární sítě (Cellular networks)	36
4.3.1.	Používané generace CS	37
4.3.2.	Protokoly pro vícenásobný přístup [17]	38
4.3.3.	FDD, TDD [17]	38
4.3.4.	Problémy-interference, zeslabení signálu	38
4.3.5.	Stávající využití CS, parametry	39
4.4.	Narrowband Internet of things (NB-IoT)	39
4.4.1.	Způsoby řazení frekvenčního pásma	40
4.4.2.	Parametry NB-IoT	40
4.5.	ZigBee (ZB)	41
4.5.1.	Architektura, uspořádání v ZB	41
4.5.2.	ZB bezpečnost, parametry	43
5.	Technicko-ekonomické vyhodnocení vybraných technologií, návrh jejich začlenění s využitím vstupních dat	44
5.1.	Požadavky na komunikační kanál	44

5.1.1.	Požadavky na komunikační kanál podle Ministerstva energetiky Spojených států amerických	44
5.1.1.1.	Smart metering	44
5.1.1.2.	Reakce na poptávku	45
5.1.1.3.	Distribuované zdroje, elektrická úložiště	45
5.1.1.4.	Elektromobilita	46
5.1.2.	Požadavky na komunikační kanál podle ČEZ Distribuce a.s.	46
5.1.3.	Zhodnocení požadavků	48
5.2.	Parametry diskutovaných komunikačních technologií	48
5.2.1.	Dostupnost	48
5.3.	Technicko-ekonomické vyhodnocení technologií	50
5.3.1.	PLC	50
5.3.2.	Optické vlákno	51
5.3.3.	Celulární sítě	51
5.3.4.	Narrow-Band IoT	52
5.3.5.	ZigBee	52
5.3.6.	Předběžný výběr	53
5.3.7.	Ekonomické vyhodnocení	54
5.3.7.1.	Celulární sítě vs. NB-IoT	54
5.3.7.2.	Optické vlákno vs. NB-IoT	55
5.3.7.3.	BPL vs. NB-IoT	56
	Závěrečné zhodnocení	59
	Reference	60
	Tištěná literatura (knihy, skripta)	60
	Internetové zdroje (odborné články)	60

Obrázky

Obr. 1. Konvenční uspořádání elektrizační soustavy

Obr. 2. Návrh uspořádání elektrizační a komunikační sítě ve SG

Obr. 3. Komunikace ve SG

Obr. 4. Typická komunikační architektura sítí

Obr. 5. Struktura modelu ISO/OSI

Obr. 6. Srovnání modelu OSI/ISO a TCP/IP

Obr. 7. Topologie třívrstvé architektury

Obr. 8. Topologie čtyřvrstvé architektury

Obr. 9. Topologie energeticky efektivní architektury

Obr. 10. Topologie Last meter SG architektury

Obr. 11. Topologie Web enabled SG architektury

- Obr. 12. Umístění standardů do modelu ISO/OSI
- Obr. 13. Tříkrokový přístup DLMS/COSEM
- Obr.14. IEC 61850- rozhraní v rozvodně
- Obr. 15. Blokový diagram optické komunikace
- Obr. 16. Šíření paprsku světlovodem
- Obr.17. Srovnání step index, graded index MM vláken a SGM vlákna
- Obr. 18. Způsob rozvržení buněk v CS
- Obr. 19. Použitelná spektra u NB-IoT
- Obr.20. Architektura ZB
- Obr. 21. Topologie sítí pro ZB
- Obr. 22. Schéma pro vysvětlení dostupnosti
- Obr. 23. Navrhované řešení přiřazující technologie k různým částem sítě
- Obr.24. Model vedení optického vlákna od distribučního transformátoru
- Obr.25. Srovnání celkových nákladů pro PLC a CS

Tabulky

- Tab. 1. Srovnání dnešní sítě a SG
- Tab. 2. Rozdělení na třídy dle doby přenosu podle IEC 61850-5
- Tab. 3. Srovnání základních technických parametrů jednovidového a graded-index vícevidového vlákna
- Tab. 4. Nároky na parametry komunikačního kanálu, Ministerstvo energetiky USA
- Tab. 5. Nároky na parametry komunikačního kanálu, ČEZ Distribuce a.s.
- Tab. 6. Shrnutí dosažitelných parametrů komunikačních technologií
- Tab. 7. Srovnání OPEX pro mobilní sítě a NB-IoT
- Tab. 8. Investiční a provozní náklady spojené s instalací optických kabelů
- Tab. 9. Instalované technologie pro SM podle zemí

Použité zkratky

AL	application layer	IOTS	IoT server
AMI	Advanced Metering Infrastructure (pokročilá infrastruktura měření)	IP	Internet Protocol
AMR	Automatic Meter Reading	kbps	kilobity/s
BER	bit rate error (bitová chybovost)	LTE	Long Term Evolution
BPL	broadband PLC	MAC	Media Access Control
bps	bity/s	Mbps	megabity/s
BR	bit rate (přenosová rychlost)	MM	multimode (vícevidový)
BW	bandwidth (šířka pásma)	NAN	Neighbourhood Area Network
CAPEX	investiční náklady	NB-IoT	Narrow-Band IoT
CCIP	Conditional Cochannel Interference Probability	NBPLC	narrow-band PLC
CS	cellular networks (celulární sítě)	NL	network layer
CU	configurator unit	nn	nízké napětí
DER	Demand Response (reakce na poptávku)	OK	optický kabel
DSM	Demand Side Management (řízení poptávky)	OPEX	provozní náklady
DMU	data management unit	PL	perception layer
FFD	full function device	PLC	Power Line Communication
Gbps	gigabity/s	RFD	reduced function device
GSM	Global System for Mobile Communications	SAN	sensor and actuator network
HAN	Home Area Network	SG	Smart grid
IED	Intelligent Electronic Device (chytré zařízení)	SGM	single mode (jednovidový)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	SM	smart metering/smart meter (chytré měření/chytrý elektroměr)
IoT	Internet of Things (internet věcí)	SMDM	Smart Metering Data Management
		SNR	signal to noise ratio (odstup signál-šum)
		UI	user interface (uživatelské rozhraní)
		vn	vysoké napětí
		WAN	Wide Area Network
		ZB	ZigBee

Použité fyzikální jednotky

GHz	gigahertz	MHz	megahertz
h	hodina	ms	milisekunda
kHz	kilohertz	min	minuta
km	kilometr	nm	nanometr
m	metr	s	sekunda
µm	mikrometr		

Úvodní slovo

V oblasti výroby, rozvodu, distribuce a spotřeby elektrické energie dochází v posledních letech k významnému vývoji. Vynořuje se tak nový koncept elektrizační soustavy zvaný Smart grid. Pomocí rozličných technologií a nových přístupů plánuje zavedení efektivnější a spolehlivější sítě. Většina nových implementovaných prvků v energetické síti vyžaduje pro svou správnou funkci obousměrnou digitální komunikaci, a právě na ni se zaměřuje tato práce.

V první řadě seznamuje čtenáře s termínem Smart grid a jeho typickými znaky. Dále shrnuje příklady aplikací, které mají formovat síť Smart grid a zároveň využívají pro svou práci komunikaci. Je zde ve zkratce nastíněn význam samotné komunikace, architektura sítí, využitelné standardy či parametry hodnotící kvalitu přenosu. Práce se poté zabývá dílčími komunikačními technologiemi, u nichž se dá očekávat, že budou vhodné pro budoucí instalaci a provoz.

V rámci praktické části se zaměřuji na technicko-ekonomickou analýzu diskutovaných technologií, jejímž podkladem jsou teoretické znalosti nabyté v předchozí části práce spojené se vstupními daty, které se sestávají z reálných nároků firmy ČEZ Distribuce a.s.. Tyto požadavky pro hlubší pochopení srovnávám s nároky vyplývajícími ze studie provedené Ministerstvem energetiky USA.

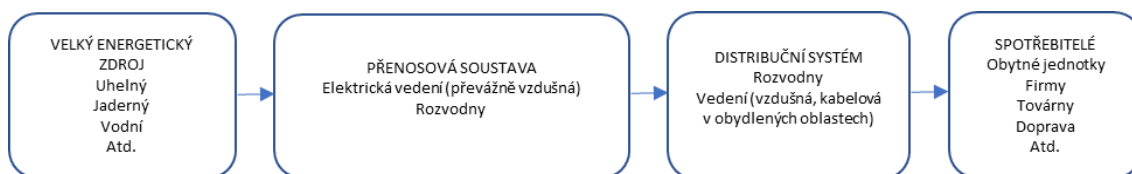
Cílem této práce je, na základě předešlé analýzy, poskytnout doporučení pro výběr vhodné technologie, přičemž se soustředím na last-mile komunikaci v distribuční síti pro potřeby společnosti ČEZ Distribuce a.s..

1. Smart grid

1.1. Srovnání dnešní elektrizační soustavy a sítí Smart grid

Tradiční schéma dříve používané elektrické sítě se skládá v první řadě z velké generátorové jednotky, kterou typicky bývají uhelné elektrárny, jaderné elektrárny, velké vodní zdroje atd. Ty jsou dále napojeny na přenosovou soustavu, která je charakterizována nejvyššími napěťovými hladinami, přenášející elektrickou energii na dlouhé vzdálenosti. Jak elektřina putuje blíže ke konečnému spotřebiteli, napěťová hladina je postupně snižována na trafostanicích. Konečná část systému se nazývá distribuční síť, jejímž účelem je dodat elektrickou energii jednotlivým koncovým subjektům.

Znakem tohoto uspořádání je, že relativně malý počet zdrojů dodává energii velkému množství odběratelů, a že distribuční síť je navržena na jednosměrný tok elektřiny-od centrálního výrobce k uživateli. Elektrizační soustava se však během mnoha desetiletí své existence vyvíjí a dochází k instalaci zdrojů i na nižších napěťových hladinách.



Obr. 1. Konvenční uspořádání elektrizační soustavy¹

Pro lepší správu energetické sítě s nástupem nových technologií vzniká koncept chytrých sítí zvaný Smart grid (SG), jehož úkolem je zavést efektivní a spolehlivou elektrizační soustavu pokrývající nové nároky na ni kladené.

Důvodů pro modernizaci infrastruktury lze nalézt velké množství. Velký důraz je dnes kladen na nízký dopad na životní prostředí, který zahrnuje požadavek na snižování emisí oxidu uhličitého, a s tím související plošný rozvoj obnovitelných zdrojů. Nelze opomenout otázku spolehlivosti a bezpečnosti, komunikace s konzumenty, využití chytrých měřicích přístrojů a mnoho dalšího.

Následující tabulka nabízí srovnání dnešní sítě a sítí SG.

¹ Převzato z: BUDKA, Kenneth C., Jayant G. DESHPANDE a Marina THOTTAN. *Communication networks for smart grids: making smart grid real*. London: Springer, c2014. Computer communications and networks. str. 2, ISBN 978-1-4471-6301-5

Tab. 1. Srovnání dnešní sítě a SG²

Charakteristiky	Dnešní síť	Smart grid
<i>Aktivní účast spotřebitele</i>	Spotřebitelé se nezúčastňují, nejsou informováni	Informování; zahrnutí spotřebitele-reakce na poptávku a distribuční energetické zdroje
<i>Přizpůsobení výrobních jednotek a úložišť el. energie</i>	Dominuje centrální výroba; pro zařazení výrobních zdrojů do distribuční sítě existuje mnoho překážek (technické i právní/obchodní)	Mnoho zdrojů v distribuční síti s technologií plug-and-play ³ ; důraz na obnovitelné zdroje
<i>Nové produkty, služby a trhy</i>	Omezené, špatně integrované velkoobchodní trhy; omezené možnosti pro spotřebitele	Vyspělý, dobře integrovaný velkoobchodní trh; vznik nových trhů s elektřinou speciálně pro spotřebitele
<i>Zajištění kvality el. energie a spolehlivosti dodávky</i>	Zaměřeno na výpadky-dlouhá reakční doba na problémy s kvalitou elektrické dodávky	Rychlé řešení problémů
<i>Optimalizace aktiv elektrizační soustavy</i>	Nízká integrace provozních dat se správou aktiv	Rozšířené získávání parametrů sítě; zaměření na prevenci, snaha minimalizovat dopad na uživatele
<i>Očekávané reakce na systémové poruchy (self-healing) prvků energetické soustavy</i>	Snaha bránit dalšímu poškození prvků	Automatická detekce a reakce na poruchu; soustředění se na prevenci
<i>Odolnost proti kybernetickým útokům a přírodním katastrofám</i>	Citlivá vůči záměrnému poškození i přírodním vlivům; pomalá odezva	Odolnější vůči kybernetickým útokům i přírodním katastrofám; schopnost rychlé obnovy
<i>Výroba el. energie</i>	S ohledem na poptávku	Fluktuace ve výrobě

1.2. Definice Smart grid

Definice pojmu SG není unifikovaná. Pro potřeby práce jsem vybral následující definice:

Evropská komise zavádí následující popis:

„Smart grid je vylepšená elektrická síť, do které byla přidána obousměrná digitální komunikace mezi dodavatelem a spotřebitelem, inteligentní měřicí a monitorovací systémy. Zajišťuje ekonomicky efektivní a udržitelný systém s nízkými ztrátami a vysokou úrovní kvality a bezpečnosti energie⁴.“

Evropská komise dále upřesňuje možnosti SG:

„Sítě Smart grid jsou energetické sítě, které dokáží automaticky monitorovat energetické toky a přizpůsobit se změnám nabídky a poptávky. Ve spojení s chytrými elektroměry, Smart grid

² Převzato z: MOMOH, James A. *Smart grid: fundamentals of design and analysis*. Hoboken: Wiley, c2012. IEEE Press series on power engineering. str 2. ISBN 978-0-470-88939-8

³ Jednoduše řečeno, jedná se o zařízení, jež lze snadno připojit k síti.

⁴ Převzato z: European Commission. *Smart grid Projects of Common Interest* [online]. [cit. 18.11.2017]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/energy/en/smart-grid-projects-common-interest>

poskytuje zákazníkům a dodavatelům informace o aktuální spotřebě. Díky tomu zákazníci mohou přizpůsobit-v čase i množství-svoji spotřebu vzhledem k různým cenám silové elektřiny během dne, a šetřit takto peníze využíváním elektřiny v době nízkých cen.

Smart grid dále napomáhá k začlenění obnovitelných zdrojů energie do soustavy. Zatímco slunce nesvítí na daném území celý den, stejně jako vítr nefouká neustále, kombinace dat ze strany poptávky s předpověďmi počasí umožňuje operátorům lépe plánovat integraci obnovitelných zdrojů a vybalancovat tak stav v síti. Síť Smart grid také otevírají možnost pro spotřebitele vyrábějící vlastní elektrickou energii, zapojit se do cenové politiky a dodávat elektřinu do sítě.⁵

Ministerstvo energetiky Spojených států amerických používá tuto definici:

„Smart grid používá digitální technologie ke zlepšení spolehlivosti, bezpečnosti a efektivity (ekonomické i energetické) elektrického systému od velkovýroby, přes dodávku až ke spotřebitelům a rostoucího počtu distribuční výroby a úložišť elektrické energie⁶.“

1.3. Typické znaky Smart grid [1], [2]:

- Důležitým cílem je zefektivnění celého procesu-výroba, přenos, dodávka.
- Umožňuje operátorům získat podrobnější informace o aktuální dodávce a poptávce a z toho plynoucí schopnost lépe řídit systém a přesouvat poptávku mimo maxima diagramu denního zatížení. Zároveň pomáhá řešit výpadky v síti a předcházet jim pomocí vyšší automatizace a schopnosti sítě se automaticky uvádět do provozu v případě výpadku (viz chytré distribuční trafostanice)⁷. Zautomatizování dále snižuje náklady na údržbu.
- Spotřebitelé jsou zásobováni větším množstvím informací, díky nimž mohou lépe spravovat svou spotřebu. To zahrnuje informovanost o aktuální spotřebě, ceně energie a podle toho používat své spotřebiče, využívání výhod plynoucích z implementace do systému a další.
- Vzdálený přístup umožňuje měnit či aktualizovat firmware a software v zařízeních.
- Slouží ke spravování rostoucího trendu decentralizace výroby-instalace mikro-generátorových jednotek (fotovoltaické panely, malé vodní elektrárny, větrné elektrárny, spalovny biomasy...). Dokáže pracovat s úložišti energie v distribuční

⁵ Převezato z: European Commission. *Smart grids and meters* [online]. [cit. 18.11.2017]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/markets-and-consumers/smart-grids-and-meters>

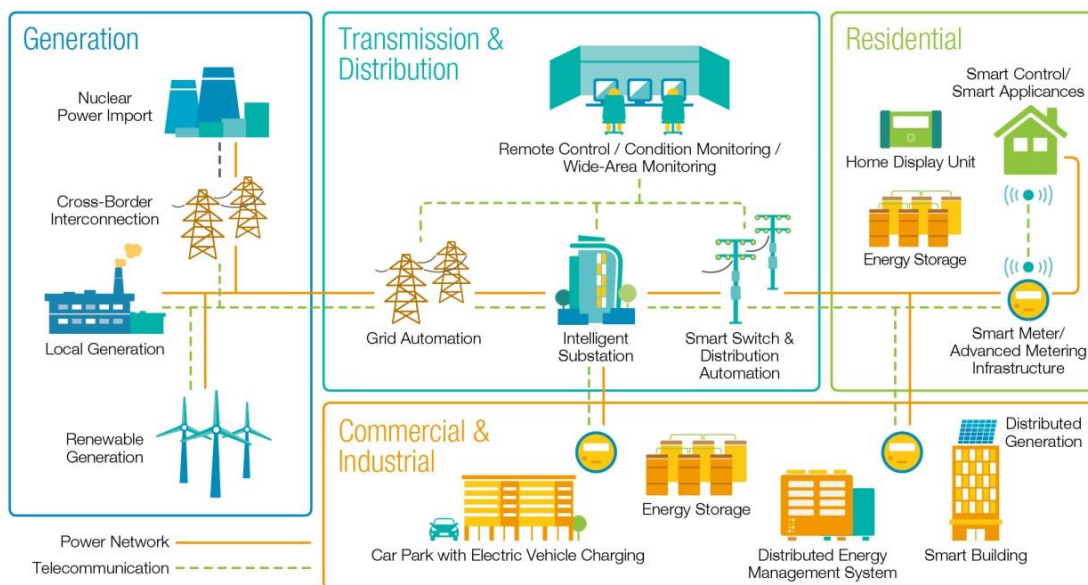
⁶ Převezato z: U.S. Department of Energy. *Smart grid system report* [online]. July 2009. [cit. 18.11.2017]. Dostupné z: https://www.smartgrid.gov/files/systems_report.pdf

⁷ V případě distribučních sítí hovoříme o tzv. distribuční automatizaci (distribution automation).

soustavě (baterie, elektromobily...), tedy dobíjet v době, kdy je elektřiny přebytek, a naopak využít těchto kapacit v době, kdy je elektrické energie nedostatek.

- Zprostředkovává reakci na poptávku (Demand Response(DER)) a řízení poptávky (Demand Side Management(DSM)) s pomocí chytrých elektroměrů (smart metering(SM)) a chytrých zařízení (Intelligent Electronic Devices (IED)).
- Vylepšuje bezpečnost a spolehlivost dodávky tím, že je odolnější vůči poruchám, útokům a přírodním katastrofám⁸.
- Klade si za cíl snižovat dopady na životní prostředí s větším plošným užitím obnovitelných zdrojů. Důvodem pro snahu o snížení dopadů jsou jednak omezené zásoby fosilních paliv, ale také požadavek na nižší emise CO₂, jež nepříznivě ovlivňují světové klima.
- Přínosem, jenž by SG mohl zavést, je vyhlazení křivky diagramu denního zatížení a z toho plynoucí zvýšení efektivity provozu.

Všechny výše uvedené atributy budou bezpodmínečně potřebovat ke své funkci obousměrnou komunikaci splňující požadavky na přenosovou rychlost, dobu odezvy, objem přenášených dat, spolehlivost, nízkou chybovost, bezpečnost a v neposlední řadě na ekonomiku provozu.



Obr. 2. Návrh uspořádání elektrizační a komunikační sítě ve SG⁹

⁸ Zavádí se pojem Wide Area Situational Awareness, pod nímž si lze představit sadu technologií monitorujících velká území, které napomáhají operátorům lépe řídit síť a předcházet problémům.

⁹ Převezato z: <https://www.clp.com.hk/en/about-clp/power-transmission-and-distribution/smart-grid>

1.4. Technologie ve Smart grid a prostředky pro jeho zefektivnění

V následující sekci popíše nové prvky, koncepty a postupy, které mají formovat síť SG a napomáhat ke splnění požadavků na něj kladených.

1.4.1. Problematika diagramu denního zatížení a řešení ve Smart grid

Diagram denního zatížení zobrazuje průběh odběru elektrické energie v závislosti na čase. Minima křivka typicky dosahuje během brzkých ranních hodin, poté prudce stoupá, maxima dosahuje během pozdních odpoledních hodin a následně opět klesá. Odběr elektřiny se však neliší jen během dne, ale také během roku. Oblasti s teplejším klimatem zaznamenávají vyšší odběry v období letních měsíců z důvodu rozsáhlého chodu klimatizací, a naopak v chladnějších pásmech se výraznější spotřeba projevuje v zimě, kdy je nutno více topit. Elektrizovaná soustava je proto všeobecně předimenzovaná a většinu času není její plný potenciál využit. Tradiční velké zdroje (jaderné a uhelné elektrárny, teplárny a průtočné vodní elektrárny) nejsou schopny reagovat na špičkové odběry a běží v základním pásmu zatížení. Pro pokrytí zvýšené spotřeby a výpadků se používají přečerpávací elektrárny, paroplynové elektrárny a další. Jejich provoz je však nákladný a tím pádem se projevuje ve zvýšených nákladech na výrobu elektrické energie v době nadprůměrné spotřeby. Omezení špičkových odběrů a zrovnoměnění křivky diagramu zatížení příznivě přispívá k ekonomičnosti provozu.

1.4.2. Obnovitelné zdroje v distribuční síti

V budoucnu se očekává rostoucí poptávka po elektrické energii [3]. Je proto ve všeobecném zájmu zvyšovat kapacity výrobních zdrojů pomocí distribuční výroby, která má částečně nahrazovat centrální zdroje spalující fosilní paliva v rámci programu na snížení úniku skleníkových plynů do atmosféry. Dalším přínosem může být například výroba v místě spotřeby a následné omezení ztrát přenosem.

Mezi typické zástupce patří fotovoltaické panely, větrné elektrárny, malé vodní elektrárny, spalovny biomasy a další.

Je třeba dále zahrnout v úvahu kvalitu elektrické energie při plošné instalaci distribuované výroby. Výstupní sinusovky těchto zdrojů musí být synchronizovány s mohutnou sítí. Proto je třeba tyto zdroje neustále vzdáleně monitorovat a v případě odlišnosti amplitudy, frekvence či fáze, musí dojít k jejich neprodlenému odpojení od sítě.

Je dobré si uvědomit, že intermitentní zdroje zahrnují celou škálu možných výstupů, a proto je nutné je osazovat výkonovými měniči. Příkladem mohou být solární panely, jež dodávají stejnosměrné napětí, které je nutno ve střídači převést na střídavý průběh odpovídající síti. Jiný problém nastává u větrných elektráren, na jejichž hřídeli sice nalezneme stroje generující

střídavé napětí, jeho parametry se ale mění s rychlostí větru. Musí tedy být opět vhodně upraveny.

1.4.3. Microgrid

S rozvojem distribuovaných zdrojů elektrické energie vzniká alternativa k tradiční infrastruktuře, a tou je *microgrid*. Jedná se o napojení jednoho či více spotřebitelů na společný lokální elektrický zdroj. Toto uskupení čerpá elektřinu jednak konvenčně (ze sítě), jednak z lokálně instalované jednotky. To umožňuje pokrytí nejn nutnějších energetických potřeb v případě poruchy napájení ze sítě a zajišťuje tak jistou dávku autonomie. Nejjednodušším příkladem může být dům se střešní fotovoltaikou. Může se ale jednat například i o napojení více odběratelů na malou vodní elektrárnu atd.

1.4.4. Elektromobily, úložiště elektrické energie

V dnešní době se očekává velký rozmach elektromobility jako cesta ke snížení emisí oxidu uhličitého a jako alternativa k omezeným zásobám ropy. Pro elektrizační soustavu však představuje masivní rozvoj elektromobilů velkou výzvu s pozitivními, ale i negativními efekty. Jelikož elektromobil obsahuje baterii nemalé kapacity, lze jej využít pro krytí odběrových špiček v případě, že je připojen do sítě. Na druhou stranu je nutné vzít v potaz, že nabíječky odebírají velké proudy, na které stávající distribuční soustava není dimenzována a v případě rapidního růstu elektromobility, bude nutná její náhrada za robustnější.

S boomem obnovitelných zdrojů dochází k současné instalaci různých druhů baterií. Ty lze například při využití solárních panelů během dne nabíjet a v noci využívat nastřádanou elektřinu. Stejně jako u elektromobilů lze jejich kapacity poskytnout distributorovi na pokrývání denních špiček za patřičnou cenovou kompenzaci.

1.4.5. Energetické řízení (Energy Management)

Energetické řízení je nedílnou součástí konceptu SG. Motivací a prostředkem pro zefektivnění provozu je otevření trhu s elektřinou pro spotřebitelskou veřejnost. Dnešní spotřebitelé nemají příliš možností, jak se zapojit do trhu s elektřinou. Mohou si vybrat, kdo bude jejich poskytovatelem služby, ovšem často jsou vázáni smlouvou na dobu určitou a předčasné vypovězení je spojeno se sankcemi. Odběratelé tedy nejsou přímými účastníky právě probíhajícího trhu s energií, nehledě na to, že jim je ve smlouvě dána fixní suma za odebranou kilowatthodinu. V dnešní době již existují možnosti tzv. dynamického oceňování (dynamic pricing), které mají motivovat odběratele k tomu, aby využívali energii, když je jí na trhu přebytek.

Rozdělení na vysoký a nízký tarif se dnes používá buď fixní nebo dodavatel dle aktuální potřeby vzdáleně přepíná mezi nízkým a vysokým tarifem, kdy zákazníkovi je signalizováno, v jakém tarifu právě odebírá.

Začlenění výrobních zdrojů do distribuční sítě poskytne spotřebitelům možnost zúčastnit se trhu s elektřinou, tedy pomáhat vyrovnávat energetickou bilanci (dodávat do sítě v době zvýšené poptávky) a prodávat momentálně drahou elektřinu, a naopak nakupovat levně v čase nízkého tarifu. Obdobné obchodní vzorce se již na trhu nacházejí, stěžejní rozdíl ovšem leží právě v možnosti aktivní účasti na trhu a optimálního rozhodnutí se, jak s energií naložit. Zákazníky, kteří jsou zároveň odběrateli, tak výrobci elektrické energie, nazýváme anglickým označením *prosumers*.

Vzhledem k velkému množství účastníků v obchodě s energiemi se zvažuje svěřením správy do rukou tzv. *agregátora* (aggregator), jehož úkolem je zajistit kontakt mezi trhem s energiemi, distribuční společností a spotřebitelem v reálném čase.

1.4.6. Řízení poptávky (Demand Side Management), reakce na poptávku (Demand Response), způsoby oceňování elektřiny

Dalším důležitým termínem, se kterým se můžeme ve spojení se sítí SG setkat, je řízení poptávky. Jedná se o koncept, jehož prostřednictvím má dojít ke zvýšení efektivity a snížení spotřeby ze strany spotřebitele. Jedním z prostředků, jak toho dosáhnout, je pomocí reakce na poptávku (DER). Ta se snaží přesunout část spotřeby z doby maximálního odběru ze soustavy do času nižšího odběru. Jejím účelem tedy není snížit celkovou spotřebu, ale pouze ji zrovnoměnit [3]. Má snahu udržet výrobu i spotřebu v rovnováze, a to mnoha různými formami.

Jedním z klasických příkladů je již zmíněné hýbání s cenou v průběhu dne. Další alternativou je forma odměn a pokut, kdy v případě, že uživatel v době zvýšené poptávky energii do soustavy dodává, je odměněn. To může být řešeno pomocí různých chytrých spínacích zařízení u spotřebičů, chytrých termostatů atd. Příkaz k odpojení zátěže může přijít od operátora, případně jej lze řídit pomocí relé, které reaguje na pokles frekvence či napětí. Myšlenka konceptu je taková, že není nutné prát prádlo, nabíjet elektromobil, či topit v období denních maxim, ale lze tuto spotřebu přesunout na jindy, a to s pozitivním efektem na síť.

Jak uvádí literatura [4] a [5], při využití *stanovení ceny v reálném čase* (real-time pricing) dochází prakticky každou hodinu ke změně ceny silové elektřiny v závislosti na velkoobchodních trzích, přičemž zákazníci jsou o tom informováni typicky několik hodin předem.

Dalším způsobem ocenění je *stanovení ceny podle denní doby* (time of use pricing). Systém spočívá v tom, že ceny jsou předdefinovány dopředu pro různá období v průběhu dne, týdne

i roku na základě empirických znalostí. Energii lze tedy čerpat za vyšší ceny podle obecného vzorce. Příkladem může být dražší elektřina o víkendech, v zimě apod.

Stanovení ceny s ohledem na špičky (critical peak pricing) jde ruku v ruce s DER, kdy distributoři prodávají energii za vyšší ceny v době odběrových špiček. Jedná se o hybrid předchozích dvou typů ocenění. Základem jsou v podstatě tabulkové hodnoty z principu *stanovení ceny v reálném čase*, ale v případě ojedinělé (předem definované) situace dojde k významnému vzrůstu ceny. Zákazník tak stojí před volbou, zda si připlatit v době špiček, nebo napomoci k optimalizaci systému s pozitivním dopadem na jeho účet za elektřinu.

Pozitivním důsledkem přesunu zátěže je nejen to, že zákazníci začlenění do tohoto programu ušetří na účtu za elektřinu, ale i spotřebitelé, kteří se tomuto trendu nepodvolí, ve výsledku zaplatí méně. Přesunutí pouhých 5 % spotřeby z oblasti denních maxim způsobí to, že nebude nutné startovat drahé vyrovnávací zdroje pro pokrytí aktuální poptávky, stejně jako nebude nutné stavět nové [1].

1.4.7. Pokročilá infrastruktura měření (Advanced Metering Infrastructure)

Systémy AMI shromažďují data a poskytují je dodavatelům.

Funkce AMI lze rozdělit do tří základních odvětví [6]:

- Distribuční operace: optimalizuje síť na základě sesbíraných dat, napomáhá k lokalizaci a k rychlejšímu řešení poruch, snižuje ztráty v síti, řeší krizové situace s vazbou na spotřebitele (Emergency Demand Response).
- Tržní uplatnění: slouží ke snížení nákladů spojených s odečtem a údržbou; zvyšuje přesnost účtování; umožňuje využití různých tarifů během dne; zprostředkovává participaci zákazníků na trhu s energiemi.
- Zahrnutí konzumenta: informuje spotřebitele o možnostech snížení spotřeby, zlepšuje tok hotovosti; zprostředkovává DER.

1.4.7.1. Smart metering

Smyslem chytrých měřicích zařízení (smart meters (SM)) je zprvu poskytovat uživateli informace o spotřebě a za druhé zasílat distributorovi údaje o probíhající odběru, s pomocí nichž může lépe kontrolovat situaci v síti. Na základě těchto znalostí lze také stanovit cenu silové elektřiny v závislosti na její aktuální dostupnosti. Zákazník tedy ze SM může vyčíst, kolik momentálně platí za kWh, a ví, jak má správně řídit svou spotřebu. Vše výše uvedené vede ke zvýšení efektivity technické (dobrá informovanost o aktuálním stavu sítě), tak ekonomické (přesnější účtování, možnost odměn za služby sítě, různé tarify atd.) stránce věci [6].

1.4.8. Chytrá zařízení (Intelligent Electronic Devices)

IED se spouští na základě pokynů zaslaných ze strany dodavatele energie. Spotřebitelé si je mohou nainstalovat a tím se zapojit do programu DER a čerpat tak jisté výhody. Okolo 20 % celkové spotřeby elektrické energie totiž využívá skupina tvořená klimatizacemi, myčkami, topením, ohřívači vody, ledničkami, pračkami a sušičkami [6]. Tyto spotřebiče přitom není bezpodmínečně nutné nechat běžet v období maximální poptávky (peak demand periods), lze je tedy pomocí automatizovaných systémů spínat mimo tyto extrémy a vyrovnat tak denní diagram zatížení.

1.4.9. Další dopady Smart grid

Postupným zaváděním čistších, pro životní prostředí méně škodlivých zdrojů, dokážeme snížit emise oxidu uhličitého. Příkladem mohou být Spojené státy americké, kde výroba elektrické energie tvoří asi jednu pětinu světových zdrojů úniku CO₂ do atmosféry a téměř 40 % využívané vody připadne na chlazení tepelných elektráren [1]. Tato voda je buď vrácena ohřátá do původního vodního zdroje, nebo se vypaří. V dnešní době, kdy nedostatek užitkové vody trápí velkou část světové populace, může zavedení novodobých zdrojů elektrické energie v těchto oblastech napomoci k řešení této situace.

S rozsáhlejším využitím elektromobilů také snižujeme závislost na dodávce ropy z jiných zemí, a omezujeme tak následky případných budoucích politických neshod.

Budoucí energetické odvětví bude čelit především následujícím výzvám [1]:

- Růst intermitentních zdrojů energie s nízkou možností kontroly výroby.
- Zvládnutí rostoucího množství nahodilostí způsobených obnovitelnými zdroji.
- Zavedení dostatečně rychlé odezvy na problémy v síti.
- Potřeba zvyšovat přizpůsobivost systémů ochran v rychle se měnícím prostředí způsobeném intermitentními zdroji.
- Nutnost vypořádat se se změnami frekvence a napětí v síti, které nebude možno řešit tradičními metodami.¹⁰
- Potřeba efektivně a spolehlivě řídit síť vzhledem k větší volatilitě výroby a zpřístupnění trhu koncovým uživatelům.

¹⁰ Pokud je v síti nedostatek činného výkonu, dochází k poklesu napětí a frekvence; činný výkon lze u tepelných elektráren řídit momentem na hřídeli synchronního generátoru-tedy množstvím přicházející páry na turbínu; pokles frekvence se tím pádem napraví uvolněním většího množství páry na lopatky turbíny a naopak; synchronní stroj je také jediným strojem, který dokáže dodávat jalový výkon do sítě, jalový výkon se řídí buzením [21]

1.4.10. Shrnutí k aplikacím

Ve SG se můžeme setkat se dvěma typy toku informací; zaprvé mezi SM, sensory a IED a za druhé mezi SM a operátorským centrem (pozn. podrobněji v sekci Architektura sítí).

V této práci se zabývám výběrem vhodné komunikační technologie pro zprostředkování komunikace distributor-spotřebitel, a tak je vhodné si shrnout aplikace, pro které chceme danou komunikační technologii navrhnout. Jedná se zejména o:

- Obnovitelné zdroje v distribuční síti (monitoring aktuálně vyráběného výkonu)
- Elektromobily (nabíjení, poskytnutí kapacit baterií distributorovi)
- Úložiště elektrické energie (informace o dostupných kapacitách)
- Pokročilá infrastruktura měření (zahrnuje SM jak za účelem fakturace, tak pro monitoring aktuální spotřeby)
- Řízení poptávky (DSM), reakce na poptávku (DER) (přesunutí spotřeby z oblasti maxim křivky diagramu denního zatížení pomocí cenové motivace či IED)

2. Komunikace

Předchozí kapitola shrnula aplikace a koncepty, které často vyžadují pro svou funkci nějaký druh komunikace. Proto se budu v následující sekci zabývat významem komunikace pro energetiku, shrnu parametry popisující komunikační kanál, uvedu příklady architektur sítí a další.

2.1. Komunikační síť

Komunikační síť rozumíme systém, který slouží k přenosu informací z jednoho konce (endpoint) připojeného do této sítě k druhému koncovému bodu [4]. Komunikace může probíhat jednosměrně (simplex), obousměrně (duplex), případně jednosměrně, ale směr toku informací se může měnit (half-duplex).

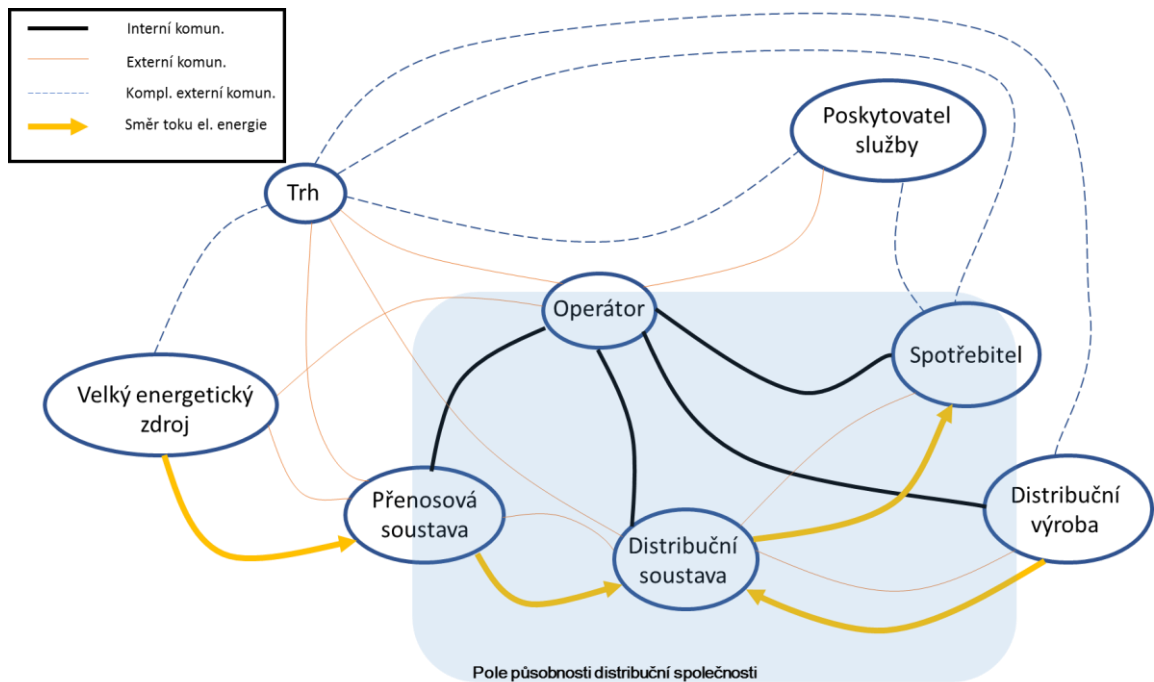
2.2. Komunikace v dnešní energetické síti

Dnešní síť je monitorována a kontrolována pomocí aplikací SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), které dispečerům podávají informace o napětí, proudu, výkonu apod. Dochází ke vzdálené detekci poruch a následně je daná část obvodu odstřižena od napájení [4]. V dnešní elektrizační soustavě úroveň vzdáleného monitoringu klesá s napěťovou hladinou. S příchodem IED jsou jimi nahrazovány zastaralé přístroje a stejně tak digitální komunikace nahrazuje analogovou.

2.3. Komunikace ve Smart grid

V distribuční soustavě je síť řízena z kontrolního centra, které sbírá informace od zařízení spadajících pod jeho správu a kontrolní centrum zpětně zasílá informace k zařízením. Jedná se tedy o obousměrnou komunikaci. Spoje mezi centrem a zařízením rozlišujeme podle směru toku dat na uplink (zařízení -> kontrolní centrum) a downlink (kontrolní centrum -> zařízení).

V následujícím obrázku lze vidět, jak probíhá komunikace mezi jednotlivými prvky SG se zaměřením na distribuci. Z pohledu distribuční společnosti lze komunikaci rozdělit na tři základní druhy: interní (probíhá pouze v rámci společnosti), externí (část komunikace přesahuje hranice správy společnosti) a kompletně externí (komunikace, jež probíhá úplně mimo dosah distribuční společnosti).



Obr. 3. Komunikace ve SG¹¹

Primárním cílem při návrhu technologií pro komunikaci je zavést systém vhodný pro všechny druhy aplikací ve SG, a to jak pro zavedené, tak pro ty, které jsou teprve ve fázi návrhu. Koncept individuálního návrhu sítí pro každou technologii zvlášť je neekonomický a současně zesložňuje celou soustavu.

2.3.1. Stěžejní parametry pro popis komunikačního kanálu [4], [7]

- *Přenosová rychlost (Bit Rate(BR))*: v digitálním světě logický signál nabývá dvou stavů, 0 a 1. Tento stav lze nazvat jeden bit. Počet bitů za sekundu nazýváme přenosová rychlost. Jelikož se jedná o malou jednotku, typicky se používají jednotky kilobitů za sekundu (kbps), megabitů za sekundu (Mbps) či gigabitů za sekundu (Gbps).
- *Šířka pásma (Bandwidth(BW))*: BW je definován jako rozdíl mezi horní a dolní frekvenční hranicí, kterou je daný kanál schopen přenášet. Úzce souvisí s BR, tedy čím větší BW, tím vyšší BR. S nástupem nových algoritmů a technologií se snažíme v omezeném BW získat co největší BR. To lze popsat pomocí spektrální hustoty (spectral density) uváděnou v bps na jeden Hertz šířky pásma.
- *Útlum (Attenuation)*: žádný přenos není beze ztrátový a velmi závisí na prostředí. Signál tak postupně snižuje svoji amplitudu. Instalují se proto zařízení, která signál udržují na potřebné hladině. Pro analogový přenos se využívají zesilovače (amplifiers), pro digitální opakovače (repeaters).

¹¹ Převzato z: BUDKA, Kenneth C., Jayant G. DESHPANDE a Marina THOTTAN. *Communication networks for smart grids: making smart grid real*. London: Springer, c2014. Computer communications and networks. str. 13, ISBN 978-1-4471-6301-5

- *Šum (Noise)*: šum nám může způsobit, že napěťová hladina příslušející logické 1 se změní na 0 a obráceně. Úroveň šumu je běžně popsána pomocí odstupe signál/šum (Signal to noise ratio). Jedná se o bezrozměrné poměrné číslo a uvádí se v decibelech (dB). Jeho definice je následující:

$$SNR = 10 * \log_{10} \frac{\text{užitečný signál}}{\text{šum}} \quad (1)$$

Jelikož je na poměr aplikován logaritmus, je důležité si uvědomit, že se vztah nechová lineárně. Pokud je například SNR= 30 [dB], pak užitečný signál je 1000 x silnější než šum.

- *Bitová chybovost (Bit Rate Error)*: pojmem BER rozumíme pravděpodobnost, že logická 0 bude zaměněna za 1 a obráceně. Úzce souvisí se SNR.
- *Latence (Latency/Delay)*: definujeme ji jako dobu, po kterou signál putuje ze zdroje do cílové destinace. Prostředky užívané pro zkvalitnění signálu, jako jsou např. repeatery, zatěžují přenos zpožděními.
- *Dostupnost (Availability)*: rozumíme tím čas (typicky vyjádřený v procentech), po který je služba k dispozici a funkční. Jedná se o statistický údaj, který lze vztáhnout na libovolný časový úsek. Pokud je například dostupnost 99 %, pak v časovém rozpětí 100 hodin bude jednu hodinu ve výpadku.

2.3.2. Požadavky na komunikační síť

- Síť musí mít dostatečné parametry, aby vyhověla aplikacím, ke kterým má být využívána. To zahrnuje například nároky na zpoždění během přenosu, kdy každá aplikace má jiné požadavky.
- Komunikační síť je vhodné stavět na zavedených a široce rozšířených standardech. Tímto krokem snáze dosáhneme tržní soutěže mezi více dodavateli, čímž pozitivně ovlivníme výslednou cenu produktu a v případě dalšího rozvoje či vzniklých potíží, snadněji najdeme vhodného kandidáta na provedení úkonu. Důležité je též využívat takové technologie, které dokáží pracovat s co nejmenší modifikací stávajících aktiv.
- Dlouhodobým cílem provozu elektrické sítě je udržení vysoké kvality a spolehlivosti dodávky. Vznikající komunikační síť nám pomocí monitorování soustavy v reálném čase poskytuje skvělý nástroj k dosažení tohoto požadavku.
- Ruku v ruce se spolehlivostí dodávky jde i bezpečnost sítě. Přerušení dodávky v důsledku kybernetických útoků vede k velkému množství neblahých ekonomických následků. Na elektrické energii totiž závisí provoz celé společnosti, a tak je třeba k danému problému i přistupovat. Nezbytnými prvky zajišťujícími bezpečnost jsou například různé způsoby

ověření, kontrol přístupu, firewally, detekce vniknutí, izolace výměny dat mezi uzavřenými skupinami atd.

- S nezastavitelným vývojem v technické oblasti je třeba síť navrhovat tak, aby její budoucí rozšiřování a zavádění nových aplikací bylo možno provádět bez větších změn ve stávajícím systému.
- V neposlední řadě je důležitá ochrana osobních údajů o spotřebitelích, neboť například z diagramu denního zařízení dané domácnosti lze snadno vyčíst, kdy její obyvatelé jezdí do práce a nabízí nebezpečný prostředek pro zloděje apod.

Četné studie ukázaly, že poskytnutí informace zákazníkům o aktuální spotřebě dokáže snížit spotřebu o 5-15 %. Když k tomu připočteme efekt cenových podnětů, zautomatizované domácí systémy řídící spotřebu jako jsou IED, chytré termostaty apod., lze tyto úspory až zdvojnásobit [1].

2.3.3. Zpracování, analýza a řízení na základě přijatých informací

Služby, které spravují výstupy z dílčích informačních zdrojů, lze rozdělit na dvě základní kategorie, jež každá obsahuje dvě dílčí subzóny [9]:

Kontrola a řízení (KŘ)

- Kontrola (Control) - vydává instrukce k řízení rozličných zařízení (např. spínání/rozpínání vypínače)
- Řízení (Operation) – je vztaženo k výrobě (např. vyvažování zátěže generátorů)

Správa a data (SD)

- Správa (Management) – přenos informací k údržbě sítě (např. kamerový dohled)
- Data (Data) – sběr dat (např. SM)

Výše uvedené divize jsou seřazeny dle priority v systému; kontrola má tedy nejvyšší prioritu, data naopak nejnižší. Dále lze popsat markantní rozdíl v požadavcích na komunikaci u obou kategorií. *Kontrola a řízení* vyžaduje malé zpoždění při přenosu, vysokou spolehlivost, ovšem na druhou stranu nedochází k přenosu velkého množství dat. Na opačné straně stojí *Správa a data*, které si nevynucují vysokou spolehlivost, množství přenesené informace je však řádově vyšší. *Kontrola a řízení* si může pro svůj provoz vyžádat data ze *Správy a dat*; opačný směr toku informací však není povolen.

3. Architektura sítí

V následující části se zaměřím na architektury, které popisují prvky v sítích, jejich funkci a hierarchii z mnoha různých pohledů. Nejdříve se budu zabývat rozdělením, jež dělí komunikační síť geograficky na WAN, NAN a HAN. Následně jsou ve stručnosti nastíněny referenční modely ISO/OSI a TCP/IP, které nabízejí univerzální kostru, jak stavět síť a z jakých částí se síť funkčně skládají. Pro pozdější potřeby práce je vysvětlen pojem Internetu věcí, jenž nalezne široké uplatnění právě ve SG. V rámci lepšího proniknutí do problému, se podrobněji zabývám architekturami sítí HAN, kde jsou zařazeny prvky, na jejichž komunikaci se v této práci soustředím. Jelikož nelze implementovat komunikační technologii bez příslušné znalosti, jakým způsobem má komunikace probíhat a jak bude síť stavěna, tak ve zkratce objasním obsahy standardů IEC 61850 a DLMS/COSEM.

3.1. WAN, NAN, HAN

3.1.1. WAN (Wide Area Network)

Jedná se o hierarchicky nejvýše postavenou sekci topologie sítí. Pokrývá rozsáhlé geografické území, jež může zahrnovat i celé státy. Slučuje pod sebe dílčí síť lokálního charakteru, tvoří páteř pro komunikaci mezi NAN, kontrolními centry, trafostanicemi, elektrárnami atd. Nejznámějším příkladem WAN je Internet. Možných použitelných komunikačních technologií pro WAN existuje celá řada od optického vlákna, přes PLC po bezdrátové systémy.

3.1.2. NAN (Neighbourhood Area Network)

Jestliže síť WAN mohou co do velikosti obsáhnout velkoměsta či státy, pod NAN spadá zhruba jedna distribuční stanice a jednotky jí obhospodařované. Tento systém je nadřazený HANu a jeho primárním cílem je přenášet informace sesbírané od koncových uživatelů do datového koncentrátoru, který tvoří rozhraní mezi NAN a WAN a opačně-zasílat data od poskytovatele ke konzumentovi.

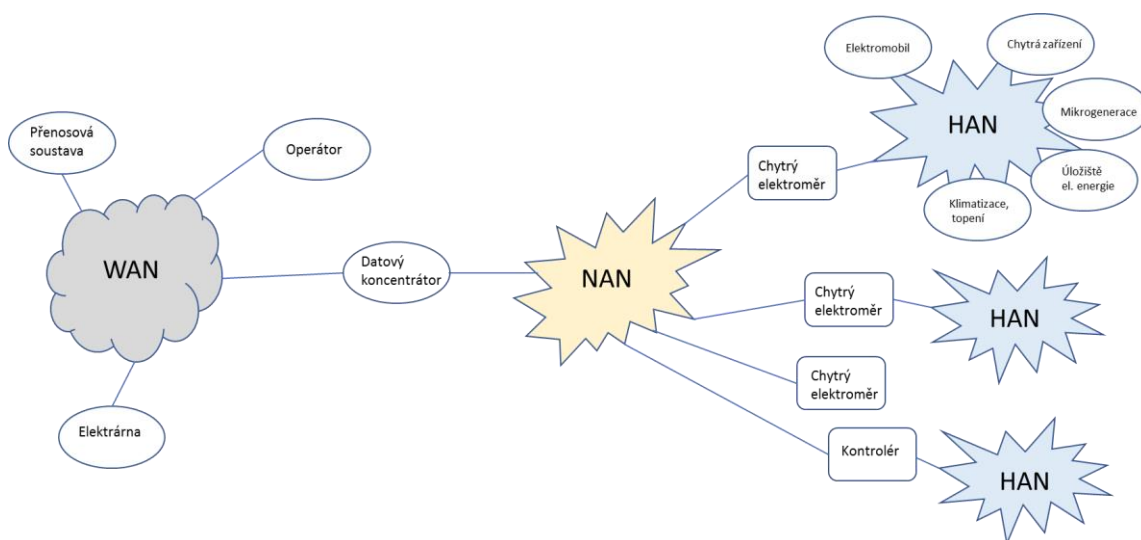
3.1.3. HAN (Home Area Network)

Může mít topologii ve tvaru hvězdy, případně mříže. Jedná se o systém v konečném místě spotřeby, tedy v domácnostech, firmách, továrnách atd., který integruje dílčí zařízení do jedné společné sítě. Zahrnuje mikrogeneraci, SM, monitoring, IED, topení, klimatizaci, plug-in elektromobily, baterie a další. Tato zařízení spolu mohou komunikovat drátovou¹² (např. PLC)

¹² Pro potřeby této práce jsem se rozhodl používat termín „drátová technologie“ s odkazem na anglický termín *wired*, kterým shrnuji množinu technologií využívajících jako médium přenosu látku v pevném skupenství (sdělovací metalické kabely, silnoproudé vodiče, optické vlákno...). V praxi používané termíny jako kabelový, terestriální, metalický nejsou schopny tak dobře obsáhnout danou kategorii.

i bezdrátovou (např. ZigBee) technologií a HAN musí zajistit jejich vzájemnou interoperabilitu¹³. Očekává se, že rozhraním mezi spotřebitelem a dodavatelem bude chytrý elektroměr. Je však možné použít i separátní kontrolér, jenž bude navazovat HAN na NAN.

V jednom směru jsou sbírána data o aktuální spotřebě či informace z instalovaných zařízení a zasílána do NAN, kde jsou dále předána k centrálnímu zpracování. Ve směru opačném domácí brána (home gateway), což může být chytrý elektroměr nebo kontrolér, přijímá informace o momentální ceně silové elektřiny (dynamic pricing information) z NAN, a tím spouští požadované akce.



Obr. 4. Typická komunikační architektura sítí¹⁴

3.2. Referenční model ISO/OSI [10]

OSI (Open System Interconnection) je model vyvinutý uskupením ISO (International Organization for Standardization), jehož účelem bylo vytvořit jeden univerzální standard pro komunikaci v počítačových sítích. Měl vyřešit dřívější problém s nekompatibilitou prvků od různých výrobců. Nedefinuje prvky samotné, pouze nastiňuje množinu funkcí, které má daná vrstva obsluhovat. ISO tak vytvořilo strukturu, která se skládá ze sedmi vrstev. Ty jde rozdělit do dvou podmnožin po třech vrstvách, kdy horní tři vrstvy poskytují podporu dané aplikaci, dolní tři obsluhují přenos dat v síti. Mezi tyto dvě podskupiny je vložena tzv. transportní vrstva. Platí, že vrstva využívá služeb vrstvy těsně pod ní a následně po provedení své funkce poskytne výsledek

¹³ Tímto termínem označujeme schopnost dvou a více systémů si vyměňovat data a následně je zpracovat a využívat. Jedná se o důležitý předpoklad při rozvoji SM a maloobchodu s elektřinou [25].

¹⁴ Převzato z: EKANAYAKE, J. B. *Smart grid: technology and applications*. Chichester: Wiley, 2012. str.96. ISBN 978-0-470-97409-4.

vrstvě bezprostředně nad ní. Nyní si probereme jednotlivé vrstvy podrobněji postupně od nejvyšší k nejnižší.

Aplikační vrstva: jedná se o nejvyšší vrstvu, která tvoří rozhraní k samotnému programu. Skrývá komplexitu spodních vrstev před komunikující aplikací, která má část standardizovanou (z důvodu dorozumění s ostatními aplikacemi) a vlastní nezávislou část vysunutou mimo rámec modelu OSI.

Prezentační vrstva: je to nejnižší vrstva, která se zajímá o význam přenášené informace. Jejím úkolem je zachovat obsahovou správnost této informace, vyjednává společnou syntaxi pro přenos dat mezi dvěma programy a zajišťuje, že jeden systém se nemusí starat o to, jakou formu reprezentaci dat druhý systém používá. Probíhá tu komprese a šifrování dat.

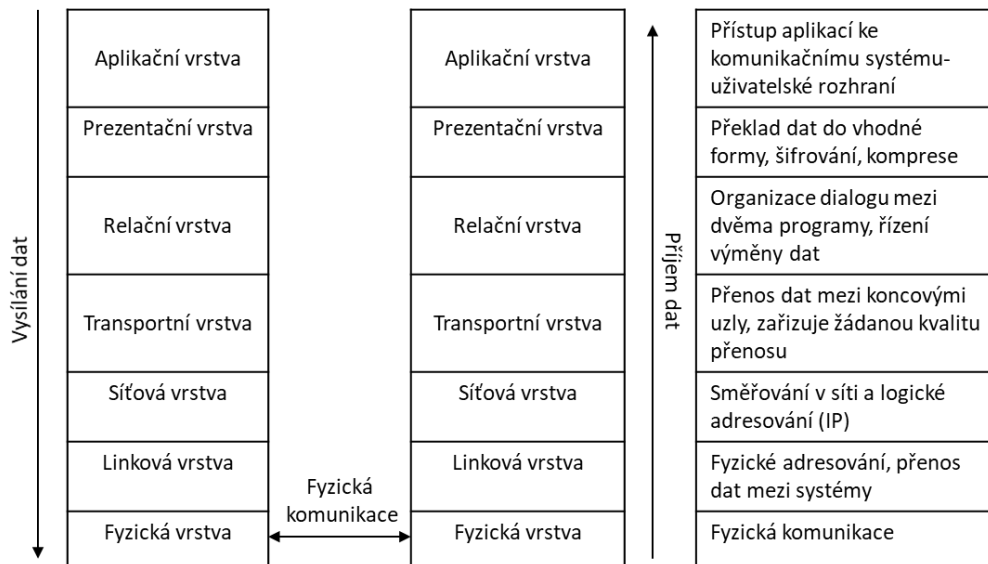
Relační vrstva: slouží k navázání, udržení a přerušování relace mezi koncovými body. K tomu vyžaduje transportní vrstvu pro vytvoření spojení. To může probíhat jako simplex, half-duplex nebo duplex, a to zajišťuje právě relační vrstva.

Transportní vrstva: obstarává vlastní přenos dat rozdělený na pakety a zajišťuje, aby došlo k úplnému a úspěšnému přenosu informace k příjemci. To zahrnuje i opakování zprávy v případě výskytu chyby.

Síťová vrstva: zajišťuje vhodné směrování dat z jednoho systému do druhého skrz síť. Mezi koncovými uživateli totiž nemusí existovat přímé spojení a úkolem této vrstvy je tedy najít vhodnou cestu pro přenos dat.

Linková vrstva: je zodpovědná za přenos dat přes jedinou linku z jednoho systému do druhého. Kontrolní mechanismy se vypořádávají s přenosem datových jednotek (rámců) přes fyzický obvod a chrání proti chybám při přenosu.

Fyzická vrstva: zodpovídá za skutečný fyzický přenos informace, který typicky probíhá formou sekvence 0 a 1. Vrstva nepřirazuje žádný obsahový význam přenášeným datům.



Obr. 5. Struktura modelu ISO/OSI

3.3. Model TCP/IP [10]

Stejně jako u OSI je TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) typem síťové architektury, která navrhuje, jak by počítačová síť měla vypadat, dělí ji na vrstvy a vrstvám přiděluje žádané funkce. Stěžejním rozdílem oproti modelu OSI je, že na rozdíl od OSI, kde převážnou část programových funkcí (např. spolehlivost přenosu) obstarává komunikační podsít (až do síťové vrstvy včetně), model TCP/IP se snaží strukturu zjednodušit, a naopak funkce přenechat připojeným zařízením. Komunikační podsít v důsledku toho může využít své kapacity pro rychlejší datové přenosy. TCP/IP využívá nespojovaný charakter přenosu, zatímco OSI spojovaný¹⁵. Model OSI je rozdělen do sedmi vrstev, zatímco TCP/IP jen do vrstev čtyř.

Aplikační vrstva: jedná se o nejvyšší vrstvu, která slučuje tři horní vrstvy OSI do jedné. Představuje samotnou aplikaci, která si musí zajistit funkce poskytované nahrazenými vrstvami sama.

Transportní vrstva: bývá realizována kupříkladu pomocí TCP, nebo méně často UDP (User Datagram Protocol). Jejím úkolem je provádět přenosovou službu, jejímiž uživateli jsou dvě samotné aplikace.

Síťová vrstva: zde se využívá protokol IP. Funkce odpovídají síťové vrstvě OSI, tedy směřováním paketů skrz síť od odesílatele k příjemci.

¹⁵ Spojovaný charakter přenosu si lze představit jako telefonní hovor, který se skládá ze vzniku spojení (vytočení čísla), přenosu dat (hovor) a ukončení přenosu (zavěšení). Zahrnuje tedy vždy pár komunikujících prvků. Pokud je vyžadováno předání informace více uživatelům, musí zdroj navázat spojení s každým zvlášť a přenést zprávu v samostatné operaci. Naopak nespojovaný charakter přenosu je podobný poštovní službě. Během procesu dojde k přijetí zprávy protokolem a k pokusu zprávu, vybavenou identifikací konečné destinace, doručit zamýšlenému adresátovi. Pro přenos menšího množství dat bývá tato varianta praktičtější a rychlejší, jelikož není nutné nejdříve ustanovit přenos. Nicméně není zaručeno, že data budou doručena v pořadí, v jakém byla odeslána. Zároveň se jedná o méně spolehlivou službu.

3.5. Architektury IoT sítí ve Smart grid¹⁶

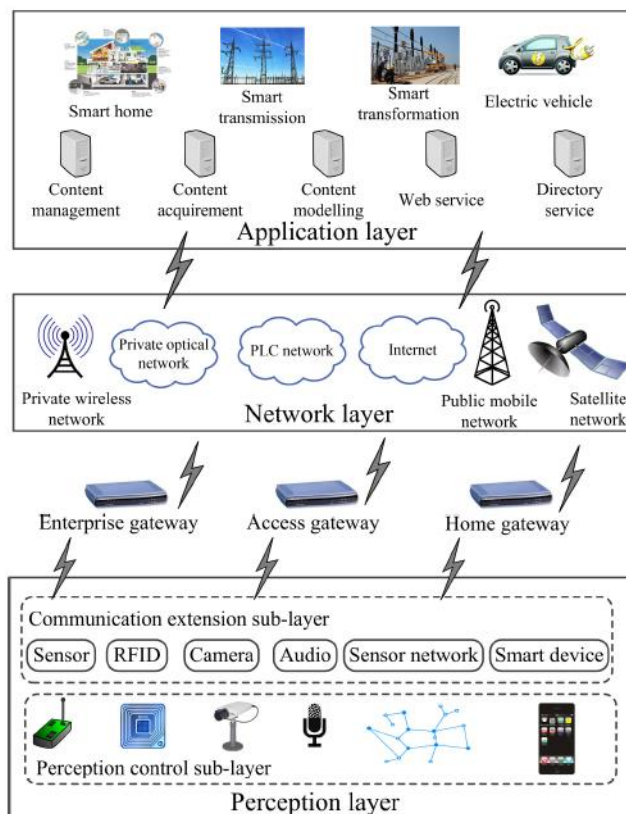
V této sekci práce se zaměřím na možné architektury použitelné pro IoT. Pro základní seznámení si uvedeme třívrstvou a čtyřvrstvou architekturu, které ovšem svojí obecností nepokrývají specifické požadavky pro HAN¹⁷. Proto pro lepší představu uvádím tři speciální příklady, které nabízejí lepší správu IoT zařízení.

3.5.1. Základní obecné architektury

3.5.1.1. Třívrstvá (three-layered)

Skládá se ze tří vrstev-perception layer(PL), network layer(NL) a application layer(AL).

- PL: jejím účelem je sbírat potřebné informace pomocí rozličných zařízení (měřicí přístroje, kamery apod.).
- NL: má za úkol přenášet informace sesbírané v PL do AL prostřednictvím relevantní komunikační sítě.
- AL: zde probíhá zpracování přijatých dat a transformace do formátu čitelných pro zařízení/uživatele. Provádí se monitoring, poskytování služeb a řešení problémů v reálném čase.



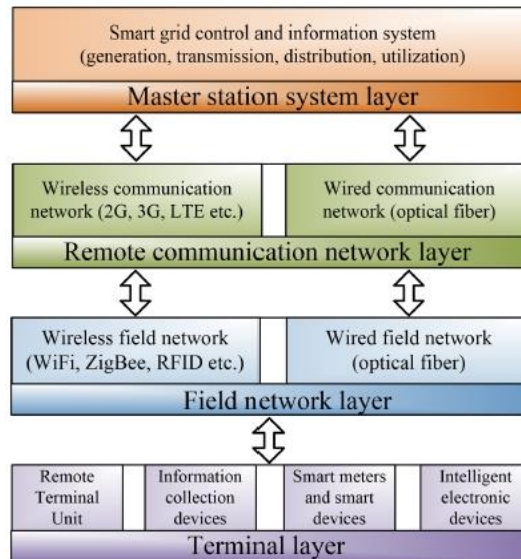
Obr. 7. Topologie třívrstvé architektury

¹⁶ Převzato z (včetně schémat): SALEEM, Yasir, CRESPI, Noel, REHMANI, Mubashir Husain, COPELAND, Rebecca. Internet of Things-aided Smart Grid: Technologies, Architectures, Applications, Prototypes, and Future Research Directions [online]. str. 10-15. Dostupné z: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1704/1704.08977.pdf>

¹⁷ V tuto chvíli nelze najít studie zabývající se podrobněji architekturami sítí NAN a WAN pro implementaci IoT do SG [53].

3.5.1.2. Čtyřvrstvá (four-layered)

Je složena z vrstev-terminal layer, field network layer, remote communication network layer a master station system layer. Systém je ekvivalentní k předešlému s tím rozdílem, že PL je rozdělena na dvě oddělené vrstvy (terminal layer a field network layer).

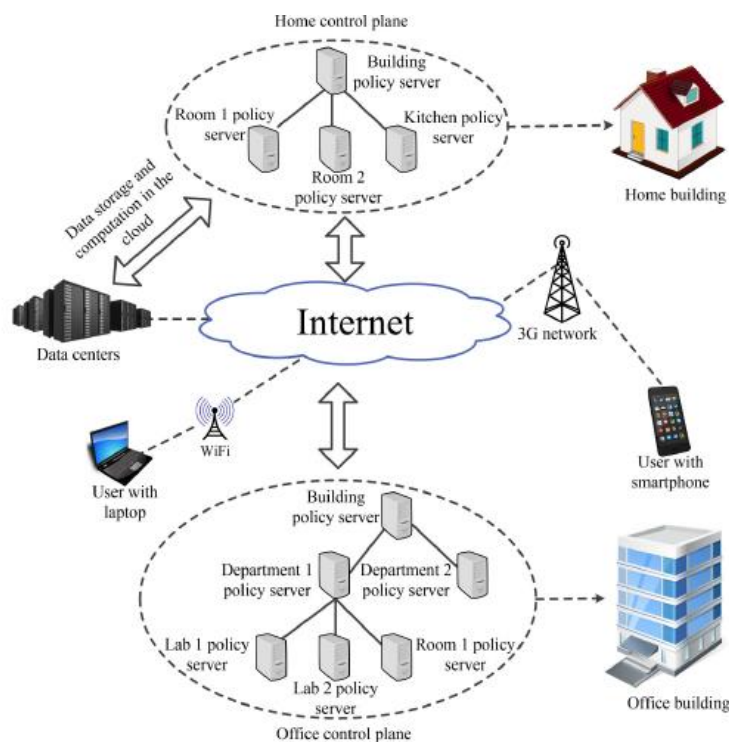


Obr. 8. Topologie čtyřvrstvé architektury

3.5.2. Speciální architektury pro HAN

3.5.2.1. Energy efficient architecture

Myšlenka je taková, že vlastník ubytovací jednotky je schopen pomocí smartphonu, který je připojen k internetu (WiFi, 3G, LTE...), vzdáleně monitorovat a řídit svoji domácí spotřebu. Přičemž systém může být automatizovaný a s využitím GPS např. vypnout topení, když se subjekt oddálí od domu na definovanou vzdálenost. Tento rámec je řízen z cloud computing platformy, jež poskytuje nutný výpočetní výkon a paměť.



Obr. 9. Topologie energeticky efektivní architektury

3.5.2.2. Last-meter SG architecture

Tato architektura zahrnuje část sítě přilehlou ke konzumentům. Skládá se ze tří hlavních částí: senzorové a aktuátorové¹⁸ sítě (sensor and actuator network(SAN)), IoT serveru (IOTS) a uživatelského rozhraní (user inteface(UI)).

1) SAN

- a) Senzorové a aktuátorové uzly: jsou nastavovány a využívány IOTS pomocí obousměrné komunikace. V tomto uspořádání lze libovolně přidávat a odebírat jednotlivé komponenty v reálném čase bez jakýchkoliv změn a připojená komponenta je ihned dostupná. Nutností je, aby každý uzel měl unikátní adresu pro zajištění přístupu odkudkoliv.
- b) IP brána (IP gateway): spojuje senzorové a aktuátorové uzly s IOTS. Při downlinku předává pokyny od IOTS k požadovaným uzlům. Pro uplink brána sbírá data z uzlů, zformátuje je a zašle IOTS.

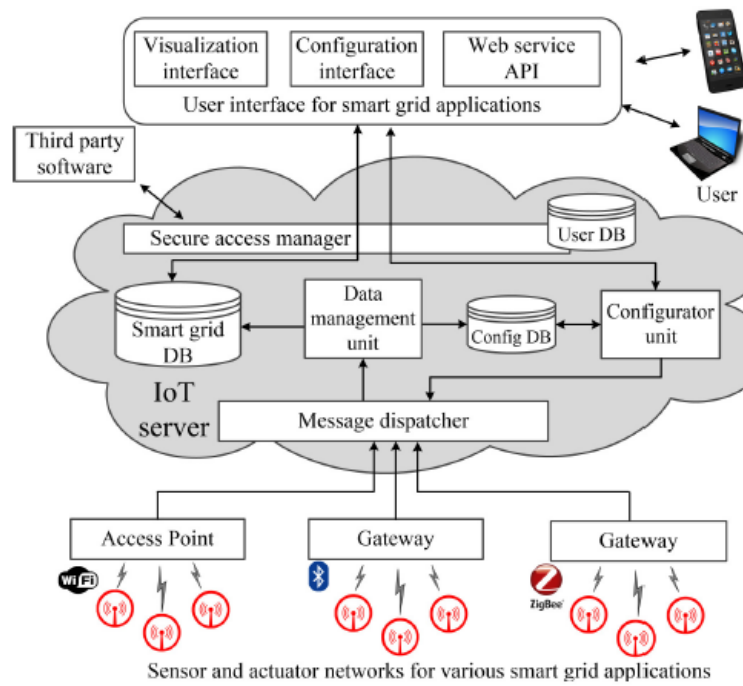
2) IOTS

- a) Message dispatcher: zprostředkovává komunikaci mezi každou bránou, přijímá informace o připojení nových uzlů. Při downlinku kóduje zprávu přijatou od konfigurační jednotky (configurator unit(CU)) a předá ji k cílové bráně. U uplinku

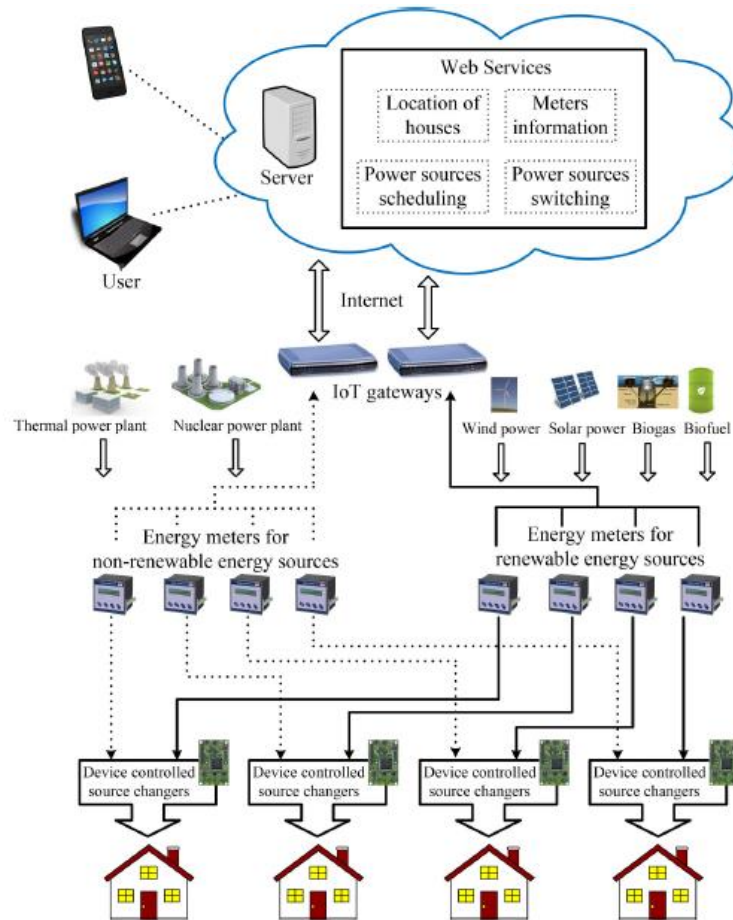
¹⁸ Aktuátorem rozumíme akční člen, tedy prvek určený k využití zpracované informace.

- naopak dekóduje příchozí pakety a poskytuje je pro interpretaci datové řídicí jednotce (data management unit(DMU)).
- b) Datová řídicí jednotka a úložiště databáze (data management unit and database storage): DMU je soubor softwarových modulů, kdy každý modul zpracovává zprávy z konkrétní SAN. V závislosti na obsahu zprávy se ukládají buď v unikátním formátu v SG databázi, pokud obsahují naměřené hodnoty od čidel nebo sdělení od aktuátorového uzlu; nebo v případě, že se jedná o zprávy o síti, jsou uloženy v konfiguračnické databázi v původním formátu.
 - c) Konfiguračnická jednotka a databáze (configurator unit and database): CU je soubor softwarových modulů, kde každý modul je přiřazen k dané SAN. V závislosti na vstupech od uživatelů nastavuje dané uzly.
 - d) Správce bezpečného přístupu a uživatelská databáze (secure access manager and user database): zajišťuje bezpečnou komunikaci mezi IOTS a uživatelem.
- 3) UI: umožňuje uživatelům či aplikacím interagovat s IOTS. Míra interakce závisí na oprávněních, kdy tradiční uživatel si může jen zobrazit svou spotřebu, zatímco administrátoři jsou schopni konfigurovat zařízení. Uživatelské rozhraní má tři stěžejní části:
- a) Rozhraní vizualizace (visualization interface): zobrazuje údaje o spotřebě.
 - b) Konfigurační rozhraní (configuration interface): pomocí něj lze vzdáleně nastavovat a řídit síť. Zároveň nabízí možnost nastavení viditelnosti svého zařízení uživatelem, administrátorům dovoluje konfigurovat nově připojené brány.
 - c) Webová služba API¹⁹ (web service API): zpřístupňuje IOTS aplikacím a poskytovatelům služby, a tím pádem zajišťuje přístup k nastřádaným informacím.

¹⁹ API (Application programming interface) je název rozhraní pro programování aplikací.



Obr. 10. Topologie Last meter SG architektury



Obr. 11. Topologie Web enabled SG architektury

3.5.2.3. Web enabled SG architecture

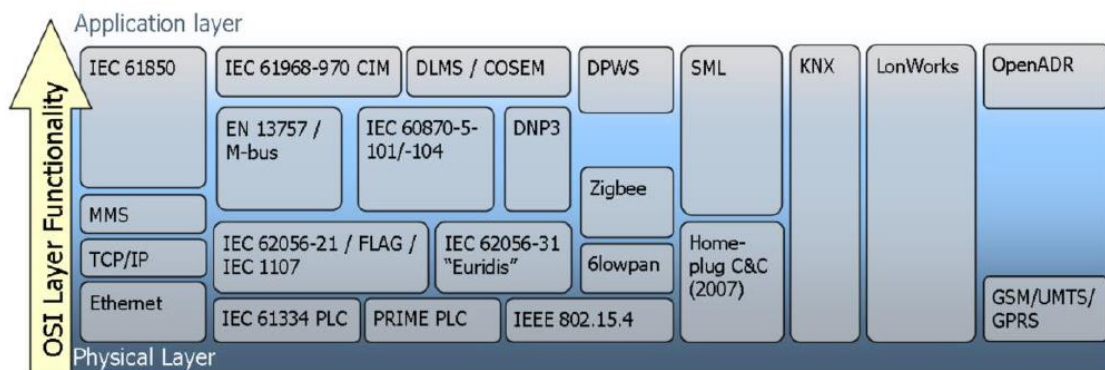
Je založena na web of things, což je systém webových služeb spravujících IoT zařízení, kde webový prohlížeč funguje jako rozhraní. V tomto typu architektury je energetický zdroj připojen k měřicímu přístroji, jejichž údaje jsou sbírány IoT bránami, přičemž jsou dále periodicky nahrávány na server. Ten poskytuje webové služby jako lokalizaci zařízení, naměřené hodnoty a další. Vzdálené řízení IoT zařízení je opět prováděno formou webové služby. Uživatelé jsou tak zpřístupněny dané služby přes internet.

3.5.2.4. Shrnutí k architektuře vhodných pro HAN

- Energy efficient: jejím účelem je optimalizovat spotřebu v domácnosti pomocí vzdáleného přístupu a automatizace.
- Last meter SG: klade si za cíl především zautomatizovat pochody v HAN.
- Web enabled SG: zajišťuje připojení HAN k internetu a pomocí služeb řídit IoT zařízení.

3.6. DLMS/COSEM, IEC 61850

V předešlém textu jsme se seznámili se základní architekturou sítí a nyní se blíže podíváme na protokoly a standardy, podle kterých by šla zamýšlená síť vybudovat. Pro požadavky SG musí splňovat otevřenost a rozšiřitelnost. Další důležité kritérium je, jaké vrstvy standard pokrývá v modelu ISO/OSI; např. zabývá se převážně hardwarem (IEC 61334-5, IEC 52056-21), nebo se jedná o datový model (DLMS/COSEM), nebo zahrnuje oboje (KNX, LonWorks)? V neposlední řadě si klademe otázku, jaké funkce by měl standard obhospodařovat. Použitelné standardy pro naše účely shrnuje následující obrázek.



Obr. 12. Umístění standardů do modelu ISO/OSI²⁰

V následujícím textu se budu zabývat standardy DLMS/COSEM a IEC 61850.

²⁰ Převzato z: DE CRAEMER, Klaas, DECONINCK, Geert. Analysis of state-of-the-art smart metering communication standards [online]. Leuven University. Dostupné z: <https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/265822/1/Smar>

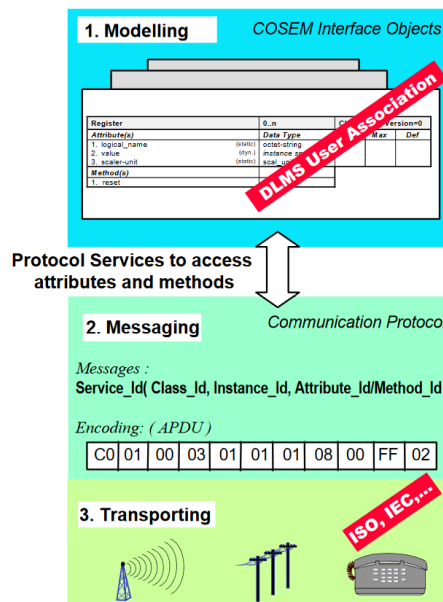
3.6.1. DLMS/COSEM

DLMS (Device Language Message Specification)/COSEM(Companion Specification for Energy Metering) tvoří standardizovaný model pro komunikaci SM, jehož hlavním cílem je interoperabilita mezi měřicím vybavením. Vychází ze standardu IEC 62056. Protokol DLMS je určen pro výměnu dat mezi zařízeními a v OSI modelu odpovídá relační a transportní vrstvě. Objektový model COSEM spadá pod prezentační vrstvu, stanovuje pravidla pro výměnu dat mezi SM a slouží k formátování přenášených informací.

Model nabízí pohled na funkcionalitu SM tak, jak je dostupný na svých rozhraních a používá obecné bloky pro namodelování dané funkcionality. Nezabývá se tedy interními, dle druhu implementace lišícími, problémy. Dovoluje výrobci přidávat nové třídy rozhraní beze změny stávajících služeb, a tím zachovávat interoperabilitu. Tyto třídy definují běžně využívané funkce jako je registrace, aktivace tarifů, řešení výpadků či měření parametrů elektrické energie. Zároveň poskytuje zabezpečený přístup k informacím pro různé strany, které operují na volném trhu a vyžadují daná data pro svou práci.

DLMS/COSEM využívá tři kroky při své práci:

1. Modelování: pokrývá model rozhraní příslušného SM a řídí identifikaci dat.
2. Odesílání zpráv: obsahuje služby pro mapování modelu rozhraní do protokolových datových jednotek (protocol data units (APDU)) a zároveň je kóduje.
3. Transport: zahrnuje přenos zpráv skrz komunikační kanál.



Obr. 13. Tříkrokový přístup DLMS/COSEM²¹

²¹ Převzato z: DLMS User Association. DLMS/COSEM Architecture and Procols [online]. February 2007, s. 7. Dostupné z: http://dlms.com/documents/archive/Excerpt_GB6.pdf

Tím, že je DLMS/COSEM nezávislý na komunikačním médiu, může být provozován přes TCP, UDP (User Datagram Protocol), HDLC (High-Level Data Link Control), GPRS, NBPLC a další, beze změny modelu.

3.6.2. IEC 61850

Komunikační standard IEC 61850 byl navržen jako univerzální postup pro vytvoření systému zahrnující ochranu, komunikaci a kontrolu uvnitř trafostanic. Kromě definic komunikačních protokolů, obsahuje i standard pro řízení a správu rozvoden. Protokol lze však použít i pro potřeby SM, čímž se budu blíže zabývat.

Výhodou, kterou přináší, je možnost vytváření flexibilních systémů splňující nové požadavky, jež jsou kladeny na dnešní energetické sítě. IEC 61850 se skládá z mnoha dokumentů, přičemž důležitá je pro nás např. část IEC 61850-5, *Požadavky na komunikaci pro funkce a modely zařízení*. Na základě těchto požadavků je definováno datové modelování v následujících dokumentech (IEC 61850-7-x), ze kterých jmenovitě můžeme uvést pro nás zajímavé IEC 61850-7-420, *Základní komunikační infrastruktura-Logické uzly pro decentralizované zdroje elektrické energie* (definice informačních modelů pro výměnu dat v sítích s obnovitelnými zdroji a úložišti elektrické energie, standard použitelný i pro elektromobilitu).

Podstatou protokolu je návrh systému, kde spolu mohou koexistovat a komunikovat IED vyráběná různými firmami. To nám umožňuje značné zjednodušení a zlevnění implementace a následné údržby. Soubor norem IEC 61850 vychází z Ethernetu, a tak lze využívat už existující osvědčené nástroje.

Kompletní řešení na bázi IEC 61850 dnes nabízí mnoho firem včetně Siemens nebo ABB.

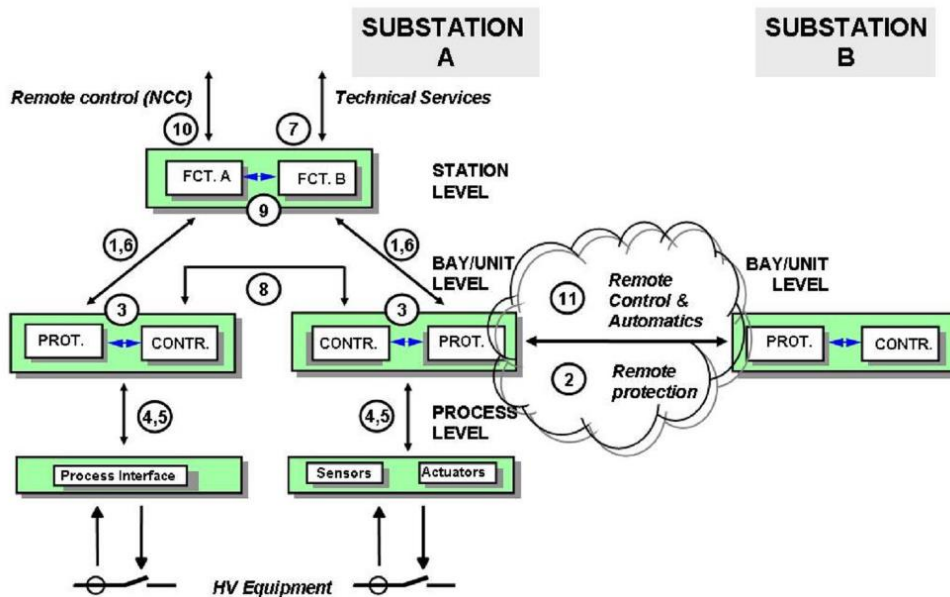
Podle druhu přenášených dat IEC 61850 definuje komunikační protokoly, mezi něž patří:

- GOOSE (Generic Object Oriented Substation Events): slouží k přenosu kritických dat, vyžadujících co nejrychlejší odezvu. Na rozdíl od MMS je přímo mapován do Ethernetu.
- SMV (Sampled Measured Values): obhospodařuje přenos naměřených hodnot proudu či napětí.
- MMS (Manufacturing Message Specification): podporuje přenos procesních a kontrolních dat pro účely monitoringu mezi zařízeními a systémy jako jsou počítače.

Pro potřeby SM se mi právě tento protokol jeví jako nejvhodnější. Definuje následující:

- Soubor objektů, které se musí vyskytovat v každém zařízení a které provádějí operace jako čtení, zápis, signalizace...
- Soubor standardizovaných zpráv vyměňovaných mezi klientem a serverem pro účely monitoringu a řízení.
- Soubor kódovacích pravidel pro mapování těchto zpráv do bitů a bytů.

Abych mohl blíže specifikovat nároky pro potřeby SM, je třeba určit, jaké logické rozhraní, definované v IEC 61850, se nejvíce hodí. Definováno je 11 různých rozhraní, které zachycuje následující obrázek.



Obr.14. IEC 61850- rozhraní v rozvodně²²

Pro zamýšlenou aplikaci (SM) vyhovuje č.10 (vzdálená kontrola a výměna dat mezi zařízeními a vzdáleným kontrolním centrem).

Po určení vhodného rozhraní je třeba si ujasnit, jaké nároky klade SM na dobu přenosu dat. IEC 61850 definuje 7 druhů zpráv, kde každý typ specifikuje potřebnou dobu přenosu. Bez vlastního výčtu typů lze konstatovat, že pro logické rozhraní č.10 není třeba zvlášť krátkého času přenosu (jako je tomu např. u vybavování ochran). Výčet použitelných typů je následující:

- Low speed messages: obsluhuje pomalejší automatické řízení, čtení a přepisování nastavených hodnot, prezentace systémových dat...
- File transfer functions: slouží k přenosu velkých balíčků dat z míst poruch, pro informační účely, nastavení IED...
- Command messages and file transfer with access control: zajišťuje přenos příkazů ze vzdálených i přilehlých zdrojů; vychází z Low speed messages ale s vyšší mírou zabezpečení.

IEC 61850-5 používá rozdělení na třídy, které je zachyceno v následující tabulce.

²² Převzato z: IEC 61850-5: Communication networks and systems for power utility automation-Part5: Communication requirements for functions and device models

Tab. 2. Rozdělení na třídy dle doby přenosu podle IEC 61850-5²³

Transfer time class	Transfer time (ms)	Typically refers to . . .
TT0	>1000	Files, events, log contents
TT1	1000	Events, alarms
TT2	500	Operator commands
TT3	100	Slow automatic interactions
TT4	20	Fast automatic interactions
TT5	10	Releases, Status changes
TT6	3	Trips, Blockings
Transfer rate class	Transfer rate (kb/s)	
TR0	<1	
TR1	1	
TR2	10	
TR3	100	
TR4	1000	
TR5	10,000	
TR6	100,000	

Lze konstatovat, že výše uvedené typy zpráv spadají do třídy TT0, TT1 a TT2, z nichž vyplývají i doby přenosu. Ruku v ruce s dobou přenosu jde i datový tok (BR), který je rovněž zachycen ve zmíněné tabulce. V pozdější části práce proběhne seznámení s nároky na parametry komunikačního kanálu pro koncepty jako je SM, kde jasněji vyplyne, jaký BR je požadován. Ve stručnosti jsem vysvětlil obsah protokolu IEC 61850, který podle dané aplikace vyžaduje kvantitativní a kvalitativní parametry kanálu. Podle toho následně vybíráme v úrovni fyzické vrstvy příslušnou komunikační technologii, a právě těmito technologiemi se zabývá další část.

²³ Převzato z: RINALDI, Stefano, FERRARI, Paolo, LODA, Matteo. Synchronizing low-cost probes for IEC61850 Transfer time estimation [online]. University of Brescia, Italy, September 2016. Dostupné z: https://www.unibs.it/sites/default/files/ricerca/allegati/IEEE_ISPCS_2016_Rinaldi.pdf

4. Komunikační technologie

Následující kapitola představuje komunikační technologie, o nichž si myslím, že by mohly být využity pro zprostředkování komunikace spotřebitel-distributor. Z drátových řešení jsem k bližšímu prozkoumání vybral optické vlákno a PLC. U technologií využívajících bezdrátovou komunikaci se zaměřím na celulární síť. Nelze ovšem opomenout IoT komunikační technologie, z nichž si podrobněji vysvětlíme principy ZigBee a NarrowBand-IoT. Jedná se o IoT technologie, se kterými už korporace reálně pracují a sází na jejich implementaci.

Mezi další IoT technologie, u nichž se počítá s širší instalací, patří např. SigFox či LoRAWAN. Těm se tu však blíže věnovat nebudu, jelikož nejsou na požadované aplikace konstruovány. Jmenovitě SigFox využívá velice nízký BR, stejně tak LoRAWAN není navržena pro naši věc, neboť její hlavní zbraní je výdrž baterie díky málo frekventovanému zasílání dat. Tím se aplikace ve SG zřetelně odlišuje od jiných míst využití IoT, kde zařízení nemá zdroj elektřiny, a tak si musí mnoho let vystačit s kapacitou baterie.

Potenciální využití by mohlo najít xDSL (Digital Subscriber Line). Zde ale vyvstává problém s plošnou instalací u spotřebitelů, kdy buď by si zákazník pro potřeby energetické společnosti musel nechat zavést xDSL domů a platit měsíční tarif, nebo by to zajišťovala společnost sama, s tím by ale byly spojeny vysoké náklady.

Obdobně využití Wi-Fi sítí by vyžadovalo enormní pokrytí s úměrně vysokými náklady na instalaci a provoz, které by si musela hradit energetická společnost.

4.1. PLC

Technologie PLC (Power Line Communication) využívá vodičů elektrického vedení jako média pro přenos digitálního signálu mezi připojenými zařízeními. Dřívější omezené aplikace pro přenos malého množství dat-např. hlasu dnes již jsou překonány a lze takto přenášet velké datové toky. Nespornou výhodou, kterou PLC přináší, je možnost využití tradiční elektrické sítě, která je plošně instalována ve většině urbanizovaných území. Lze tedy používat jak venkovní či kabelová silnoproudá vedení v oblasti přenosu a distribuce, tak v domovních instalacích, kde odpadá nutnost zavádění nových systémů [9]. Jedná se o technologii, která byla poprvé využita pro vzdálené odečty elektroměrů.

4.1.1. Kategorizace PLC technologií

PLC technologie [9] rozděluje na tři kategorie:

- a) *Ultra-úzké pásmo (ultra narrow band)*: tato varianta běží na pásmech 30-300 Hz a 0,3-3 kHz. Jejich výhodou je velmi daleký rozsah (150 km a více), nevýhodou nízký BR (kolem

100 bps). Technologie Turtle či TWACS využívající ultra-úzké pásmo se používají pro vzdálené odečty elektroměrů.

- b) *Úzké pásmo (narrow band(NBPLC))*: tyto PLC technologie operují na frekvencích 3-500 kHz, jež zahrnují jak technologie pracující s jednou (single-carrier), tak s více nosnými vlnami (multicarrier); dosah je sice nižší než u ultra-úzkého pásma (do 3 km), BR však dosahuje řádů několika kbps u single-carrier technologií a až 500 kbps u varianty s více nosnými. V dnešní době nejrozšířenější úzkopásmové PLC technologie jsou PRIME (Power Line-Related Intelligent Metering Evolution) a G3.
- c) *Široké pásmo (broadband(BPL))*: zde se pohybujeme v řádově vyšším frekvenčním pásmu (1,8-250 MHz), dosah proto činí často méně než 100 metrů; nicméně lze takto dosáhnout vysokých přenosových rychlostí-od několika Mbps až po stovky Mbps; z důvodu krátkého rozsahu jsou širokopásmové technologie instalovány převážně pro domácí sítě, kde slouží k přístupu na internet.

V dnešní době rozšířené PLC technologie jsou založeny převážně na modulaci FSK (frequency shift keying) a Spread-FSK, která se využívá v Evropě u úzkopásmových PLC zařízení [12]. Co se latence týče, roste s velikostí paketů a množstvím připojených zařízení. BPL dosahuje latence desítek až nízkých stovek ms, NBPLC stovek ms až nízkých jednotek sekund.

4.1.2. Problémy PLC sítí

PLC kanál je ovlivněn obrovským množstvím vnějších vlivů způsobujících šum, a tím pádem je obtížné jej matematicky modelovat. Z tohoto hlediska přívětivější se jeví přenosová soustava charakterizovaná nízkým útlumem a disperzí. Nicméně v našem případě, tedy v distribučních sítích, nastává zcela jiná situace, kde hodnoty útlumu a disperze je třeba brát více v potaz, přičemž jejich vliv narůstá zejména při vyšších frekvencích.

Zatímco na přenosové napěťové hladině můžeme za zdroje šumu v pozadí považovat svod, výkonové měniče, transformátory či například úder blesku, v distribuční soustavě je velké množství zařízení zdrojem nelinearity způsobené polovodičovými prvky jako jsou diody, tyristory, tranzistory apod. Každé připojené elektrické zařízení je dalším zdrojem šumu, nehledě na to, že šum způsobuje i samotné elektrické vedení. Návrh PLC modemu, který by byl schopen operovat se všemi druhy šumu, se tak jeví jako jeden z nejpálčivějších problémů.

Transformátor představuje galvanické oddělení jednotlivých částí sítě, a proto je nutné pro přenos signálu využít nějaký druh přemostění (např. s využitím vhodné bezdrátové technologie).

4.1.3. Příklady nepříznivých jevů

Frequency selective fading: během šíření signálu od vysílače k přijímači dochází k tomu, že vlna se nešíří jednocestně, ale různě se odráží od prvků v obvodu. Takto vzniklé vlny se spolu kombinují ve stejné i opačné fázi a vzniká tak nežádoucí interference.

Rozdílnost topologií rozvodů: dalším problémem, který vyvstává u návrhu PLC sítí, je, že každá část elektrické sítě má svou unikátní topologii. U rodinného domu tak musíme počítat s jinými hodnotami útlumu a mírou interference mezi sousedními PLC sítěmi, než třeba u bytového domu [13].

Dolní propust (low-pass behaviour): PLC kanál se chová jako dolní propust (filtr nepropouštějící vyšší frekvence). Jedná se o následek dielektrických ztrát v izolaci mezi vodiči, přičemž se projevuje hlavně u kabelových vedení. To může u vysokých BR způsobit zpoždění, které když je větší než doba trvání symbolu a dva po sobě jdoucí bity jsou přenášeny blízko u sebe, přijímač může nesprávně vyhodnotit danou informaci [14].

Pokud chceme dosáhnout vysokých přenosových rychlostí, je vyžadována četná instalace repeaterů.

4.1.4. Shrnutí k PLC

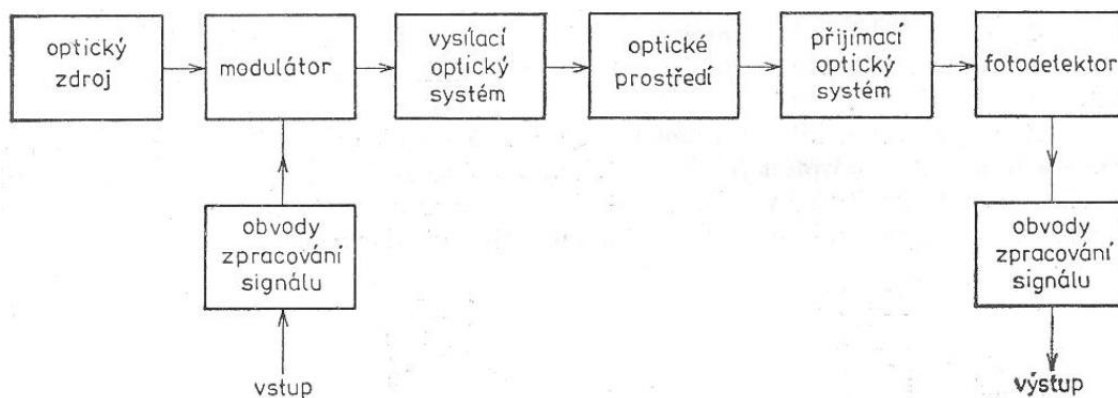
Mezi hlavní výhody PLC patří využití stávajících rozvodů a s tím související celostátní pokrytí, následné rychlé rozšíření v případě rozhodnutí o realizaci či robustní šifrování. Co se týče ceny, jedná se o jediné drátové řešení (zahrnujeme sem třeba optické kabely), které je nákladově srovnatelné s bezdrátovými technologiemi. Také absolutní kontrola nad fyzickým médiem (silovými rozvody) přináší výhodu, kdy energetici nejsou závislí na třetích stranách jako jsou telekomunikační společnosti. K nevýhodám patří hlavně problém s elektromagnetickou kompatibilitou.

4.2. Optické vlákno

4.2.1. Komunikace s využitím optického kabelu

Optické kabely (OK) jsou používány pro přenos v rozvodnách a pro přenosy dat na dlouhou vzdálenost, kde se často zapouzdřují do jádra zemnicích lan na stožárech (optical ground wires).

Informace, které mají být přeneseny, jsou namodulovány na optickou nosnou a předány do vysílače. Data pak putují daným prostředím (v našem případě optickým vláknem) až do přijímače, kde probíhá sběr a zpracování.



Obr. 15. Blokový diagram optické komunikace²⁴

Princip přenosu informace optickým vláknem si lze představit tak, že zdroj světla (LED dioda, polovodičový laser) nabývá dvou stavů: svítí/nesvítí, kde přítomnost či absence světla reprezentuje logickou nulu či jedničku.

4.2.2. Struktura optického kabelu, podmínky pro přenos

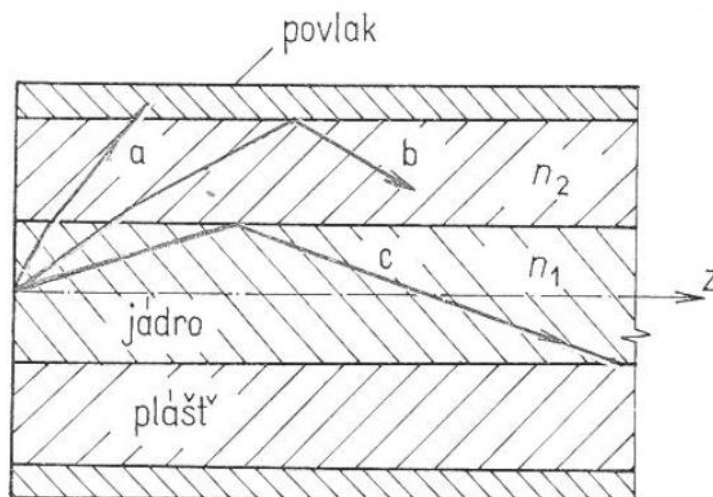
OK se skládá ze tří základních částí: jádra (core) s indexem lomu n_1 , pláště (cladding) s indexem lomu n_2 (kde $n_1 > n_2$) a ochranného obalu (coating). Kabel obsahuje i další struktury, jako například tahové členy, které zabraňují deformaci vlákna. Světloved totiž musí být dobře chráněn před vnějšími, zejména mechanickými vlivy.

Světlo se šíří odrazy jádrem, přičemž k odrazům od pláště dochází díky odlišnému indexu lomu obou materiálů. Při dopadu paprsku na rozhraní jádro-plášť musí být úhel Ψ měřený od kolmice k ose jádra větší než kritický úhel pro úplný vnitřní odraz. Platí tedy, že:

$$\Psi > \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

Druhou podmínkou pro šíření jádrem je, aby se odražené paprsky sčítaly ve fázi a vzájemně se nerušily.

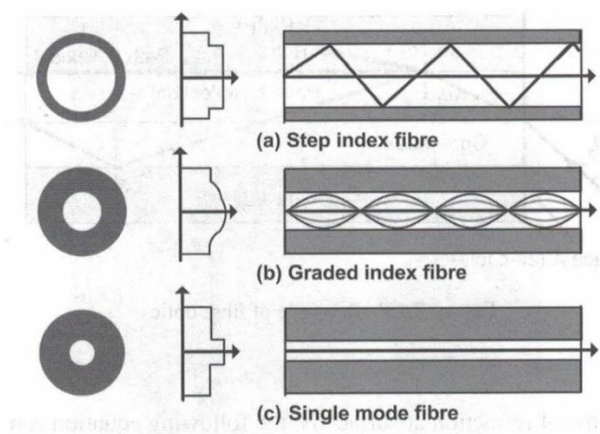
²⁴ Převzato z: MACH, Petr. Přednáška Optické vláknové vlnovody. str.4. Dostupné z [pouze po přihlášení]: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/34519/mod_resource/content/1/Vlaknove_opticke_vlnovody.pdf



Obr. 16. Šíření paprsku světlovodem²⁵

4.2.3. Typy vláken

Lze se setkat jak s jednovidovými (single mode (SGM)), tak s vícevidovými (multimode(MM)) vlákny. MM systémy vycházejí z myšlenky, že je možno simultánně přenášet více paprsků naráz. Jejich znakem je výrazně větší průměr vlákna a existují ve dvou provedeních: step-index a graded-index. Prvně jmenovaný je příliš pomalý pro většinu použití z důvodu disperze způsobené různou uraženou vzdáleností dílčích paprsků. Naopak graded-index využívá jiný systém, který zajišťuje mnohasetkrát větší BW než step-index vlákno.



Obr.17. Srovnání step index, graded index MM vláken a SGM vlákna²⁶

²⁵ Převzato z: MACH, Petr. Přednáška Optické vláknové vlnovody. str.5. Dostupné z [pouze po přihlášení]: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/34519/mod_resource/content/1/Vlaknove_opticke_vlnovovl.pdf

²⁶ Převzato z: EKANAYAKE, J. B. *Smart grid: technology and applications*. Chichester: Wiley, 2012. str.32 ISBN 978-0-470-97409-4

4.2.4. Uspořádání a používané materiály

Pro výrobu světlovodů se využívá vícero materiálů, na něž jsou kladeny vysoké nároky. Obsažené nečistoty, zejména ionty kovů, významně snižují průchodnost informace. Nej kvalitnější optické vlnovody se vyrábějí ze syntetického křemene, používají se však i různá skla, plasty atd.

Uspořádání v kabelu existuje nepřeborné množství. Lze se tedy setkat s kabely obsahující jen jeden vláknový vlnovod, obvykle však uvnitř nalezneme větší počet vláken.

4.2.5. Technické parametry vícevidových a jednovidových vláken

Optické vlákno poskytuje větší BW a nižší útlum než jiné komunikační kabely. Pro lepší představu o nízkém útlumu optických vláken si uvedeme následující příklad: v případě využití měděných komunikačních vodičů je třeba repeatery instalovat cca každých 10 km, u optiky signál urazí 100 km bez signifikantnějšího útlumu [4].

Vlnová délka paprsku vyzářeného zdrojem se pohybuje přibližně mezi 850 a 1300 nm [15]. V závislosti na BR a vlnové délce se používají různé typy světelných zdrojů.

Dosahem rozumíme minimální vzdálenost přenosu zaručenou pro daný druh laseru, vlákna a přenosové rychlosti. Může dosahovat pouhých desítek metrů u rychlostí řádově 10 Gbps, stejně jako mnoha kilometrů pro linky vystačující si s nižšími BR.

Použitelný BW záleží na vzdálenosti přenosu, a proto se zavádí tzv. modal bandwidth, který reprezentuje kapacitu vlákna pro přenesení daného množství informací. V praxi se v katalozích nicméně používá pouze „bandwidth.“ Jeho jednotkou je MHz*km. Lze si tedy povšimnout, že zkrácením vzdálenosti na polovinu dosáhneme dvojnásobné šířky pásma a naopak.

BW u MM vlákna je funkcí typu vlákna a vlnové délky světelného zdroje. Obecně platí, že s rostoucím průměrem jádra a kratší vlnovou délkou roste i počet cest, které si paprsek najde. Pro masivněji používané graded-index vlákno přenosová rychlost dosahuje řádově stovek MHz*km až jednotek GHz*km.

Vezmeme-li kupříkladu HDTV (High Definition Television) přenos, jehož typický BR se pohybuje kolem 20 Mbps, můžeme říct, že jeho efektivní BW je přibližně 10 MHz (viz Nyquistův vzorkovací teorém²⁷). Předpokládáme-li dále, že BW vlákna musí být větší nebo roven BW přenášeného signálu, lze aproximovat maximální délku vlákna. Pro vlákno s BW rovným 500 MHz*km, se tak dostáváme na vzdálenost přibližně 50 km. Pokud bychom však vzali nějaký nekomprimovaný

²⁷ Zjednodušeně říká, že pro úspěšnou rekonstrukci spojitého signálu musíme vzorkovat alespoň dvakrát vyšší frekvencí, než je nejvyšší harmonická frekvence vzorkovaného signálu.

video přenos v reálném čase, dostáváme se na přenosové rychlosti v jednotkách Gbps a délky se tak smršťují pouze na stovky metrů.

Možností, jak zvýšit vzdálenost přenosu je nasazení vlnového multiplexu (Wavelength Division Multiplexing). Tato technologie využívá více laserů o různých vlnových délkách, kde v optickém multiplexeru jsou signály (červená, zelená, modrá) zkombinovány a vyslány do jednoho vlákna najednou. Lze takto dosáhnout až třikrát větší vzdálenosti přenosu, než kdyby bylo použito jedné vlnové délky.

Na druhé straně stojí SGM optické kabely, které se vyznačují téměř neomezeným BW. Jejich omezujícím faktorem je, že dříve, než disperze ovlivní kvalitu signálu, signál nevratně pohltí ztrátové činitele. Jejich výhodou oproti MM vláknům je tedy mnohem vyšší BR, nízká disperze a šum. Využívají se proto pro přenos na delší vzdálenosti.

Problém, který vyvstává u SGM vláken, nazýváme chromatická disperze. Vzniká tak, že různé vlnové délky putují vláknem jinými rychlostmi. Laser totiž nevyzařuje světlo pouze o jedné vlnové délce, ale více velice blízkých vlnových délek [39]. Kdyby byla k dispozici jen jedna vlnová délka, k chromatické disperzi by vůbec nedošlo a dosah by záležel pouze na útlumu.

Tab. 3. Srovnání základních technických parametrů jednovidového a graded-index vícevidového vlákna²⁸

	Průměr jádra [μm]	Průměr pláště [μm]	BW [MHz]	Útlum [dB/km]
Jednovidový	5-10	125	>500	2-5
Vícevidový-graded index	50-100	100-150	300-3000	2-10

4.2.6. Shrnutí k optickým kabelům

Je důležité si uvědomit, že OK tvoří pouze médium pro datový přenos. Pro svou plnou funkci vyžaduje některou z vhodných technologií. Jmenovitě např.: DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), Ethernet, MPLS (MultiProtocol Label Switching) a další.

OK mají svou nenahraditelnou funkci pro přenos dat, kde je vyžadován vysoký BR, rychlá odezva, vysoká dostupnost a bezpečnost. Hlavní nevýhodou však zůstává cena, a to jak materiálu, tak montáže.

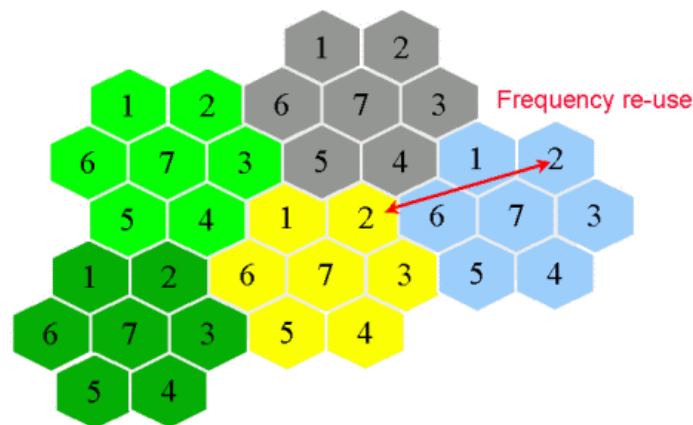
4.3. Celulární síť (Cellular networks)

CS rozdělují plochu na jednotlivé buňky, kde každá buňka je obsluhována jednou základnovou stanicí (base station) v jejím středu. Zařízení (zde tzv. terminál) nacházející se právě v dané buňce se připojí k základnové stanici, jež je dále napojena na telefonní ústřednu. Výhodou tohoto

²⁸ Převzato z: EKANAYAKE, J. B. *Smart grid: technology and applications*. Chichester: Wiley, 2012. str.32 ISBN 978-0-470-97409-4

konceptu je nízká energetická náročnost a zároveň efektivní využití frekvenčního pásma. Operátor totiž disponuje jen omezeným množstvím frekvencí, a tak v jedné buňce používá konkrétní kmitočty, přičemž sousední buňky tyto kmitočty nepoužívají rovněž, aby nedocházelo k vzájemnému ovlivnění.

Celá síť se skládá z pravidelných šestihranů poskládaných do sebe tak, že připomínají včelí plástev, což zobrazuje následující obrázek. V něm vidíme, že vždy sedmice buněk (dohromady tvořící svazek) používá kanály, které se v rámci svazku neopakují.



Obr. 18. Způsob rozvržení buněk v CS²⁹

V případě, že dojde k přestupu zařízení z jedné buňky do druhé, BS si zařízení vzájemně předají (tzv. handover) a uživatel zařízení by neměl nic poznat. Kapacitu systému lze zvýšit několika způsoby. Příkladem je zmenšení velikosti buněk, a tím pádem znovuvyužití kanálů se může použít víckrát. Dalším způsobem může být rozšíření používaného BW.

Terminál je vybaven kartou SIM (Subscriber Identification Module), pomocí níž je identifikován v síti. Ke komunikaci CS využívají licencovaná pásma.

4.3.1. Používané generace CS

Historicky existuje následující vývoj generací CS [16]:

1. 1G: analogový systém, pouze pro telefonní služby, BR 2,4 kbps.
2. 2G: označovaná pojmem GSM (Global System for Mobile Communications), už plně digitalizovaná, umožňovala i přenos SMS (Short Message Service), BR 64 kbps.
3. 2,5G: známá pod zkratkou GPRS (General Packet Radio Service), jedná se o vylepšení předešlé generace s BR 144 kbps.
4. 3G: uvedená r. 2000, BR až 2 Mbps.

²⁹ Převzato z: Telecom ABC. Cellular network [online]. Dostupné z: <http://www.telecomabc.com/c/cellular.html>

5. *3,5G*: využití technik HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access)-BR 14 Mbps a HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access)-BR 5,76 Mbps.
6. *4G*: současnost, BR až 1 Gbps.
7. *5G*: očekávána nejdříve r. 2020.

4.3.2. Protokoly pro vícenásobný přístup [17]

FDMA (Frequency Division Multiple Access): poskytuje uživateli přidělení jeho vlastních kanálů. Jedná se o jediný způsob, jak vytvořit duplexní analogové rádio.

TDMA (Time Division Multiple Access): pro přenos více hovorů v GSM. Dochází ke sdílení jednoho kmitočtu pro přenos více hovorů pomocí časového rozlišení. Tedy že každé zařízení má přidělený časový úsek, během kterého vysílá nebo přijímá. Řetězci těchto úseků říkáme timeslot.

CDMA (Code Division Multiple Access): využívá stejné frekvenční pásmo ve stejný čas. Všichni uživatelé tak komunikují skrz stejný kanál a pro jejich rozlišení se používá šifrování (každé zařízení má během spojení přidělen unikátní klíč, pomocí něž je identifikován).

4.3.3. FDD, TDD [17]

Podle přidělení frekvencí v duplexním přenosu rozeznáváme:

FDD (Frequency Division Duplexing): pro každý směr přenosu se používá jiná sada kmitočtů. To přináší výhodu v tom, že v obou směrech máme stejnou kapacitu přenosu. Hodí se to pro přenos hlasu, pro datové přenosy se více hodí asymetrický systém (vyšší BR směrem k uživateli).

TDD (Time Division Duplexing): vhodnější pro datové přenosy. Využívá pouze jednu sadu kmitočtů a sám si je, na bázi tzv. časového multiplexu, dělí mezi oba přenosy.

4.3.4. Problémy-interference, zeslabení signálu

Co-channel interference: definujeme jej jako rušivý signál mající stejný kmitočet nosné jako užitečný signál. Dvě buňky využívající stejné frekvence od sebe proto musí být vzdáleny dostatečně daleko, jinak dojde k této nepříznivé interferenci. Zavádíme pojem CCIP (Conditional Cochannel Interference Probability), neboli pravděpodobnost, že míra rušivého signálu překročí míru užitečného, přičemž platí úměra:

$$CCIP \approx \frac{R}{D}, \quad (4)$$

kde R značí poloměr buňky a D minimální vzdálenost BS používajících stejné kanály. CCIP snížíme na první pohled zmenšením R a zvětšením D, tím ovšem snižujeme kapacitu systému [18].

Adjacent channel interference: jedná se o rušící signál nacházející se ve frekvenčním pásmu sousedícím s frekvenčním pásmem signálu užitečného. Můžeme se setkat se dvěma variantami. Buď je střední frekvence rušícího signálu uvnitř pásma užitečného signálu, nebo vně.

Intersymbol interference: při průchodu symbolu kanálem dochází k jeho časovému rozptylu a ovlivnění detekce následujících symbolů, čímž se zvyšuje BER (Bit Rate Error).

Intermodulation interference: problémy způsobuje obzvláště u analogových přenosů. Vzniká na základě nelinearit na trase přijímač-vysílač a v případě, že je tato nelinearita využívána pro několik signálů, vznikají intermodulační produkty způsobující rušení.

Large scale fading: tento druh zeslabení signálu se zesiluje tím, že se zařízení vzdaluje od BS.

Flat fading: frekvenčně nezávislý útlum vyskytující se převážně za silného deště u vysokých frekvencí (>3 GHz). Tím pádem většina mobilní systémů používá kmitočty nižší.

Frequency selective fading: viz PLC

Dále se můžeme setkat s útlumy způsobenými Dopplerovým jevem, když se objekty pohybují (*Fast fading* a *Slow fading*).

4.3.5. Stávající využití CS, parametry

Technologie CS je již používána pro koncept SG. Kupříkladu americká firma Echelon používá GSM síť od T-Mobilu instalováním jejich SIM karet do svých SM. Lze říci, že velké množství operátorů celosvětově nabízí své GSM síť pro komunikaci ve SG. Jmenovitě např. Telecom Italia, Vodafone, China Mobile, Telenor atd.

Velikost latence se pohybuje u LTE v řádu desítek až nízkých stovek ms. V otázce pokrytí se zaměříme na ČR a využijeme Mapu pokrytí společnosti T-Mobile Czech republic a.s. [19]. V roce 2017 je téměř celé území pokryto technologií LTE 800 MHz, jež poskytuje BR až 75 Mbps pro downlink a 25 Mbps pro uplink. Když se podíváme na jiné české operátory, všichni přesahují 96 % pokrytí.

Hlavní výhodou využití stávající CS je použití existující infrastruktury a s tím související výrazně nižší náklady a kratší doba zprovoznění, než instalace a správa své vlastní sítě.

4.4. Narrowband Internet of things (NB-IoT)

Jedná se o novou LPWA (Low Power Wide Area) úzkopásmovou technologii, jež nebyla dosud vypuštěna do světa. Operuje na frekvencích pod 1 GHz. NB-IoT vychází z EPS (Evolved Packet System), je integrován do již existujícího LTE (Long Term Evolution) standardu a využívá licencované frekvenční pásmo (na rozdíl např. od výše jmenované LoRaWAN), čímž snižuje riziko interference. Použita je modulace QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying) a komunikace probíhá half-duplexně [20].

NB-IoT používá stejně jako LTE pro downlink OFDMA³⁰ a pro uplink SC-FDMA³¹. BW činí 200 kHz, což je méně než například u LTE (1,4-20 MHz).

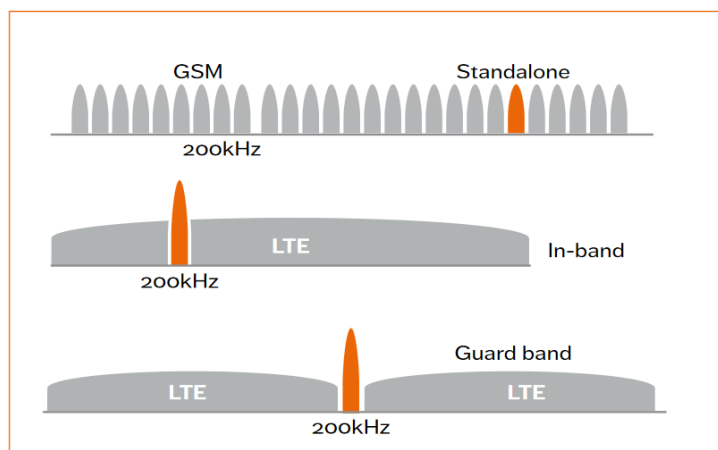
4.4.1. Způsoby řazení frekvenčního pásma

Frekvenční pásmo u NB-IoT lze zařadit třemi různými způsoby: samostatně (stand-alone), jako ochranné pásmo (guard band) nebo uvnitř pásma (in-band).

Samostatně: jedná se o variantu pro LTE sítě, které běží souběžně s GSM.

Ochranné pásmo: ochranná pásma se vkládají mezi radiová pásma, aby se předcházelo interferenci. Při návrhu se musel brát zřetel na to, aby spolu LTE a NB-IoT pásma neinterferovala.

Uvnitř pásma: u operátorů, jež mají k dispozici převážně LTE spektrum, se jedná o nejefektivnější řešení.



Obr. 19. Použitelná spektra u NB-IoT³²

4.4.2. Parametry NB-IoT

Ve srovnání s GPRS nebo LTE má NB-IoT o 20 dB vyšší bilanci spoje (link budget)³³. Tím pádem nejen že NB-IoT využívá stávající GSM/LTE infrastrukturu, ale dokáže pokrýt i hůře dostupná místa.

³⁰ OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) využívá desítky až tisíce nosných frekvencí. Nosné jsou modulovány modulacemi QPSK nebo M-QAM. Dílčí nosné jsou navzájem ortogonální (tzn. jejich skalární součin je roven nule). Tok informací celého kanálu se dělí na stovky informačních toků dílčích nosných. Toky na jednotlivých nosných jsou přenášeny poměrně malou modulační rychlostí, a tím pádem OFDM poskytuje dobrou ochranu proti vícecestnému šíření [38].

³¹ SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access) používá více subnosných vln. Na rozdíl od OFDMA nejsou vstupní bity použity pro vytvoření signálu, ale informace jsou rozloženy na všechny subnosné. Na vstupní bity je nejprve použita rychlá Fourierova transformace. Tak vzniká báze dat, která je použita obdobně jako u OFDM k vytvoření subnosných [38].

³² Převzato z: Ericsson. NB-IoT: A sustainable technology for connecting billions of devices. Ericsson technology review, Volume 93, March 2016. s. 4. ISSN 0014-0171

³³ Balance spoje zahrnuje všechny zisky a úbytky signálu při přenosu mezi dvojicí bezdrátových vysílačů.

Stejně jako LTE nabývá dvou režimů, RRC_idle (radio resource control) a RRC_connected. V nečinném režimu RRC_idle šetří baterii a nepřijímá ani neodesílá data, a naopak ve stavu RRC_connected tak činí. V hůře dostupných lokalitách nemusí být limitujícím faktorem BW, ale síla signálu. Zařízení tak mohou zúžit využívané pásmo a postoupit ho jiným zařízením a následně zvýšit kapacitu systému. K tomuto procesu NB-IoT nepoužívá zdrojové bloky (resource blocks), ale subnosné, jejichž BW je 15 kHz, ale může klesnout až na 3,75 kHz [21].

Jak uvádí [21], očekává se, že cena NB-IoT modulu bude pod 5 dolarů za účelem velkého rozšíření a zároveň je velice důležitým aspektem nízká spotřeba energie (většina aplikací nemá přípojku do elektrické sítě), utrpěla na úkor těchto požadavků latence i BR. Latence se pohybuje mezi 1,6- 7,6 s v závislosti na kvalitě pokrytí. BR dosahuje maximálně 235 kbps pro downlink a 205 kbps pro uplink [20].

Modul obsahuje SIM kartu a provozní náklady, které zahrnují platby operátorovi za přenos dat, pravděpodobně brzy po uvedení do provozu přesáhnou samotnou cenu modulu. Může se instalovat až 50 000 zařízení na jednu buňku.

Jelikož využívá licencované pásmo, poskytuje vyšší QoS (Quality of Service) než jiné IoT technologie, to se ovšem promítá do nákladů, neboť cena za jeden MHz v licencovaném pásmu typicky přesahuje půl miliardy dolarů [22].

Nevýhodou nicméně zůstává závislost na 4G/LTE základnových stanicích, proto pro pokrytí odlehlejších míst se více hodí jiná IoT technologie (např. LoRAWAN).

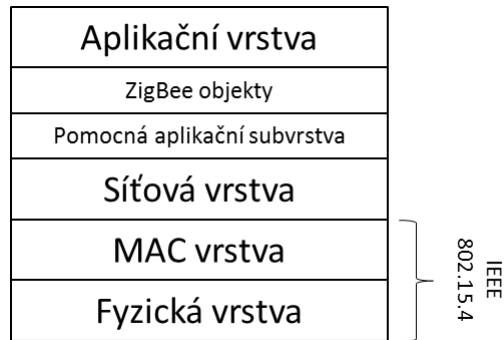
4.5. ZigBee (ZB)

ZB je bezdrátová komunikační technologie postavená na IEEE 802.15.4³⁴, která operuje na frekvencích 868 MHz v Evropě (BW 600 kHz; BR 20 kbps), 915 MHz v USA (BW 2 MHz, BR 40 kbps) a 2,4 GHz ve většině zemí světa (BW 5 MHz, BR 250 kbps). Umožňuje komunikaci velkého množství zařízení na vzdálenost desítek metrů.

4.5.1. Architektura, uspořádání v ZB

Architektura protokolu je ukázána v následujícím obrázku. Spodní dvě vrstvy jsou definovány standardem IEEE 802.15.4, aplikační (application) a síťová (network) vrstva jsou definovány ZB Alliance, což je uskupení více než 285 nadnárodních společností spolupracujících za účelem vytvoření spolehlivého, ekonomického, nízkoenergetického bezdrátového standardu.

³⁴ IEEE 802 je skupina standardů, jež byla vyvinuta pro podporu LAN (Local Area Network).



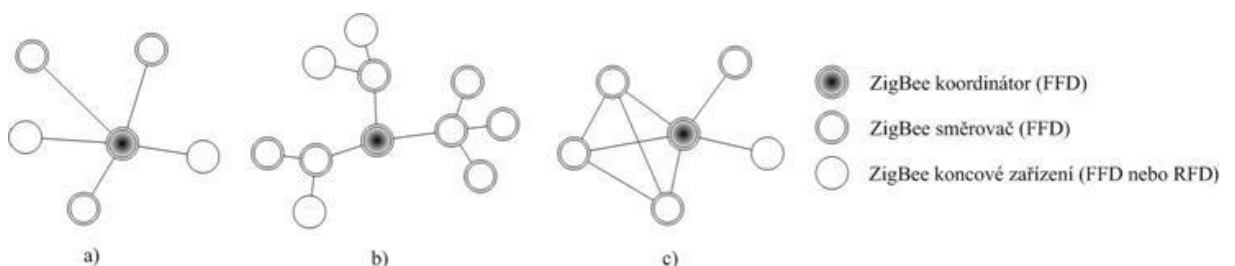
Obr.20. Architektura ZB³⁵

ZB zařízení může být buď s plnou funkcí (full function device(FFD)) nebo s redukovanou funkcí (reduced function device(RFD)), přičemž síť musí mít alespoň jedno FFD, které může fungovat ve třech módech:

- Koordinátor: kontroluje síť a ukládá informace o síti.
- Router (směrovač): rozšiřují pokrytí, poskytují záložní cesty pro případ přetížení sítě nebo selhání zařízení. Můžou se připojit ke koordinátorovi nebo k jiným routerům.
- Koncové zařízení: mají schopnost přijímat a vysílat zprávy, musí být připojeny k routeru nebo ke koordinátorovi.

RFD se chová pouze jako koncové zařízení, může komunikovat jen s FFD, zatímco FFD může komunikovat se všemi typy.

ZB sítě se používají ve třech topologiích: hvězda (star), síť (mesh) nebo strom (cluster tree).



Obr. 21. Topologie sítí pro ZB³⁴

ZB používá dva hlavní módy: beacon³⁶ a non-beacon mód:

- Beacon mód: slouží pro bateriově poháněné koordinátory a snaží se tedy šetřit energií.

³⁵ Převzato z: KOTON, Jaroslav, ČÍKA, Petr, KŘIVÁNEK, Vítězslav. Standard nízkorychlostní bezdrátové komunikace ZigBee [online]. Vysoké učení technické v Brně, duben 2006. Dostupné z: <http://access.fel.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2006032001>

³⁶ Jedná se o řídicí rámec, který je periodicky vysílán a oznamuje přítomnost sítě LAN.

- Non-beacon mód: pro koordinátory napájené ze sítě.

Existují čtyři druhy rámců (frame) pro komunikaci v ZB [23]:

- *Beacon Frame*-slouží k synchronizaci, v *beacon-enabled* sítích probouzí zařízení
- *Data Frame*-používán pro všechny datové přenosy.
- *Acknowledgment Frame*-slouží k potvrzení úspěšně přijatého rámce. Jsou vysílány ihned po příjmu datového rámce v čase mezi rámci (*IFS-Interframe Space*).
- *MAC Command Frame*-k nastavení a řízení klientských zařízení.

4.5.2. ZB bezpečnost, parametry

Při přenosu se používá cyklický kód, který spočívá v dělení rámce polynomem:

$$G(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1 \quad (3)$$

a na základě zbytku po dělení se odhalují chyby při přenosu [23].

Pro zvýšení bezpečnosti ZB používá tzv. Trust center, což je druh zařízení, který umožňuje routerům a koncovým zařízením připojit se k síti, pokud splňují požadavky. Zabezpečení komunikace v aplikační vrstvě je založena na 128 bitovém AES (Advanced Encryption Standard) setu šifrovacích klíčů [24].

Během vysílání dochází k náhradě jednotlivých bitů sekvencí bitů, a tím se signál rozprostře do širšího spektra, čímž je odolnější proti rušení. Příkladem další kontroly může být MIC (Message Integrity Code), jenž spočívá v kryptografickém součtu obsaženým do vysílaného rámce. Na straně příjmu se tento údaj porovná se skutečným přijatým a v případě odlišnosti je rámec odmítnut. Latence se uvádí mezi 15-30 ms, BR jsou uvedeny výše.

5. Technicko-ekonomické vyhodnocení vybraných technologií, návrh jejich začlenění s využitím vstupních dat

V předešlém textu proběhlo seznámení s výběrem komunikačních technologií, které jsem určil jako potenciální adepty na zprostředkování obousměrné komunikace spotřebitel-distributor. V následující části vyhodnocuji požadavky dílčích konceptů na parametry komunikačního kanálu na základě externích dat; a díky znalosti konkrétních požadavků vyhodnotím vhodnost či nevhodnost technologií navržených v teoretické části.

5.1. Požadavky na komunikační kanál

5.1.1. Požadavky na komunikační kanál podle Ministerstva energetiky Spojených států amerických

Následující požadavky na stěžejní parametry komunikačního kanálu jsou převzaty ze studie *Communication requirements of Smart grid technologies*, která byla vypracována pro Ministerstvo energetiky Spojených států amerických.³⁷ Americkou dokumentaci jsem si vybral kvůli tomu, že USA považují za vyspělou mocnost, jejíž studie by měly mít velkou informační hodnotu. Jednotlivé požadavky jsou náležitě okomentovány.

5.1.1.1. *Smart metering*

Historické, ale i současné použití AMR (Automatic Meter Reading), které využívalo simplexní komunikaci pouze pro potřeby vzdálených odečtů, se plánuje nahradit technologiemi AMI. Ty využívají duplexní komunikaci, stejně tak výměna informací je řádově četnější a jsou na ni kladeny jiné nároky. Za příklady by šlo uvést data o spotřebě, cenové signály, příkazy na snížení odběru v době špiček apod. AMI je poměrně široký pojem a v rámci odlišných prvků v síti se očekávají různé nároky na parametry přenosu.

Na straně odběratele se očekává propojení IED, elektromobilu, domácích zdrojů elektřiny, úložišť elektrické energie a SM jako rozhraní do jedné sítě HAN. Přenášená data se tak v podstatě budou skládat jen z informace o aktuálních odebíraných/dodávaných wattech. Dostačující se proto jeví BW 10-100 kbps. Spolehlivost a bezpečnost přenosu také nelze považovat za kritickou, dostačující dostupnost lze tedy brát 99-99,99 %. Dalším z ukazatelů, na které se studie zaměřuje,

³⁷ Department of Energy. *Communication requirements of Smart grid technologies* [online]. Department of Energy, October 5, 2010. s.11-36. Dostupné z: https://www.energy.gov/sites/prod/files/gcprod/documents/Smart_Grid_Communications_Requirements_Report_10-05-2010.pdf

je latence. Tam bychom si v rámci časového zpoždění mezi reálně spotřebovaným wattem a zobrazením spotřeby na displeji domácí jednotky, mohli dovolit latenci v řádu 2-15 s. Co se týče periodičnosti odečtů, odečet dat každých 5-15 min by měl být dostačující, jelikož real-time/near-real-time monitoring ze strany distribuční společnosti by při množství zařízení vyžadoval velmi vysoké přenosové kapacity.

Sesbírané informace jsou skrz SM poskytovány dále směrem ke shromažďovacímu místu, kterým může být lokální telekomunikační věž, distribuční trafostanice atd. Nároky na parametry přenosu se uvádějí stejné jako v HAN. Z tohoto místa probíhá finální přenos dat k distributorovi, k čemuž může být využita privátní síť. Rostou zde požadavky na BW, které se očekávají kolem 500 kbps.

5.1.1.2. Reakce na poptávku

Chceme-li se zabývat DER, musíme vzít v potaz míru sofistikovanosti systému. DER totiž může mít několik podob (viz sekce 1.4.6.). Nejjednodušší varianta počítá se souhlasem konzumenta, že v době špiček jej distributor odpojí od elektřiny pro určitá zařízení. DER ale může probíhat i na základě cenových podnětů, kdy zákazník se sám rozhoduje, zda se zapojit, či nikoliv. Sofistikovanější verzí je automatizace, kdy rozhodnutí za spotřebitele dělají IED.

Logicky z toho tedy vyplývá, že žádané parametry přenosu se budou, v rámci míry sofistikovanosti DER, lišit. Pro variantu prostého odpojení na základě příkazu ze strany distributora, si vystačíme s minimálním BW. Avšak s rostoucí mírou komplexity roste i požadavek na BW, který je ekvivalentní k požadavku pro SM, možná i větší. V otázce latence se pohybujeme v širokém spektru 500 ms-2 s, uvádí se ovšem i několik minut. Míra kritičnosti je zde věcí názoru, neboť v krajní situaci by selhání komunikace mohlo vést k přetížení soustavy. Při využití DER k těmto účelům klesá dovolená latence a žádaná dostupnost se pohybuje mezi 99 až 99,99 %.

5.1.1.3. Distribuované zdroje, elektrická úložiště

S rozvojem obnovitelných zdrojů elektřiny na úrovni distribuční soustavy dochází k významnému zkomplikování systému. Jednak dochází ke změnám směru toku energie, jednak situaci zesložituje intermitentní povaha těchto zdrojů. Je proto vhodné tyto toky měřit v reálném čase, a následně je alokovat a korigovat. Názory na parametry komunikačního kanálu se liší. Žádaný BW se udává v rozmezí 9,6-56 kbps pro každý dílčí zdroj. Vyhovující latence leží dle jednoho pohledu mezi 300 ms-2 s, setkáme se však i s 15 sekundami. Dostupnost technologie lze požadovat od 99 do 99,99 %.

5.1.1.4. Elektromobilita

V otázce dnešního fenoménu, elektromobilů, musíme počítat se zvýšeným zatížením energetické soustavy, kdy dnešní síť není dimenzována na takové proudové zatížení, jaké představuje hromadné dobíjení automobilů v době, kdy se většina lidí vrací z práce domů. Zároveň však, jak jsem již dříve zmínil, elektromobil disponuje vysokokapacitní baterií, kterou lze využít i jako zdroj elektřiny pro krytí odběrových špiček. Očividná je tedy nutnost spolupráce s DER, která původní nárok na BW (9,6-56 kbps) navyšuje na 100 kbps. Latenci, která by negativně neovlivnila funkci, zdroje uvádí od 2 s do 5 min. Žádaná dostupnost se pohybuje stejně jako v předešlých případech mezi 99 a 99,99 %. Diskutované nároky shrnuje následující tabulka.

Tab. 4. Nároky na parametry komunikačního kanálu, Ministerstvo energetiky USA

	BR	Latence	Dostupnost
Smart metering	10-100 kbps	2-15 s	99-99,99 %
Reakce na poptávku	10-100 kbps	0,5-2 s	99-99,99 %
Distribuované zdroje,elektrická úložiště	9,6-56 kbps	0,3-2 (15) s	99-99,99 %
Elektromobilita	9,6-56 (100) kbps	2 s-5 min	99-99,99 %

5.1.2. Požadavky na komunikační kanál podle ČEZ Distribuce a.s.

Nyní výše uvedené požadavky porovnám s parametry, které od zamýšlených komunikačních technologií očekává společnost ČEZ Distribuce a.s.. Zde je třeba poznamenat, že co prvek SG, to diametrálně odlišné požadavky na parametry komunikace (na přenosové hladině jsou například vyšší nároky na dostupnost apod.). Firmou byla s laskavým svolením poskytnuta data, která pokrývají celou elektrizační soustavu. Já se zde ovšem zaměřuji pouze na část komunikační sítě, a tou je komunikace distributor-spotřebitel, s návazností na komunikaci v rámci odběrného místa v síti HAN.

Zatímco ve zprávě amerického Ministerstva energetiky je využito jemnější rozdělení komunikace distributor-spotřebitel se zaměřením na konkrétní funkce; na SM, DER, obnovitelné zdroje atd. ČEZ celou tuto skupinu konceptů pokrývá obecnějšími termíny, které spíše než s obsahem konceptu, souvisí s místopisnou lokací. Nároky na tyto prvky, s potřebnými komentáři, shrnuje následující tabulka. Některá data bohužel chybí, nicméně jsou známy požadavky na významnější, a tedy logicky na parametry náročnější, prvky. Lze tedy dle mého mínění předpokládat, že technologie, která bude vyhovovat těmto aplikacím, poskytne dostatečné parametry i pro méně významné aplikace.

Tab. 5. Nároky na parametry komunikačního kanálu, ČEZ Distribuce a.s.

Popis kategorie místa	Kategorie významnosti**	Orientační počet	Trend a výhled	Komunikační úlohy	Charakter komunikace	Řešení komunikace	Záložní napájení pro komunikaci	BR	Latence	Dostupnost
Odběrná místa většího významu	K5	70000	/	řízení zátěže, monitoring, obch. měření, měření kvality	periodická komun.*	Nezáloh., primárně HDO+, mobilně/PLC/DSL	ne	/	/	98% řízení zátěže, ostatní 95%
Odběrná místa menšího významu (včetně domácí dobýjecí stanice)	K7	5000000	/	řízení zátěže, monitoring, obch. měření	periodická komun.*	Nezáloh., primárně HDO+, mobilně/PLC/DSL	ne	/	/	98% řízení zátěže, ostatní 95%
Veřejné dobýjecí stanice nad 22 kW	K5	jednotky tisíc	předpoklad nárůstu	řízení zátěže, regulace, monitoring, obch. měření	online komun., střední dostupnost a zabezpeč., řádově 10 kbps	Nezáloh., primárně HDO+, mobilně	do 3 min	5-20 kbps	1-10 s	98-99 %
Veřejné dobýjecí stanice pod 22 kW	K6	jednotky tisíc	předpoklad nárůstu	Řízení zátěže, monitoring, obch. měření	periodická komun.*	Nezáloh., primárně HDO+, mobilně	do 3 min	/	/	98 %
Obnovitelné zdroje většího významu	K5	3000	předpoklad nárůstu	telemetrie řídicích systémů (signalizace, měření, regulace), dohled, obch. měření	online komun., střední dostupnost a zabezpeč., řádově 10 kbps	Nezáloh., primárně HDO+, mobilně	2 h	2-20 kbps	1-10 s	98-99 %
Obnovitelné zdroje menšího významu	K6	/	/	telemetrie řídicích systémů (signalizace, měření, zap/vyp), dohled, obch. měření	online komun., střední dostupnost a zabezpeč., řádově 1 kbps-10 kbps	Nezáloh., primárně HDO+, mobilně	do 3 min	/	/	98% ovládání zap/vyp, ostatní 95%

* např. jednou za 10 nebo 15 minut, vysoké zabezpečení

+ hromadné dálkové ovládání

** čím vyšší číslo, tím nižší významnost (a kritičnost)

5.1.3. Zhodnocení požadavků

Pokud bych měl mezi sebou porovnat obě tabulky, vidím opravdu markantní rozdíl v požadavcích na dostupnost. Vezmu-li střední hodnotu rozsahu udávanou ve studii Ministerstva energetiky USA (99,9 %) a srovnám ji s hodnotou 98 % z tabulky poskytnuté ČEZem, tak v ročním období by v prvním případě technologie nebyla dostupná cca 8 h 45 min, v případě druhém více než týden. Tuto diametrální odlišnost údajů přisuzuji tomu, že ČEZ v tuto chvíli nepřisuzuje SM takovou kritičnost, tedy že by na jeho bázi stála rovnováha v síti a tuto funkci pravděpodobně zatím přenechává zavedenějším postupům monitoringu.

Druhým sledovaným parametrem je BR. Zde je opět americká zpráva náročnější (vyžaduje až 100 kbps, zatímco špičková hodnota u ČEZ činí pouze 20 kbps). Tento rozdíl však není tak do očí bijící jako u dostupnosti. Důvodem volnějšího přístupu ze strany ČEZu dle mého názoru bude, že ČEZ neplánuje tak vysokou sofistikovanost systému, a stále vedoucím využitím komunikace budou vzdálené periodické odečty a podobně nenáročné aplikace, které, na rozdíl například od real-time monitoringu odebíraného/dodávaného výkonu, nevyžadují tak vysoký BR.

Posledním kvantitativním parametrem, na který se zaměřuje tabulka, je latence. Z důvodu velkého rozpětí požadavků dochází k významnému překryvu americké zprávy a požadavků ČEZ, a tak lze konstatovat, že nároky obou stran jsou podobné.

5.2. Parametry diskutovaných komunikačních technologií

V následující tabulce shrnuji dosažitelné stěžejní parametry diskutovaných technologií.

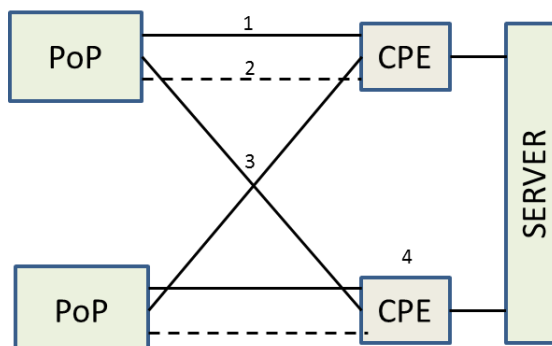
Tab. 6. Shrnutí dosažitelných parametrů komunikačních technologií

		Dosažitelný BR	Latence	Dosah	Využití
PLC	NBPLC	500 kbps	stovky ms-jednotky s	3 km	HAN,NAN
	BPL	stovky Mbps	desítky-stovky ms	stovky m	HAN,NAN
Optický kabel		vysoký (Tbps)	nízká	vysoký (desítky km)	WAN
Celulární síť	GSM	64 kbps	stovky ms-jednotky s	nízké desítky km	HAN,NAN,WAN
	GPRS	144 kbps	stovky ms-jednotky s	nízké desítky km	HAN,NAN,WAN
	LTE	1 Gbps	desítky-stovky ms	jednotky km	HAN,NAN,WAN
NB-IoT		235 kbps	jednotky s	jednotky (nízké desítky) km	HAN,NAN,WAN
ZigBee		250 kbps	desítky ms	100 m	HAN

5.2.1. Dostupnost

Pro každou funkci v síti, která má být obhospodařována nějakým druhem komunikace, zadavatel (v mém případě ČEZ Distribuce a.s.) deklaruje požadovanou dostupnost. Tento parametr není dán pouze typem technologie, ale skládá se z více proměnných.

Jednoduché nastínění problematiky si ukážeme na následujícím obrázku. Ten se skládá z několika bloků: CPE (Customer Premises Equipment), což může být v podstatě jakékoliv koncové zařízení jako router apod.; PoP (Point of Presence), přístupový bod, kontakt na službu; a server.



Obr. 22. Schéma pro vysvětlení dostupnosti

Komunikace mezi CPE a PoP standardně probíhá po lince č. 1. Pro zvýšení spolehlivosti můžeme paralelně k ní připojit druhou linku (č. 2), kterou lze provozovat na stejné nebo i jiné technologii. Také ovšem může nastat případ, že nám vypadne PoP, a proto současným připojením na jiný PoP (linka č. 3) dosáhneme dalšího zvýšení spolehlivosti sítě. Za účelem dalšího navýšení spolehlivosti lze server osadit rezervním CPE (č.4).

Z výše uvedeného vyplývá, že dostupnost lze zvýšit:

1. Volbou spolehlivější technologie
2. Paralelní linkou
3. Připojením na více PoP
4. Redundantním CPE
5. Smluvně

Poslední jmenované nám sice nezaručí, že skutečně bude dosaženo žádané dostupnosti, ale v případě, že nebude splněn smluvní požadavek, dostane zákazník finanční kompenzaci od operátora. Tato skutečnost donutí operátora přikládat komunikaci větší váhu, a tím pádem dojde i k reálnému zvýšení dostupnosti.

Ve zkratce lze tedy říci, že i při použití méně spolehlivé technologie může být dosaženo vyšší dostupnosti, pokud je síť postavena s dostatečnou redundancí.

Pokud bychom měli seřadit mnou vybrané technologie podle dostupnosti, tak nejvyšší hodnoty by dosáhlo optické vlákno, které bývá nejlépe chráněno před vnějšími vlivy. Hned po něm by se umístily další drátové technologie, jako je třeba DSL; dobré dostupnosti by mělo dosahovat i PLC. Obecně horší dostupnosti dosahují bezdrátové technologie, z nichž lépe si stojí ty, které využívají licencované pásmo (CS, NB-IoT).

5.3. Technicko-ekonomické vyhodnocení technologií

5.3.1. PLC

Výhody a nevýhody:

- + Využití stávajících elektrických rozvodů
- + Nízké náklady spojené s instalací i údržbou
- + Ve vlastnictví energetické společnosti-nezávislost na třetích stranách
- Elektromagnetická kompatibilita (převážně v sítích nn, kde se nachází nejvíce zdrojů šumu)
- Náklady spojené s vlastnictvím

Pro zamýšlené aplikace přichází v úvahu úzkopásmové (NBPLC) a širokopásmové (BPL) PLC. Je třeba uvažovat topologii sítě, jelikož např. v USA běžně jedno trafo obsluhuje kolem deseti domácností, u nás distribuční transformátor pokrývá řádově více odběratelů, a tím pádem se PLC vyplatí implementovat více u nás než v Americe. Studie³⁸ zabývající se problematikou ukázala, že BR v řádech desítek Mbps lze dosáhnout vzdálenosti 500 m bez nutnosti repeaterů a jelikož distribuční trafo vn/nn je většinou blíže od domácnosti než jmenovaná vzdálenost, nahrává nám tento fakt pro využití BPL.

NBPLC přináší výhodu většího dosahu a transceivery jsou levnější. Dalšími argumenty proti BPL jsou, že jeho vysokofrekvenční signál neprojde přes distribuční trafo bez bypassu a dochází k velkému útlumu s rostoucí vzdáleností. Nicméně jeho omezené parametry by nám v budoucnu nemusely stačit, jelikož očekávám další vývoj, který s sebou přinese vyšší nároky na komunikační kanál (s BPL jde například dosáhnout vyšší bezpečnosti). Tím pádem se domnívám, že je vhodnější provést nyní vyšší investici, která nebude za několik let vyžadovat náhradu technologie z důvodu nedostačujících parametrů. Proto bych se přikláněl k implementaci BPL.

Pro páteřní propojení, kde lze využít třeba DSL, optické vlákno, Wi-Fi apod., BPL vyvažuje pořizovací náklady svým nízkonákladovým vlastnictvím a údržbou. K dosažení stejného „výkonu“ by Wi-Fi vyžadovala několik repeaterů, OK zase má vysoké náklady na pořízení a instalaci kabeláže.

Lze konstatovat, že jak NBPLC, tak BPL by měly pokrývat nároky na parametry, které stanovil ČEZ i Ministerstvo energetiky USA. Ovšem, jak jsem výše vysvětlil, osobně bych pro implementaci volil BPL před NBPLC. Toto tvrzení potvrzuje fakt, že v minulosti proběhl pilotní projekt, ve kterém byla instalována BPL zařízení od kanadské firmy Corinex Communication v rámci nn sítí ČEZ s výbornými výsledky.

³⁸ DOMINIÁK, S.; ANDERSSON, L.; MAURER, M.; SENDIN, A.; BERGANZA, I. Challenges of Broadband PLC for Medium Voltage Smart Grid Applications. In Proceedings of the 6th WorkShop on Power Line Communications, Rome, Italy, 20–21 September 2012.

5.3.2. Optické vlákno

Výhody a nevýhody:

- + Téměř neomezený BR
- + Dlouhý dosah
- + Spolehlivost
- + Velmi nízká latence
- + Bezpečnost
- + Odolnost proti rušení
- Vysoké náklady na instalaci kabelů (výkopové práce)
- Vysoké náklady na terminály
- Obtížný upgrade

OK poskytují v dnešní době technologii dosahujících nejlepších parametrů, ať už se jedná o BR, dostupnost, latenci, zabezpečení atd. Protiváhou k jejich vynikajícím vlastnostem je ovšem vysoká cena spojená jednak se samotným médiem, jednak především s náklady na výkopové práce. Proto jeho instalace na nn straně distribučního trafa (tedy vedení OK ke každé domovní jednotce) je dle mého názoru finančně nezvládnutelná (viz sekce 5.3.7.). To neznamená, že do komunikace spotřebitel-distributor se nezapojí (páteřní sítě běží z velké části na optickém vláknu), nicméně se nejedná o last-mile instalaci, na kterou cílím v této práci.

5.3.3. Celulární sítě

Výhody a nevýhody:

- + Pokrytí velkého území
- + Bez nutnosti velké počáteční investice do infrastruktury
- + Léty prověřená technologie
- + Vysoký BR a nízká latence u nových generací
- Závislost na třetích stranách, kde výpadek ze strany operátora může ohrozit elektrizační soustavu
- Netransparentní QoS (Quality of Service), jelikož energetická společnost nemá kontrolu nad poskytovanou službou a nevidí do ní
- Bezpečnost a soukromí přenášených dat (již zmiňované údaje o spotřebě, z nichž lze vyčíst denní návyky spotřebitelů)
- Poplatky operátorovi, které úměrně rostou s množstvím obhospodařovaných jednotek

Využití CS, převážně formou GSM, pro vzdálené odečty, je dnes relativně hojně využíváno. Nabízí se tedy využití novějších generací pro náročnější aplikace, které se objevují ve SG. Nevýhodou, kterou přináší, je větší energetická náročnost a u LTE jsou v různých zemích používána jiná

pásma, tím pádem mohou vzniknout potíže s kompatibilitou zařízení. Další negativní vlastností 4G sítí pro potřeby SM je, že samotnému datovému přenosu předchází komunikace připravující kanál a následně jej také uzavírající. Při velkém množství zařízení by základnové stanice byly zahlceny touto neúčinnou komunikací. Proto se jako optimální řešení nabízí využít konceptu IoT, které staví na stávající CS, ale s modifikacemi upravujícími technologii přesně na míru žadáním funkcím a parametrům. Vyšší uplatnění pro CS vidím pro páteřní komunikaci datový koncentrátor-kontrolní centrum.

5.3.4. Narrow-Band IoT

NB-IoT je založeno na CS, proto výhody a nevýhody jsou ekvivalentní. Některé vlastnosti, jimiž se NB-IoT vyznačuje, je dobré zdůraznit.

Výhody a nevýhody:

- + Nízká spotřeba energie
- + Absence balastní komunikace pro obsluhu kanálu
- + Zvýšená spolehlivost díky použití licencovaného pásma
- + Možnost připojení přímo na základnové stanice
- + Nízká cena modulu
- + Jednoduchá topologie, snadná rozšiřitelnost
- Mladá technologie

Dalo by se říci, že NB-IoT je technologie vyvinutá pro potřeby SM. Na rozdíl od svých konkurentů, jako je SigFox nebo LoRa nepotřebuje pro svůj provoz vlastní vysílače a nepodřizuje vše velké výdrži baterie. Tím pádem dosahuje řádově lepších parametrů komunikačního kanálu. Současně využívá licencované pásmo, což zvyšuje spolehlivost služby (na druhou stranu využívání licencovaného pásma zvyšuje CAPEX, které se následně promítne do poplatků energetické společnosti operátorovi (OPEX)). Díky přímé komunikaci se základnovou stanicí nevyžaduje nákladnou investici do komunikační infrastruktury, neboť přímo staví na existující síti (pro provoznění stačí softwarová aktualizace stanic). Cena jednoho modulu by se měla pohybovat kolem 5 dolarů, což se jeví jako velmi silný argument pro zvolení této technologie.

5.3.5. ZigBee

Výhody a nevýhody:

- + Nízká komplexita
- + Nízké investiční náklady
- + Nízká spotřeba energie
- Malý dosah
- Nízký BR

Svémi parametry je ZB předurčen pro aplikace, kde není vyžadován vysoký BR a přenos probíhá maximálně na desítky metrů. Tím se hodí pro automatizaci v budovách, chytré osvětlení, bezdrátová komunikace se senzory a IED apod. To přímo ukazuje na využití v rámci sítí HAN. Výhodnou vlastností je možnost vytvoření mesh sítě, kde každé zařízení se chová jako uzel. Tímto způsobem může zpráva putovat přes jednotlivá zařízení až do finální destinace; zároveň je zvýšena spolehlivost sítě.

Využití ZB pro last-mile instalaci je možné, neboť jeho parametry pokrývají kladené požadavky. Jeho nevýhodu oproti NB-IoT vidím v tom, že se jedná o technologii operující v rámci relativně malého území a pro vzdálenější přenos dat je závislé na jiné komunikační technologii. To nám u NB-IoT odpadá, jelikož to komunikuje přímo se základnovou stanicí. Ta samozřejmě je napojena na další komunikační technologii (rádiové spojení/optické vlákno), toto spojení ovšem už existuje a není potřeba ho teprve instalovat.

Moje doporučení pro ZB tedy zní, že se jedná o vhodnou technologii pro HAN, nicméně pro NAN bych volil z bezdrátových řešení spíše NB-IoT.

5.3.6. Předběžný výběr

V předešlé pasáži jsem srovnal technologie, které jsem v této práci podrobil bližšímu zkoumání. Pokud bych měl vyvodit závěry, které technologie splňují požadavky na kladené parametry porovnáním tabulek Tab.4., Tab.5. a Tab.6., domnívám se, že všechny diskutované technologie tyto nároky splňují. Pouze u NB-IoT by mohlo, dle mého názoru, u náročnějších aplikací v budoucnu dojít k problémům způsobených relativně vyšší latencí. Nicméně pro současné požadavky je vyhovující.

Po analýze jsem došel k předběžnému vyfiltrování dvou technologií, a to PLC (konkrétně širokopásmová varianta BPL), jako zástupce drátových řešení, a NB-IoT, bezdrátovou komunikační technologii založenou na CS. Navrhované řešení zjednodušeně zachycuje následující schéma, ve kterém jsou zachyceny analyzované technologie přiřazené k částem sítě, ve kterých vidím jejich možné využití.

HAN zde představuje domácnost, v jejímž rámci probíhá komunikace mezi zařízeními jako jsou elektromobil nebo fotovoltaický panel. NAN pokrývá oblast obhospodařovanou jedním distribučním trafem a WAN je zde nadřazená páteřní síť.

Tab.8 Investiční a provozní náklady spojené s instalací optických kabelů

Podzemní vedení OK	Jednotková cena (Kč/km)
<i>Pokládka (samostatná akce)</i>	2 000 000
	Jednotková cena (Kč/km/rok)
<i>OPEX</i>	10 000

Po vynásobení vzdálenosti jednotkovými náklady vychází částka spojená s instalací na 3 860 000 Kč, OPEX 19 300 Kč/rok. Ze schématu vyplývá, že trafo obhospodařuje cca 105 odběrných míst. Při využití NB-LoT by OPEX činil méně než 10 500 Kč/rok (viz Tab.7) a pokud by cena modulu pro NB-LoT skutečně činila jen 5 dolarů za kus, dostávám se na investici 525 dolarů (při zanedbání nákladů na práci, dopravu technika na místo apod.), což při současném kurzu vychází na nějakých 11 200 Kč. Tedy více než 340x méně než v případě OK. Samozřejmě model nezahrnuje vyšší životnost či lepší parametry OK, a obsahuje velké množství zjednodušení, ovšem markantní rozdíl v řádech ukazuje na nevhodnost samostatné pokládky OK pro potřeby SM v last-mile instalacích.

5.3.7.3. BPL vs. NB-LoT

Po předchozí analýze mi zbyli dva kandidáti, BPL a NB-LoT, ze kterých bych měl nyní, na základě jejich vlastností a nákladů spojených s instalací a údržbou, vybrat nejvhodnějšího adepta.

Obě technologie se od sebe významně odlišují; BPL je charakterizováno jako drátové řešení, stavějící na energetických rozvodech vlastněných energetickou společností a stejně tak následné vybudování potřebné infrastruktury by vstoupilo do plného vlastnictví dané firmy, s čímž se pojí vysoké CAPEX, jež zatěžují hospodářský výsledek během let provozu formou odpisů (zde je třeba dodat, že právě odpisy tvoří nejvýznamnější nákladovou položku v účetnictví distributorské společnosti). Samotné nacenění potřebné investice je záležitost nesmírně složitá a přesahuje rámec této práce. Z důvodu citlivosti dat mi ani nákladová analýza nemohla být poskytnuta zadavatelem. Jedná se o obrovské množství zařízení zahrnujících terminály, opakovače atd., jejichž ceny mi nejsou známy; nehledě na složitost výpočtu obsluhované plochy a počtu odběratelů. OPEX zde v poměru ke CAPEX očekávám výrazně nižší.

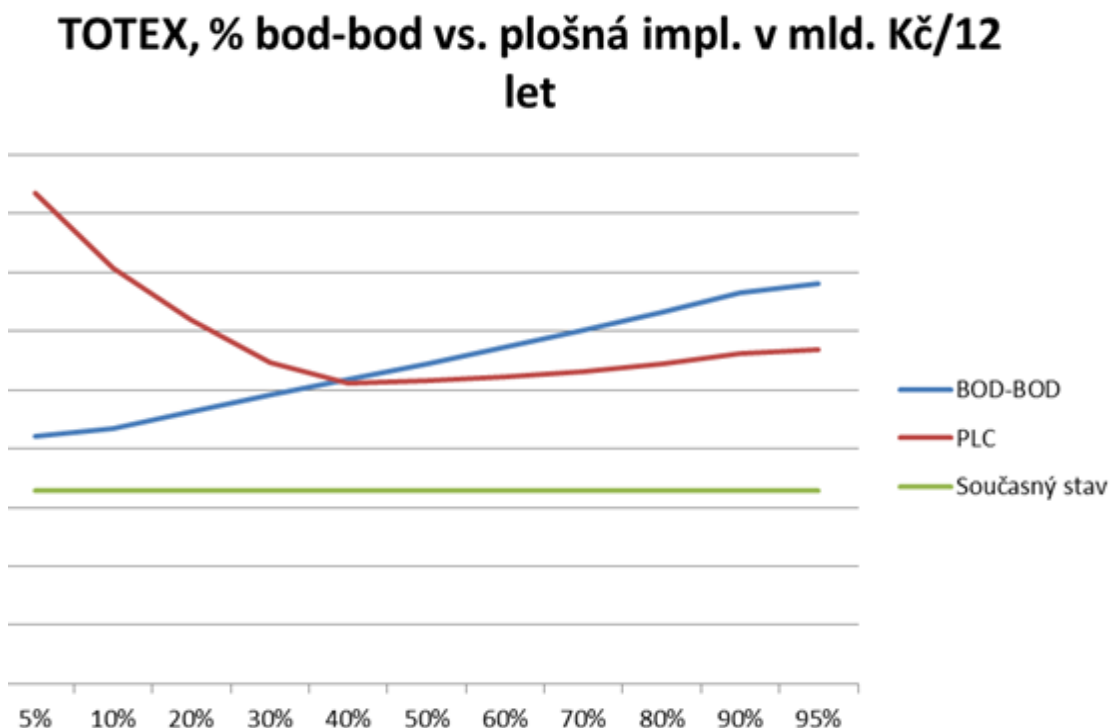
Naproti tomu stojí NB-LoT, jako zástupce bezdrátových technologií, jež ze strany distributora vyžaduje nízké CAPEX ve formě levných komunikačních modulů. Na druhou stranu NB-LoT neběží na infrastrukturu ve vlastnictví společnosti, s čímž jsou spojeny OPEX v podobě plateb operátorovi, které shrnuje Tab.7.

Důležitou otázkou, kterou je třeba si položit, je, jak velké území chceme technologií pokrýt. Koncepty, které jsem v práci popsal, předpokládají aktivní účast zákazníka (elektromobil, reakce

na poptávku, distribuované zdroje...). To přímo ukazuje spíše na rodinné domy a podobné významnější odběratele. Zákazník, jenž bydlí v malém bytě v panelovém domě nemá mnoho možností, jak se zapojit do konceptu SG. V jeho případě, si myslím, nemá vyspělá obousměrná komunikace smysl a vystačíme si se vzdálenými odečty.

Na základě logických úvah předpokládám, že jednotkové náklady na odběrné místo v případě implementace BPL by s rostoucím pokrytím klesaly. Naopak při využití NB-IoT, se domnívám, že jednotkové náklady budou při rostoucím objemu přibližně konstantní, respektive budou mírně klesat z důvodu větší zakázky, a tedy výhodnější nabídnuté ceny. S přihlédnutím na tyto úvahy by tedy měla existovat procentuální míra pokrytí odběratelů, od které by se z hlediska nákladů vyplatilo BPL více než NB-IoT.

Podobnou otázku si položili i v ČEZ Distribuce a.s., kde porovnávali celkové vynaložené náklady po dobu 12 let pro dvě technologie, a to jmenovitě PLC (zde BPL) a komunikaci bod-bod stavějící na CS (zde GPRS). Dílčím výsledkem jejich rozsáhlé a podrobné analýzy je níže uvedený graf, který mi byl v redukované podobě poskytnut.



Obr.25. Srovnání celkových nákladů pro PLC a CS

Na y-ové ose se nacházejí celkové náklady (CAPEX+OPEX), jejichž absolutní výše je citlivým údajem, a tudíž v grafu chybí. Na ose x-ové leží procentuální pokrytí odběratelů. Výklad průběhu křivek mi byl popsán tak, že pro nízké pokrytí BPL je zapotřebí velkého množství repeaterů;

s rostoucím pokrytím však přibývá počet aktivních SM, které se mohou zapojit do komunikace a převzít roli repeaterů. Ve výsledku tedy s větším pokrytím lze dosáhnout nižších celkových nákladů. Naproti tomu náklady na komunikaci založenou na CS rostou lineárně s rostoucím počtem zařízení. Současný stav vyjadřuje dnešní síť bez AMM (Advanced Metering Management).

Z grafického vyjádření tedy vyplývá, že od cca 40% pokrytí převáží vysoký OPEX u CS a více se vyplatí implementovat BPL s nízkými provozními náklady. To koresponduje s mými úvahami, které jsem nastínil výše v textu.

Nutno dodat, že výše uvedené se zakládá na tom, že obě technologie poskytnou ekvivalentní efekt. Což ale není pravda, jelikož BPL má, coby drátové řešení v plném vlastnictvím distributora, potenciál dosáhnout vyšší QoS, delší životnosti a nabízí lepší parametry kanálu. Tím pádem je nutné problematiku podrobně analyzovat a zvážit veškeré efekty.

Následující tabulka ukazuje, jaké technologie jsou již reálně instalovány v evropských zemích pro potřeby SM. Na první pohled je patrná dominance PLC ve spojení s CS. Můj výběr tedy skončil ve stejné množině technologií. Zatímco v Evropě využívají NBPLC, já se rozhodl pro implementaci BPL na základě očekávaných rostoucích budoucích nároků na komunikaci. Využívání CS lze přisoudit tomu, že NB-IoT je nová technologie, u které ještě v dané době neproběhl roll-out.

Tab. 9. Instalované technologie pro SM podle zemí⁴⁰

Country	Technology	Standard(s)/Specifications (If Available)
Italy	NB-PLC	Meters & More
Spain	NB-PLC	Meters & More, PRIME
France	NB-PLC	G3-PLC, IEC 61334-5-1
UK	NB-PLC, WAN	IEC 62056-21, Communication based on open standards (some cases)
Germany	PLC, GPRS	
Sweden	NB-PLC, GSM/GPRS	IEC 62056-21, IEC 14908 (some cases)
Greece	NB-PLC, GSM/GPRS	

⁴⁰ Převzato z: ANDREADOU, Nikoleta, GUARDIOLA, Miguel Olariaga, FULLI, Gianluca. Telecommunication Technologies for Smart Grid Projects with Focus on Smart Metering Applications [online]. Energy Security, Systems and Markets Unit, Institute of Energy and Transport, Joint Research Centre, Ispra 21027, Italy. May 2016. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1073/9/5/375/htm>

Závěrečné zhodnocení

V této práci se čtenář seznámil s rozvíjejícím se konceptem energetických sítí Smart grid a příklady komunikačních technologií, pomocí nichž budou naplňovány dané požadavky a funkce. Jak vyplývá z textu, velká část aplikací ve Smart grid vyžaduje pro svou funkci obousměrnou digitální komunikaci.

Pro bližší analýzu jsem zvolil komunikaci řešenou drátově: formou optického vlákna a PLC; i bezdrátově, tedy s využitím celulární sítí a užším výběrem z plejády IoT technologií. Práce shrnuje základní principy, technické parametry, výhody a nevýhody jednotlivých technologií, na jejichž základě lze, s využitím vstupních požadavků od zadavatele, provést užší výběr.

Na základě jednoduchého modelu, zahrnujícího náklady spojené s instalací optických kabelů, se potvrdilo, že pro last-mile implementaci je tažení optiky ke každému odběrnému místu finančně nezvládnutelné. Při srovnání celulárních sítí a NB-IoT argumenty hovořily pro druhé jmenované, jednak z důvodu vhodnějších vlastností, kterých bylo dosaženo vývojem na míru pro potřeby smart meteringu, jednak kvůli výrazně nižším nákladům spojených s provozem. Třetí analyzovanou bezdrátovou technologii, ZigBee, jsem vyhodnotil jako adepta smysluplnějšího pro potřeby sítí HAN. Naopak jako velmi příhodná technologie, pro last-mile komunikaci distributor-spotřebitel, se ukázalo PLC, které je v dané oblasti široce používáno v mnoha evropských zemích. Nicméně se využívá jeho úzkopásmová varianta, pro kterou jsem se já nerozhodl. Mně osobně se jeví jako vhodnější postavit komunikaci na širokopásmové BPL, která nabízí výrazně lepší parametry kanálu.

V závěru práce jsem se tedy zaměřil na ekonomické porovnání BPL a NB-IoT, z něhož vyplývá, že v případě nízkého pokrytí se více vyplatí implementovat NB-IoT z důvodu nízkého CAPEX. Při rostoucí míře pokrytí však dosáhneme bodu, kdy v celkových nákladech převáží vysoký OPEX u NB-IoT a naopak se vyplatí provést vyšší počáteční investici do BPL, jež se nám v dlouhodobém horizontu vrátí svým nízkým OPEX.

Reference

Tištěná literatura (knihy, skripta)

- [1] BORLASE, Stuart. *Smart grids: infrastructure, technology, and solutions*. Boca Raton: CRC Press, c2013. Electric power and energy engineering. str. 77-78. ISBN 978-1-4398-2905-9.
- [2] SHAWKAT ALI, A. B. M. *Smart grids: opportunities, developments, and trends*. London: Springer, c2013. Green energy and technology. str. 27 ISBN 978-1-4471-5209-5.
- [4] BUDKA, Kenneth C., Jayant G. DESHPANDE a Marina THOTTAN. *Communication networks for smart grids: making smart grid real*. London: Springer, c2014. Computer communications and networks, ISBN 978-1-4471-6301-5.
- [5] EKANAYAKE, J. B. *Smart grid: technology and applications*. Chichester: Wiley, 2012. ISBN 978-0-470-97409-104.
- [6] MOMOH, James A. *Smart grid: fundamentals of design and analysis*. Hoboken: Wiley, c2012. IEEE Press series on power engineering. ISBN 978-0-470-88939-8.
- [7] CVIJETIC, Milorad. *Optical transmission systems engineering*. Boston: Artech House, c2004. Artech House optoelectronics library. ISBN 1-58053-636-0.
- [8] VOŽENÍLEK, Petr, Vladimír NOVOTNÝ a Pavel MINDL. *Elektromechanické měniče*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 9788001031377.
- [10] MARTIN, James, LEBEN, Joe. *TCP/IP Networking: Architecture, Administration, and Programming*. PTR Prentice Hall, Inc., 1994. ISBN 0-13-642232-2.
- [25] SHAWKAT ALI, A. B. M. *Smart grids: opportunities, developments, and trends*. London: Springer, c2013. Green energy and technology. ISBN 978-1-4471-5209-5.
- [39] STAVROULAKIS, Peter. *Interference analysis and reduction*. Boston-London: Artech House, 2003. ISBN 1-580053-316-7.

Internetové zdroje (odborné články)

- [3] MOSLEHI, Khosrow, KUMAR, Ranjit. A Reliability Perspective of the Smart Grid. IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL. 1, NO. 1, JUNE 2010. ISBN 978-1-4244-6266-7.
- [9] LV, Pin, WANG, Xudong, YANG, Yang, XU, Ming. Network Virtualization for Smart Grid Communications. IEEE SYSTEMS JOURNAL, VOL. 8, NO. 2, JUNE 2014. ISSN 1937-9234
- [11] SALEEM, Yasir, CRESPI, Noel, REHMANI, Mubashir Husain, COPELAND, Rebecca. Internet of Things-aided Smart Grid: Technologies, Architectures, Applications, Prototypes, and Future Research Directions [online]
- [12] GALLI, Steffano, SCAGLIONE, Anna, WANG, Zhifang. For the grid and through the grid: The role of Power line Communications in the Smart grid [online]. ISSN 1558-2256 Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5768099/>
- [13] BERGER, Lars Torsten, SCHWAGER, Andreas, ESCUDERO-GARZÁS, J. Joaquín. Power Line Communications for Smart Grid Applications [online]. Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 2013, Article ID 712376, 16 pages, 2013. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/jece/2013/712376/>
- [14] MAINARDI, Elena, BONFÉ, Marcello. Powerline communication in Home-building automation systems [online]. INTECH Open Access Publisher, 2008. ISBN 978-953-7619-13-8 Dostupné z: <http://cdn.intechopen.com/pdfs/5558.pdf>
- [15] Cisco systems. Fiber Types in Gigabit Optical Communications [online]. Dostupné z: https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/interfaces-modules/transceiver-modules/white_paper_c11-463661.pdf
- [16] FEL ČVUT. Páteří bezdrátové sítě (WWAN) [online]. Dostupné z: <http://techpedia.fel.cvut.cz/html/frame.php?oid=50&pid=1007&finf=>
- [17] BRUNNER, Eberhard. Cellular Communications Tutorial [online]. Wireless communications tutorial, Munich, 2000. Dostupné z: <http://ee.sharif.edu/~rfic-AliF/Notes/Mobile%20Comms%20%28upto%202G%29.pdf>
- [18] MEDINA, Veronica, GOMEZ, Isabel, OVIEDO, David, DORRONZORO, Enrique, MARTIN, Sergio, BENJUMEA, Jaime, SANCHEZ, Gemma. IEC-60870-5 application layer over TCP/IP for an Open and Flexible Remote Unit [online]. Departamento de Tecnologia Electronica, Universidad de Sevilla, July 2009. Dostupné z: <http://matrix.dte.us.es/grupotais/images/articulos/mpi082.pdf>

- [19] <https://www.t-mobile.cz/podpora/mapa-pokryti>
- [20] SINHA, Rashmi Sharan, YIQIAO, Wei, HWANG, Seung-Hoon. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT [online]. Division of Electronics and Electrical Engineering, Dongguk University-Seoul, Republic of Korea. March 2017. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517300061>
- [21] Ericsson. NB-IoT: A sustainable technology for connecting billions of devices [online]. Ericsson technology review, Volume 93, March 2016. ISSN 0014-0171. Dostupné z: <https://www.ericsson.com/en/ericsson-technology-review/archive/2016/nb-iot-a-sustainable-technology-for-connecting-billions-of-devices>
- [22] LoRa Alliance. LoRaWAN What is it [online]. Technical Marketing Workgroup 1.0, Nov., 2015. Dostupné z: <https://www.lora-alliance.org/portals/0/documents/whitepapers/LoRaWAN101.pdf>
- [23] KOTON, Jaroslav, ČÍKA, Petr, KŘIVÁNEK, Vítězslav. Standard nízkorychlostní bezdrátové komunikace ZigBee [online]. Vysoké učení technické v Brně, duben 2006. Dostupné z: <http://access.fel.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2006032001>
- [24] ZigBee Alliance. ZigBee: Securing the Wireless IoT [online]. Dostupné z: <http://www.zigbee.org/download/new-white-paper-zigbee-securing-the-wireless-iot/>
- [26] European Commission. *Smart grid Projects of Common Interest* [online]. [cit. 18.11.2017]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/energy/en/smart-grid-projects-common-interest>
- [27] European Commission. *Smart grids and meters* [online]. [cit. 18.11.2017]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/markets-and-consumers/smart-grids-and-meters>
- [28] U.S. Department of Energy. Smart grid system report [online]. July 2009. [cit. 18.11.2017]. Dostupné z: https://www.smartgrid.gov/files/systems_report.pdf
- [29] Telecom ABC. Cellular network [online]. Dostupné z: <http://www.telecomabc.com/c/cellular.html>
- [30] SmartSynch. Cellular: The future of the Smart grid [online]. Dostupné z: <http://www.pointview.com/data/files/3/2656/1844.pdf>
- [31] DLMS User Association. DLMS/COSEM Architecture and Procols [online]. February 2007. Dostupné z: http://dlms.com/documents/archive/Excerpt_GB6.pdf
- [32] DE CRAEMER, Klaas, DECONINCK, Geert. Analysis of state-of-the-art smart metering communication standards [online]. Leuven University. Dostupné z: <https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/265822/1/Smar>
- [33] IEC 61850-5: Communication networks and systems for power utility automation-Part5: Communication requirements for functions and device models
- [34] SALAZAR, Jordi, SILVESTRE, Santiago. Internet věcí. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2017. ISBN 978-80-01-06231-9. Dostupné z: <http://techpedia.fel.cvut.cz/download/?fileId=806&objectId=110>
- [35] RINALDI, Stefano, FERRARI, Paolo, LODA, Matteo. Synchronizing low-cost probes for IEC61850 Transfer time estimation [online]. University of Brescia, Italy, September 2016. Dostupné z: https://www.unibs.it/sites/default/files/ricerca/allegati/IEEE_IPSCS_2016_Rinaldi.pdf
- [36] ANDREADOU, Nikoleta, GUARDIOLA, Miguel Olariaga, FULLI, Gianluca. Telecommunication Technologies for Smart Grid Projects with Focus on Smart Metering Applications [online]. Energy Security, Systems and Markets Unit, Institute of Energy and Transport, Joint Research Centre, Ispra 21027, Italy. May 2016. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1073/9/5/375/htm>
- [37] MISKOVIC, Ed. Multimode vs. Singlemode – Fiber Bandwidth [online]. SCN Magazine, January 2009. Dostupné z: [http://www.meridian-tech.com/downloads/articles/Fiber%20Bandwidth%20\(MM%20vs.%20SM\).pdf](http://www.meridian-tech.com/downloads/articles/Fiber%20Bandwidth%20(MM%20vs.%20SM).pdf)
- [38] BUMBÁLEK, Zdeněk. Modulační techniky v moderních bezdrátových sítích [online]. České vysoké učení technické v Praze, FEL, únor 2010. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2010020004>