

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vliv vnějšího prostředí na parametry mikrovlnných
antén**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr MORONG**
Osobní číslo: **E17N0018P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Vliv vnějšího prostředí na parametry mikrovlnných antén**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište historický vývoj mikrovlnných spojů a antén.
2. Analyzujte současný stav trhu v ČR s ohledem na odolnost antén vůči vnějším vlivům.
3. Porovnejte a změřte vlastnosti dostupných vf antén.
4. Proveďte měření vlivu vnějšího prostředí na parametry antén.
5. Proveďte zhodnocení získaných parametrů antén.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Dobeš, J. - Žalud, V.: Moderní radiotechnika. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. 768 s. ISBN 80-7300-132-2
2. Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce

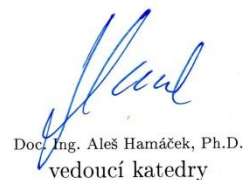
Vedoucí diplomové práce: Ing. et Ing. Petr Kašpar, Ph.D.
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 5. října 2018

Termín odevzdání diplomové práce: 30. května 2019


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zaměřuje na měření parametrů mikrovlnných antén v pásmu 868 MHz s ohledem na vliv vnějšího prostředí. Práce je rozdělena na pět kapitol. V první kapitole je popsán historický vývoj mikrovlnných antén a současné IoT technologie. Druhá kapitola je zaměřena na materiály antén a trh antén v pásmu 868 MHz. Třetí kapitola se věnuje parametrům antén a měřením parametrů antén. Ve čtvrté kapitole jsou popsány klimatické zkoušky. Pátá kapitola se věnuje zhodnocení získaných výsledků.

Klíčová slova

Antény, mikrovlnné antény, parametry antén, měření parametrů antén, klimatické zkoušky

Abstract

This diploma thesis focuses on the measurement of parameters of microwave antennas in the 868 MHz band with respect to the influence of the external environment. The thesis contains five chapters. The first chapter focuses on the historical development of microwave antennas and IoT technologies. The second chapter deals with antenna materials and antenna market in the 868 MHz band. The third chapter focuses on antennas parameters and measurement of antennas parameters. The fourth chapter presents the climatic tests. The fifth chapter is devoted to the evaluation of the measured results.

Key words

Antennas, microwave antennas, parameters of antennas, climatic tests, measurement of antennas

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 28.5.2019

Petr Morong

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. et Ing. Petru Kašparovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky, metodické vedení práce a poskytnutí antén. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Janu Mrázovi, Ph.D. za pomoc při měření antén, cenné rady a strávený čas při měření antén v komoře. Nakonec bych chtěl poděkovat Ing. Martinovi Hirmanovi Ph.D. za pomoc při klimatických zkouškách.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 VÝVOJ MIKROVLNNÝCH SPOJŮ A ANTÉN.....	13
1.1 HISTORIE BEZDRÁTOVÉHO PŘENOSU	13
1.2 MIKROVLNNÁ TECHNIKA.....	17
1.2.1 Radioreléové spoje	18
1.2.2 Historie mikrovlnných antén	19
1.3 SÍŤOVÉ TECHNOLOGIE PRO INTERNET VĚCÍ	21
1.3.1 LoRa.....	23
1.3.2 SigFox.....	25
1.3.3 IQRF	27
2 SOUČASNÝ STAV TRHU ANTÉN	29
2.1 ROZDĚLENÍ A DRUHY ANTÉN.....	29
2.2 MATERIÁLY ANTÉN.....	31
2.3 VÝROBCI ANTÉN	32
2.4 NABÍDKA PRUTOVÝCH ANTÉN 868 MHz NA TRHU	33
3 MĚŘENÍ PARAMETRŮ MIKROVLNNÝCH ANTÉN	35
3.1 PARAMETRY MIKROVLNNÝCH ANTÉN.....	35
3.2 VZORKY MĚŘENÝCH ANTÉN	40
3.3 VYBAVENÍ ELEKTROTECHNICKÉ LABORATOŘE	42
3.3.1 Bezodrazová komora – Frankonia SAC - 3.....	42
3.3.2 Vektorový obvodový analyzátor.....	44
3.4 POSTUPY MĚŘENÍ PARAMETRŮ MIKROVLNNÝCH ANTÉN.....	44
3.4.1 Měření činitele stojatých vlny.....	45

3.4.2	Měření zisku.....	46
3.4.3	Měření směrových charakteristik	47
4	ZKOUŠKY V KLIMATICKÉ KOMOŘE	49
4.1	LABORATOŘ KLIMATICKÝCH ZKOUŠEK	49
4.2	PROVEDENÉ KLIMATICKÉ ZKOUŠKY	49
4.2.1	Zkouška dle ČSN EN ČSN EN 60068-2-30 ed. 2.....	50
4.2.2	Zkouška dle ČSN EN ČSN EN 60068-2-14 ed. 2.....	52
5	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	54
5.1	VLIV KLIMATICKÝCH ZKOUŠEK NA MATERIÁL ANTÉN.....	54
5.2	POROVNÁNÍ ČSV	55
5.3	POROVNÁNÍ ZISKU	55
5.4	POROVNÁNÍ SMĚROVÝCH CHARAKTERISTIK	56
ZÁVĚR .....	.....	57
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....	.....	58
SEZNAM PŘÍLOH .....	.....	64

Úvod

Pro přenos informací se používají různé technologie. Informaci můžeme přenést několika způsoby. Abychom mohli komunikovat s člověkem, posílat různá data na vzdálenosti několika tisíc kilometrů, můžeme využít bezdrátový přenos informace. V dnešní době se velmi často hovoří o Internetu věcí. Internet věcí je síť propojených zařízení, které mezi sebou navzájem komunikují a posílají si mezi sebou data. Jsou vytvořeny různé technologie pro přenos těchto dat. Součástí těchto technologií je i přijímání a odesílání radiového signálu. Anténa je zařízení, které umožňuje příjem a vysílání radiového signálu. Antény se nacházejí v různých klimatických podmínkách o různé teplotě a vlhkosti. Tyto různé klimatické podmínky mohou ovlivnit parametry mikrovlnných antén.

Cílem diplomové práce je nejdříve seznámit čtenáře s historickým vývojem mikrovlnných antén. Poté provést průzkum na trhu antén pracujících na frekvencích 868 MHz. Dále změřit parametry mikrovlnných antén a následně na nich provést klimatické zkoušky s ohledem na klimatické podmínky v České republice a zhodnotit naměřené výsledky.

Práce je rozdělena do pěti kapitol. V první kapitole je popsán vývoj mikrovlnných spojů a antén. Dále se kapitola věnuje technologiím pro Internet věcí. Druhá kapitola je věnována průzkumu trhu antén pracujících na frekvenci 868 MHz. Třetí kapitola se zaměřuje na parametry mikrovlnných antén s jejich měřením. Ve čtvrté kapitole jsou popsány klimatické zkoušky na měřených anténách. Pátá kapitola porovnává naměřené parametry mikrovlnných antén před klimatickými zkouškami s parametry antén po klimatických zkouškách.

Seznam symbolů a zkratek

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren (plastový materiál)
BBC	Britská rozhlasová společnost
Bluetooth	Standard pro bezdrátovou komunikaci
CSS	Modulace s rozprostřeným spektrem
ČSN	Česká technická norma
ČSV (SWR)	Činitel stojatých vln [-]
ČTU	Český telekomunikační úřad
DBPSK	Klíčování fázovým posuvem
DPA	Komunikační protokol pro technologie IQRF
EHF	Radioreléové spoje
GSM	Standard pro mobilní síť
HF	Krátké vlny
IoT	Internet věcí
IQRF	Bezdrátová technologie pro přenos informací
ISM	Veřejné bezlicenční radiové pásmo
ITU	Mezinárodní telekomunikační unie
LF	Dlouhé vlny
LoRa	Bezdrátová technologie pro přenos informací
LoRaWAN	Síťový protokol pro technologii LoRa
LPWAN	Nízkoenergetická síť pro rozsáhlé území

LTE	.....	Technologie určená pro vysokorychlostní internet
MF	.....	Střední vlny
EHF	.....	Radioreléové spoje
PE	.....	Polyethylen
PP	.....	Polypropylen
PTTE	.....	Polytetrafluorethylen
RH	.....	Relativní vlhkost [%]
RR	.....	Radioreléové spoje
SHF	.....	Super krátké vlny
SigFox	.....	Bezdrátová technologie pro přenos informací
UHF	.....	Ultra krátké vlny
ULF	.....	Extrémně dlouhé vlny
VHF	.....	Velmi krátké vlny
VLF	.....	Velmi dlouhé vlny
Wi - Fi	.....	Řada standardů IEEE 802.11 popisujících bezdrátovou komunikaci

1 Vývoj mikrovlnných spojů a antén

Kapitola je zaměřena na historické milníky bezdrátové komunikace od teoretických poznatků o elektromagnetických vlnách J. C. Maxwella, pokusy Hertze až po moderní bezdrátové komunikace. Dále je zde uveden vývoj mikrovlnných antén, který nedílně souvisí s vývojem bezdrátové přenosu. Poslední část kapitoly je věnována bezdrátovým síťovým technologiím pro Internet věcí. Jsou zde zmíněny především technologie pracujících na LPWAN sítích.

1.1 Historie bezdrátového přenosu

Za počátek radiotechniky [2] by se dal považovat konec devatenáctého století. Objevem nových vynálezů se začalo komunikovat na dlouhé vzdálenosti. Technika se neustále zlepšovala. Nové vynálezy umožnily bezdrátovou komunikaci. Bezdrátový přenos informace se zakládá na působení elektromagnetických vln. Vývoj radiotechniky souvisel rozvojem bezdrátového přenosu signálu a umožnil vznik nových způsobů sdělování informací. S tím souviselo vytváření a ovlivňování veřejného mínění, pomocí rádia, televize a později internetu.

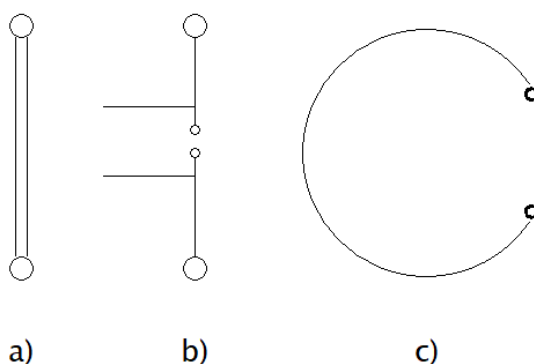
Před koncem devatenáctého století, již prováděla pokusy řada objevitelů a vynálezců. Jejichž pokusy dokazovaly existenci elektrického a magnetického pole, na kterých jsou postaveny základní kameny pro radiotechniku. Radiokomunikace využívá k přenosu informací vzduchem radiové vlny, tedy část spektra elektromagnetických vln přibližně do 300 GHz. Rádiové vlny jsou velmi vhodné médium pro přenos informací. Za posledních 200 let se komunikace prostřednictvím elektromagnetických vln velice rozšířila.

Na vývoji bezdrátového přenosu se určitě podílel skotský fyzik **James Clerk Maxwell** (1831-1879), který jako první definoval matematiky elektrické a magnetické pole. Maxwell ke svým objevům v oblasti elektřiny a magnetismu, dosáhl především v letech 1855-73. Maxwell své matematické modely o elektromagnetických jevech formuloval na základě Faradayových představ a experimentech o elektromagnetickém poli. Prvním významným Maxwellovým článkem o teorii elektromagnetického pole se nazýval „O Faradayových siločárách“, který Maxwell napsal v roce 1855. V roce 1864 vyšla Maxwellova práce „Dynamická teorie elektromagnetického pole“. Celou svoji teorii Maxwell popsal ve svém slavném díle „A Treatise on Electricity and Magnetism“ (Pojednání o elektřině a magnetismu). Podle Maxwella jsou pojmenovány čtyři základní

rovnice, které definují elektrické a magnetické pole [2]. Tato teorie tvoří teoretický základ pro elektrotechniku i radiotechniku a mnoho dalších disciplín z oblasti fyziky.

Maxwell podle své teorie o elektromagnetickém poli dokázal, že elektromagnetický rozruch se šíří rychlostí světla od místa k místu. Dále Maxwell předpověděl existenci elektromagnetických vln, jako fyzikální reality. Tyto teoretické poznatky o existenci elektromagnetických vln potvrdil experimentálně Němec **Heinrich Hertz** (1857-1894). Zjistil, že se elektromagnetické vlny šíří rychlostí světla, mohou se lámat, odrážet se a polarizovat se jako světlo. Tento objev byl počátkem rozvoje bezdrátové telegrafie a později i radiotechniky.

Hertz ve svém pokusu poprvé sestrojil kmitavý otevřený obvod, kde použil dvě kovové, navzájem izolované tyče, umístěné na společné ose a na jejichž koncích byly umístěny kovové kuličky. Zařízení se nazývá Hertzův oscilátor nebo také Hertzův dipól obr. 1.1.1a. Hertzův dipól se rozkmitá, přivedeme-li na elektrody náboj, je to provedené pomocí jiskřiště obr. 1.1.1b, které je připojené na napětí. Přeskakující jiskry na jiskřišti rozkmitají oscilátor, vyzařující do okolí elektromagnetické vlny. Elektromagnetické vlny Hertz objevil za pomoci rezonátoru obr. 1.1.1c. Rezonátor byl z měděného drátu, který měl podobu kruhového závitu. Na obou koncích drátu byla malá jiskřiště. Jiskra na rezonátoru byla velmi slabá, šlo jí pozorovat jen v zatemněné místnosti. Na počest je po něm pojmenována jednotka frekvence (kmitočtu) hertz - Hz.



Obr. 1.1.1 Hertzovy pokusy [7]: a) Hertzův dipól, b) Hertzův dipól s jiskřištěm c) rezonátor

Další z objevitelů, který přispěl do historie radiotechniky, byl francouzský profesor fyziky **Eduard Branly** (1844 – 1940), který se proslavil sestrojením kohereru obr. 1.1.2. Koherer byl nástupcem Hertzova rezonátoru. Koherer je zařízení detekující elektromagnetické vlny a byl použitelný na zachycování signálu na delší vzdálenosti.

Koherer je složen ze skleněné trubičky. V této trubičce jsou umístěny dva kovové válečky a mezi těmito válečkami jsou piliny ze směsi niklu a stříbra. Jestliže je koherer vystaven působení elektromagnetických vln, odpor kohereru se sníží a tím pádem jím začne procházet proud [7].



Obr. 1.1.2 Obr. Koherer (převzato[7])

Ruský vynálezce **Alexander Stěpanovič Popov** (1859–1906) vycházel z teoretických poznatků Maxwella, také se seznámil s Hertzovými pokusy a experimentoval s kohererem od Branlyho. Popov sestrojil zařízení skládající se z vysílače elektromagnetických vln a přijímače. Vysílací zařízení bylo velice podobné, jako vynálezy předchozích objevitelů. Vysílač byl tvořen induktorem s jiskřištěm, kde vznikaly při výbojích tlumené kmity elektrického pole, kolem něhož vznikalo elektromagnetické pole. Jako přijímač k detekci elektromagnetických vln byl použit koherer s vyplněnými kovovými pilinami. Popov koherer zlepšil paličkou, která na příjmu elektromagnetických vln uhodila do zvonku, ale také do trubičky s kovovými pilinami. Z toho se odpor kohereru zvětšil a tím jej připravila k přijímání dalšího signálu.

V roce 1895 Popov vytvořil indikátor blesků, který upravil, na základě svých dřívějších pokusů. Tím, že místo zvonku použil zapisovač a použitím hromosvodu sloužící jako anténa pro přijímač. O rok později se Popovovi povedlo bezdrátově přenést signál mezi budovami na 250 metrů pomocí Morseových značek. Později se svým vynálezem přenášel signál mezi loděmi na moři na desítky kilometrů.

Italskému fyzikovi Guglielmovi Marconimu (1874-1937) se je jako prvnímu povedlo bezdrátově spojit Evropu s Amerikou. Bylo to 12. prosince 1901 [2,7]. Marconi uslyšel signál série tří teček písmene „S“, který byl poslán z Anglie z města Poldhu (Cromwall) do přijímací stanice v kanadském městě St. John. Marconi vycházel při svých pokusech

z Maxwellovy teorie. Marconiho zařízení na přijímací straně bylo skoro totožné se zařízením Popova. Akorát vysílač byl zdokonalen jiskřičkou připojením jednoho pólu na zem a druhého na anténu. Tím bylo možné přijímat signály ve větší vzdálenosti od vysílače.

Nesmíme také zapomenout na elektrotechnika Nikola Teslu (1856-1943). Ačkoliv bezdrátový přenos informace, nebyl Teslův hlavní obor, podílel se na vývoji bezdrátového přenosu. Tesla usiloval o bezdrátový přenos energie. Podle některých informací mohl Tesla používat vysílač elektromagnetických vln dříve než Marconi. Tesla se rozhodl v roce 1900 vystavit velké vysílací zařízení „světovou stanici“ v blízkosti New Yorku, která byla nazvána Wardenclyff. Marconi v této době, již dosahoval úspěchů v přenosu telegramů mezi Evropou a Amerikou. Bohužel výstavba stanice byla zastavena, kvůli nedostatku financí Tesly. Stanice měla hlavně sloužit k bezdrátovému přenosu elektrické energie.

K rozvoji radiotechniky na počátku dvacátého století přispěl Slovák Josef Murgaš (1863-1929). Murgaš se v roce 1896 přestěhoval do Ameriky, kde se začal zabývat radiotechnikou. V roce 1904 vybudoval vysílací a přijímací stanici s anténou, která byla vysoká 60 metrů. V rozmezí let 1903 až 1911 mu bylo uděleno 12 patentů z oblasti radiotechniky. Jeden z neznámějších vynálezů Murgaše je tzv. tónový systém telegrafie. Princip byl založen na tom, že Murgaš místo teček a čárek použil pouze tečky o různé výšce tónu, tedy o jiném kmitočtu. Zkrátil se čas k odeslání zprávy. Tento vynález byl považován za počátek použití kmitočtové modulace přenášeného signálu. Murgaš se soudil s Marconim o své vynálezy. Murgaš sice soudní spory vyhrál, ale patenty platily jenom na území státu Washington.

Další výzvou v oblasti radiotechniky byl bezdrátový přenos hlasu. První úspěšný přenos mluveného slova pomocí nosné vlny generovaného alternátorem provedl roku 1906 na vzdálenost 40 kilometrů R. Fessenden. Po první světové válce byl přenos hlasu a hudby na takové úrovni, že se začalo s pravidelným vysíláním pro veřejnost pomocí rozhlasu. První pravidelné vysílání pro veřejnost bylo zavedeno v Pittsburgu ve Spojených státech amerických v roce 1920 a Evropě ve stejném roce začala Marconiho stanice pokusně vysílat rozhlasový program. V roce 1922 vznikla známá Britská rozhlasová společnost BBC.

Po bezdrátovém přenosu zvuku, byl na řadě přenos obrazu. Průkopníkem pro přenos

pohyblivého obrazu byl Angličan Baird. V roce 1927 se mu podařil přenos pohyblivého obrazu na 20 kilometrů. O rok později Baird dokázal vysílat přenos obrazu přes oceán do Severní Ameriky. Nejednalo se však o kvalitní obraz. Velikost obrazu byla 50 x 70 mm, který byl rozložen do 30 řádků. Kvalita obrazu se neustále zlepšovala až do podoby dnešního digitálního vysílání.

Dalším milníkem pro bezdrátový přenos jsou celulární sítě. V roce 1947 představili D. H. Ring a W. R. Young první článek popisující mobilní celulární síť. Celulární síť je plocha pokrytá signálem a je rozdělena na malé oblasti buňky, které jsou pokryty překrývajícím se signálem základnových stanic. V průběhu 50. a 60. let se hodně telekomunikačních společností zaměřovalo na vývoj celulárních sítí. V roce 1978 byla spuštěna první celulární síť pro komerční využití v Bahrajnu. Jednalo se o malou celulární síť, určenou pro královskou rodinu, ale dostupnou i pro obyvatele Bahrajnu. V roce 1983 ve Spojených státech amerických v Chicagu byla spuštěna celulární síť pro komerční využití pracující na frekvenci 800 MHz. V Evropě již existovalo také mnoho těchto sítí pro mobilní komunikace. Z toho důvodu se v roce 1982 Evropská komise pro poštu a telekomunikaci rozhodla spustit projekt Groupe Spéciale Mobile (GSM) s cílem vyvinout celoevropskou mobilní síť na frekvenci 900 MHz. V roce 1991 byl vydán standard pro mobilní komunikaci GSM. K prvnímu spuštění GSM sítí došlo roku 1992 v Dánsku, Finsku, Francii, Německu, Itálii Portugalsku a Švédsku. GSM se rychle rozvíjelo a na konci roku 1993 bylo již v sítích GSM milión zákazníků [38].

V současnosti se můžeme setkat s mnoha technologiemi pro bezdrátový přenos informací a dat, například GSM, Bluetooth, Wi-Fi, LTE a technologie pro Internet věcí.

V této kapitole je čerpáno z informačních zdrojů [2,3,6,7].

1.2 Mikrovlnná technika

Mikrovlny jsou elektromagnetické vlny, které se přibližně nachází ve frekvenčním pásmu od 300 MHz do 300 GHz [8]. Jejich vlnová délka se pohybuje od 1 metru až do 1 milimetru. Tedy nacházíme se v rozmezí ultra krátkých vln UHF, super krátkých vln SHF a extrémně krátkých vln EHF. Tato diplomová práce se zabývá anténami, které pracují ve frekvenčním pásmu 868 MHz [6]. Elektromagnetické vlny se šíří z bodového zdroje do všech směrů a vytváří kulovou vlnoplochu. Na větší vzdálenosti lze kulovou vlnoplochu

aproximovat rovinou. Elektromagnetické vlny jsou následně příčné vlnění bez podélné složky. Elektrické pole a magnetické pole mají jenom složky kolmé ke směru šíření. Elektromagnetické vlnění se nazývá transverzální.

Pro lepší zařazení oblasti frekvenčního pásma mikrovlnné techniky, je zde uvedeno rozdělení frekvenčního spektra do jednotlivých frekvenčních pásem tab. 1.2.1. V tabulce nejsou uvedeny pásma s frekvencí nižší než 300 Hz.

V České republice je výkonným regulačním orgánem pro nakládání s frekvenčním pásmem Český telekomunikační úřad (ČTÚ). ČTÚ respektuje pravidla Mezinárodní telekomunikační unie (ITU), které jsou pro ČTÚ závazná [5].

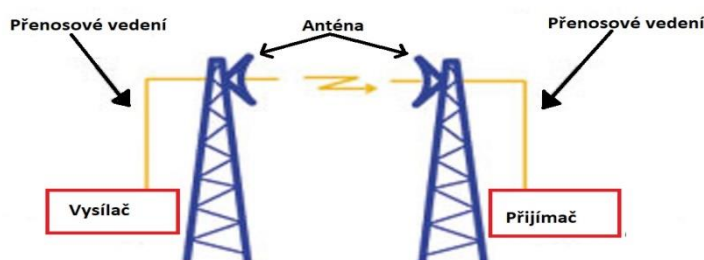
Tab. 1.2.1 Označení frekvenčních pásem pro radiový přenos dle ČSN IEC 60050-713 [5]

Číslo pásma	Mezinárodní zkratka	Frekvence	Vlnová délka	Český ekvivalent
3	ULF	300 Hz až 3 kHz	1000 km až 100 km	EDV, extrémně dlouhé vlny
4	VLF	3 kHz až 30 kHz	100 km až 10 km	VDV, velmi dlouhé vlny
5	LF	30 kHz až 300 kHz	10 km až 1 km	DV, dlouhé vlny
6	MF	300 kHz až 3 MHz	1 km až 100 m	SV, střední vlny
7	HF	3 MHz až 30 MHz	100 m až 10 m	KV, krátké vlny
8	VHF	30 MHz až 300 MHz	10 m až 1 m	VKV, velmi krátké vlny
9	UHF	300 MHz až 3 GHz	1 m až 10 cm	UKV, ultra krátké vlny
10	SHF	3 GHz až 30 GHz	10 cm až 1 cm	SKV, super krátké vlny
11	EHF	30 GHz až 300 GHz	1 cm až 1 mm	EKV, extrémně krátké vlny

1.2.1 Radioreléové spoje

Za digitální mikrovlnou komunikaci se označují komunikace, které pomocí mikrovln přenáší digitální informaci prostorem. Tyto mikrovlny mají přímý směr a málo se ohýbají. Při vysílání signálu musejí být jednotlivé spolupracující stanice v optickém dohledu. A při větších vzdálenostech se mezi spoje musí zařazovat mezistanice. Spoj je následně označován jako mikrovlnný nebo radioreleový spoj. Jednoduchý jednosměrný

mikrovlnný spoj je složen z vysílače, přijímače, přenosové vedení a antény obr. 1.2.1 [8,43].



Obr. 1.2.1 Zjednodušené vykreslení mikrovlnného spoje mezi dvěma místy [43]

Radioreléové (RR) [41,42] spoje jsou zařízení umožňující bezdrátový přenos elektrických analogových nebo digitálních signálů mezi dvěma body na vzdálenosti několika desítek kilometrů. RR spoje se můžou využívat jako náhrada klasického metalického nebo optického vedení, kde by byla realizace kabelového vedení velice obtížná a nákladná. Rádiová trasa je tvořena několika spoji sériově řazených za sebou. RR spoje jsou především založeny na zákonitosti šíření elektromagnetických vln v decimetrovém, centimetrovém a milimetrovém pásmu vlnových délek. Tyto vlnové délky dokáží soustředit vysokofrekvenční energii do úzkých vyzařovacích svazků za pomoci směrových antén. RR spoje jsou tvořeny obvykle více úseky. RR spoje dokáží zajistit spojení na krátké, střední i velké vzdálenosti až na několik desítek kilometrů. RR spoje se v druhé polovině 20 let využívaly spolu se systémy nosné telefonie pro bezdrátový přenos telefonních hovorů, pro přenos televizního a rozhlasového signálu. V dnešní době se využívají digitální mikrovlnné systémy pro telekomunikace a datovou komunikaci [44].

1.2.2 Historie mikrovlnných antén

Obecně anténa je zařízení, které přijímá nebo vysílá rádiový signál pomocí elektromagnetických vln. Má tedy funkci přijímací nebo odesílací. Elektromagnetické vlny vyzařuje každý vodič, kterým prochází střídavý proud. Mikrovlnné antény mají vlnovou délku elektromagnetické vlny od 1 metru až do 1 milimetru [8].

Na vývoji mikrovlnných antén a antén obecně má vliv postupný historický vývoj bezdrátového přenosu, který je zmíněn v předešlé podkapitole. T. A. Edison zjistil, že vyzařování elektromagnetických vln do dálky má za následek zakmitnutí při klíčování Edison poznatek využil a v roce 1885 si nechal patentovat sdělovací systém, který byl

tvořený svislými unipólovými anténami.

Hertz v roce 1887 začal přijímat a vysílat elektromagnetické vlny. Vysílací zařízení byl dipól. Dipól je anténa složená z měděného vodiče, na jehož konci jsou kovové koule. Anténa je buzena v mezeře uprostřed jiskrovým výbojem. Anténa je známá taky pod jménem Hertzův elementární dipól. Přijímací zařízení bylo tvořeno obdélníkovou cívkou s jedním závitem. Další významnou anténou je Marconiho anténa z roku 1895, která je založena na Hertzově dipólu. Rozdíl je v tom, že jedna svorka je uzemněná a druhá spojená s anténou. Jedná se o aktivní čtvrtvlnný vodič umístěný vertikálně nad zemským povrchem.

Dalším pokrokem ve vývoji antén byl dvoukuželový dipól, který si nechal patentovat roku 1897 Oliver Lodge. V roce 1906 se pomocí dlouhohrátové antény Marconimu podařilo realizovat anténu se směrovými účinky, která předcházela Beverageově anténě z roku 1920 [40], V-anténě a kosočtverečné anténě z roku 1931. Přínosem pro komunikaci na krátkých vlnách je Franklinova anténa, složená ze soustavy sériově zapojených půlvlnných dipólů. Velice známá je směrová anténa Yagi-Uda z roku 1926.

Postupem doby bylo využíváno stále kratších vlnových délek. V roce 1931 poprvé byl využit mikrovlnný spoj mezi Anglií a Francií o vlnové délce osmnácti centimetrů s použitím parabolických antén o průměru tři metry. Dalším důležitým objevem byly šterbinové antény. Druhá světová válka velice urychlila přechod na decimetrové a centimetrové vlny zejména v souvislosti s radiolokační technikou. Po sestrojení výkonového magnetronu v roce 1940 nastal rychlý vývoj různých reflektorových, šterbinových, čočkových a dielektrických antén s podélným vyzařováním.

Následně v padesátých letech vznikla skupina širokopásmových antén. Dále vznikaly antény se zpětným zářením, které se se svými směrovými vlastnosti, spadají do skupiny reflektorových parabolických antén a směrových Yagiho antén. V šedesátých letech se začaly objevovat první aktivní (elektronické) přijímací antény s relativně vysokou citlivostí s malými rozměry.

Další vývoj antén souvisel s vývojem vysílání televize, datových přenosů, mobilních sítí a nových bezdrátových technologií pro Internet věci.

V podkapitole je čerpáno z informačních zdrojů [1, 39, 41].

1.3 Síťové technologie pro Internet věcí

Internet věcí jinak také IoT si lze představit jako síť vzájemně propojených zařízení obr. 1.3.1, které mezi sebou komunikují nejčastěji pomocí internetu. Mnoho těchto zařízení nemusí být obsluhováno lidmi a komunikuje mezi sebou navzájem. Zařízení by se mělo propojit do sítě především bezdrátově. Podle jedné z definic znamená Internet věcí vzájemně propojenou síť zařízení, které jsou jednoznačně adresovatelné s tím, že síť se zakládá na standardizovaných komunikačních protokolech umožňující výměnu, sdílení informací a dat [9,10,14].



Obr. 1.3.1 Představa IoT (převzato[13])

Internet věcí se využívá mnoha oblastí lidského života. Příklady aplikací Iot je mnoho. A každým dnem vznikají nová využití IoT, například v dopravě pro interaktivní jízdní řády na zastávkách hromadné dopravy, v zemědělství pro měření srážek, v průmyslu pro monitorování výrobních procesů, chytrá města a mnoho dalších odvětví.

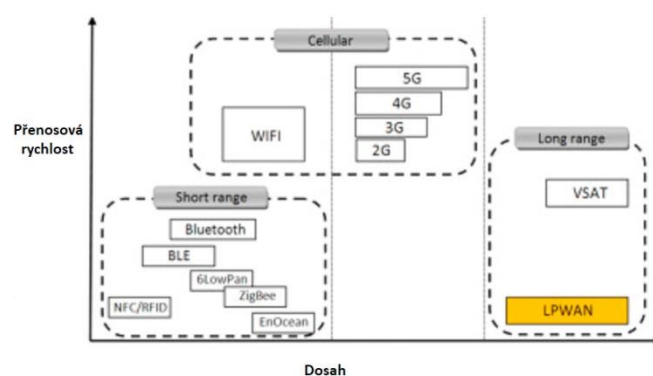
Pojem [14] „Internet věcí“ poprvé použil na své prezentaci v roce 1999 Brit Kevin Ashton. Dalším milníkem ve vývoji IoT byly roky 2008 a 2009, kdy podle odhadu společnosti Cisco, překročil počet zařízení připojených k internetu, počet světové populace na planetě Zemi. Počet zařízení připojených do IoT bude v budoucnosti neustále narůstat.

Bezdrátový přenos dat a komunikace v IoT je řešen pomocí zařízení (device) nebo bran (gateways). Zařízení a objekty mezi sebou komunikují, posílají si signál obousměrně nebo jednosměrně. A používají při tom různé technologie pro bezdrátovou komunikaci.

Výběr bezdrátové technologie je závislý na řadě parametrů. Při výběru bezdrátové technologie bereme ohled na dosah signálu technologie, rychlost přenosu dat či energetickou náročnost. V současnosti se můžeme setkat s těmito bezdrátovými technologiemi [31]:

- GSM - standard pro mobilní komunikaci, který se začala vyjet v roce v 1982 pracovní skupina Groupe Spécial Mobile, po níž je standart pojmenován.
- LTE (Long Term Evolution) - technologie požívaná pro datové přenosy v mobilních sítích.
- Bluetooth - standard pro bezdrátovou komunikaci založenou na propojení dvou a více elektronických zařízení na krátké vzdálenosti. V roce 1994 byl standart vytvořenou společností Ericsson.
- Wi-Fi - bezdrátová technologie pro připojení v počítačové pracujících na několika standardech IEEE 802.11.

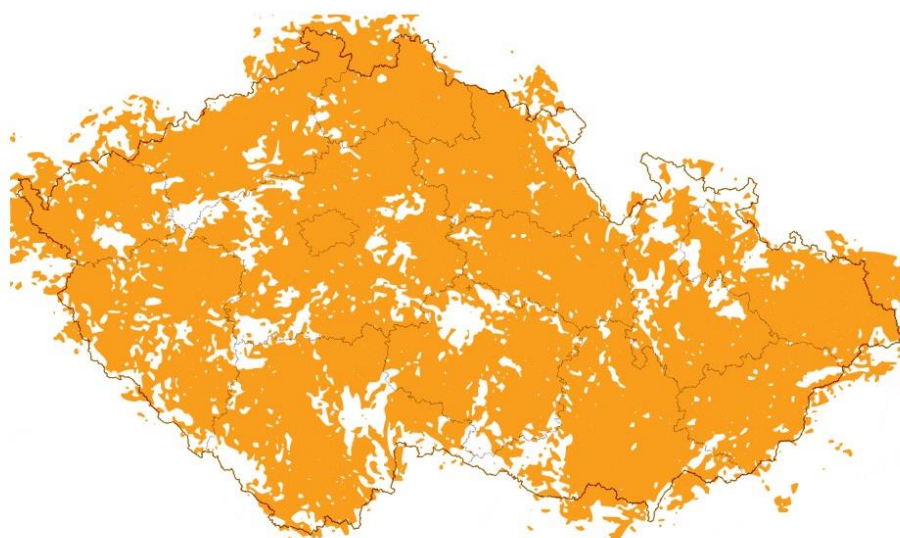
Diplomová práce je zaměřena na antény, které pracují na frekvencích 868 MHz, proto je zde příspěvek na síť LPWAN – Low-Power Wide-Area Networks, v překladu širokopásmové síť s nízkou náročností na energii. LPWAN síť mohou mít dosah na několik desítek kilometrů, jsou vhodné pro použití aplikací v IoT. Na obr. 1.3.2 je znázorněno umístění LPWAN s porovnáním dalších radiokomunikačních technologií v závislosti na přenosové rychlosti dat a dosahu signálu. Síť LPWAN se vyznačují tím, že dokáží přenášet malé množství dat několikrát za hodinu na velké vzdálenosti. Senzory zařízení odesílající signál mají nízkou spotřebu elektrické energie. Síť LPWAN jsou navrženy za účelem minimální spotřeby elektrické energie. Baterky v senzorech vydrží až 10 let. Síť LPWAN jsou vhodné ke komunikaci zařízení mezi sebou, to znamená, že spolu komunikuje navzájem stroj a stroj. V České republice se pro LPWAN využívají technologie Sigfox a LoRa, které pracují ve frekvenčním pásmu 868 MHz. [11,12,15]



Obr. 1.3.2 Přenosová rychlost v závislosti na dosahu radiokomunikačních technologií s umístěním LPWAN sítě [15]

1.3.1 LoRa

LoRa [19, 20] je technologie využívána pro Internet věcí. Princip technologie je založen na dvou částech. První část je tvořena modulací LoRa (Long Range), která byla vyvinuta v roce 2009 ve Francii firmou Cycleo, v roce 2012 jí odkoupila americká firma Semtech [15]. Druhá část technologie je tvořena síťovým protokolem LoRaWAN. Technologie Lora v Evropě pracuje v nelicencovaném pásmu ISM o frekvenci 868 MHz. Další rozsah pásma ve světě udává tab. 1.3.1. V České republice si komunikační technologii LoRa vybrali České Radiokomunikace. V roce [20] 2018 byla pokryta většina území v České republice sítí založené na technologii LoRa.



Obr. 1.3.3 Pokrytí signálu sítě založené na technologii LoRa v České republice (převzato[25])

LoRa je modulace [19,21], která se používá k bezdrátovému spojení na velké vzdálenosti. LoRa je založena na modulaci rozprostřeného spektra (Chirp Spread Spectrum) CSS. Je to podobná charakteristice modulaci FSK, rozdíl je v jejím dlouhém dosahu. Jedna brána nebo základna může pokrýt velkou část území o velké rozloze. Dosah této technologie je závislý na prostředí a překážkách, které musí překonat.

Tab. 1.3.1 Rozsah frekvenční pásma LoRa ve světě [16]

	<i>Evropa</i>	<i>Severní Amerika</i>	<i>Čína</i>	<i>Korea</i>	<i>Japonsko</i>	<i>Indie</i>
<i>Frekvenční pásmo [MHz]</i>	867-869	902-928	470-510	920-925	920-925	865-867

LoRaWAN [12,18] (Long Range Wide Area Network) je síťový protokol s nízkou spotřebou energie, který je navržen pro levnou a zabezpečenou komunikaci internetu věcí. Zajišťuje zabezpečený přenos dat mezi koncovými zařízeními a aplikací běžící na internetu. Topologie LoRaWAN pracuje s hvězdicovou strukturou. Komunikace mezi koncovými prvky a bránami je rozdělena v různých frekvenčních pásmech s různou přenosovou rychlostí. Volba přenosové rychlosti záleží na kompromisu mezi komunikačním rozsahem a délkou zprávy. U protokolu si můžeme vybrat, jaké datové rychlosti a vysílací výkon použijeme. Umožňuje to zvýšit výdrž baterie. Rychlost přenosové rychlosti je od 0.3 kb/s do 50 kb/s.

LoRAWAN rozlišuje různé typy koncových zařízení. Rozdělení slouží k optimalizaci koncových aplikací. Zařízení se dělí do následujících tří tříd [22]:

- Třída A – Je založena na principu obousměrné komunikace. Vysílání vždy zahajuje koncový prvek zařízení. Po odeslání zprávy se otevrou, alespoň dvě přijímací okna. Zpráva je vysílána v náhodném čase. Třídou A podporují všechny zařízení, které jsou připojeny pomocí LoRAWAN. Zařízení pracující v této třídě a jsou velice úsporné na výdrž baterie. Zařízení třídy A jsou vhodná, například pro monitorovací aplikace, kdy odeslaná data, nemusí být odeslána, v konkrétním časovém okamžiku.
- Třída B – Zařízení třídy B komunikuje obousměrně, ale jsou nedefinovány přesné časové okamžiky, kdy koncové zařízení otevírají další přijímací okna.

Aby se přijímací okno mohlo otevřít v nadefinovaném časovém intervalu, přímá koncové zařízení z brány časově synchronizovaný rámeček. Serveru to pomůže, zjistit, kdy koncové zařízení naslouchá.

- Třída C - koncové zařízení naslouchá neustále. Přijímací okna jsou neustále otevřená, jen při vysílání jsou zavřena.

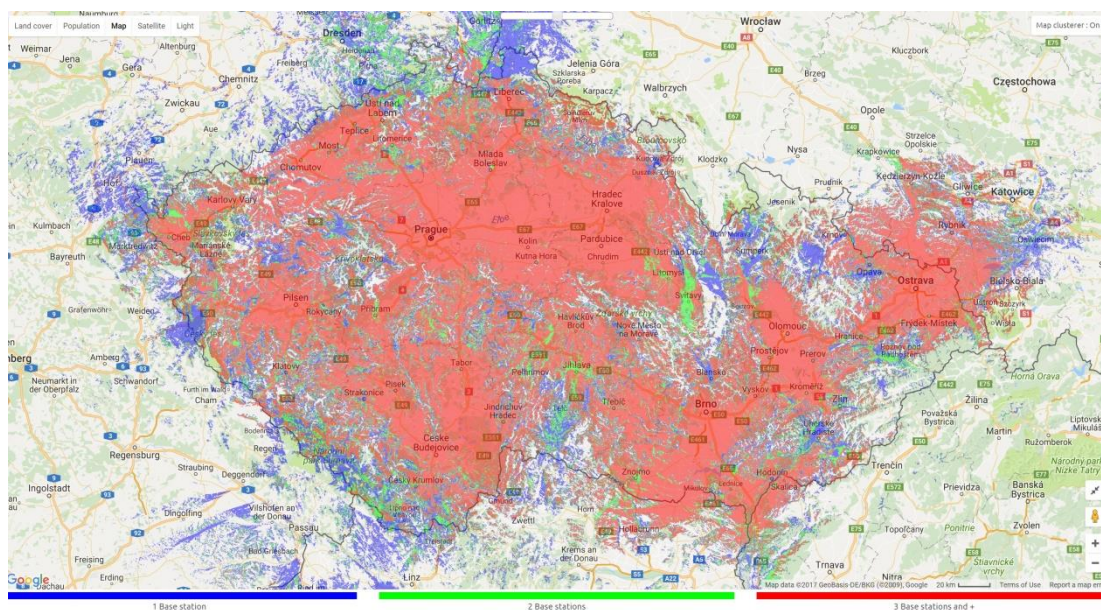
Na vývoji síťového protokolu LoRaWAN se podílí nezisková organizace [17] LoRa Alliance, která tento síťový protokol v roce 2015 standardizovala. LoRa Alliance je nejrychleji rostoucí seskupení v technickém prostředí. Rozrostla se o více než 500 členů. Tvoří nejrychleji rostoucí seskupení v technickém prostředí. Členové LoRa Alliance jsou telekomunikační společnosti, výrobci senzorů a společností, které se zabývají výrobou polovodičů a mnoho dalších organizací. Například mezi členy organizace patří firmy IBM, Cisco, HP, Foxconn, Semtech, Schneider a Bosch. Hlavní cílem této organizace je rozvíjení sítě LPWAN a umožnit tak rozvoj IoT.

1.3.2 SigFox

Sigfox je společnost zaměřující se na bezdrátovou technologii v IoT, která byla založena ve Francii roku 2009. Sídlo společnosti se nachází v Labège poblíž města Toulouse. Společnost se rozrostla po celém světě [23]. Podle jména společnosti je pojmenovaná patentovaná technologie Sigfox, která je provozována na sítích LPWAN, s velmi nízkou energetickou náročností. Komunikace zařízení probíhá v bezlicenčním pásmu ISM, které je v Evropě 868 MHz. V České republice provozuje mobilní veřejnou síť založenou na technologii SIGFOX, mobilní operátor SimplexCell. Na budování sítě se podílí společnost T-Mobile, která pomocí své infrastruktury umožňuje umístění základnových stanic. Síť byla v roce 2016 spuštěna v České republice [26]. Na obr. 1.3.4 je pokrytí mobilní veřejné sítě založené na technologii SigFox v roce 2019. Síť SigFox je v České republice pokryto 95 % populace a 92 % území [27].

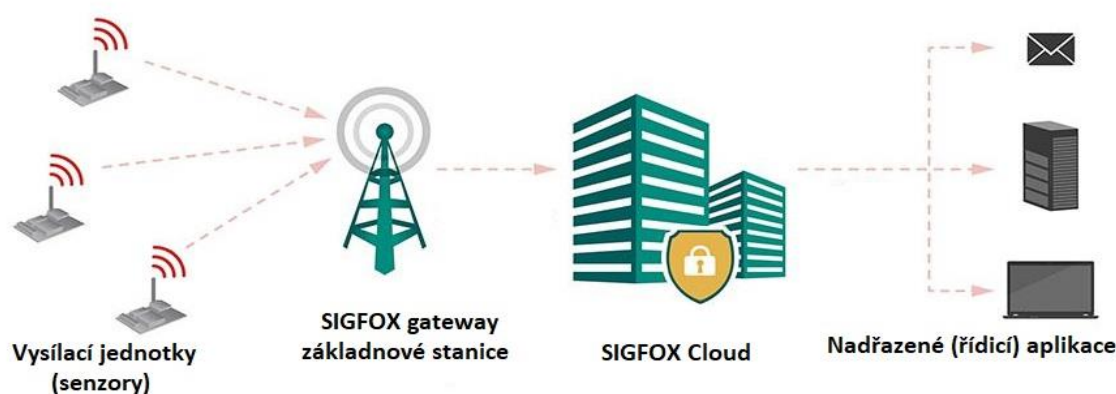
Technologie umožňuje bezdrátovou komunikaci zařízení na dlouhé vzdálenosti s dosahem signálu až 50 kilometrů od základní stanice ke koncovému zařízení. Technologie SigFox využívá k přenosu komunikaci ultra úzké pásmo UNB (Ultra Narrow Band). V UNB pásmu je vysílán krátký puls dat s vysílacím výkonem 100 mW a modulaci pracující v 200kHz veřejném pásmu. Vysílaná zpráva využívá DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying) modulaci, které pro přenosovou rychlost 1 bit/s postačí jenom

frekvenční pásmo 1 Hz. Z toho vychází, že síť SigFox s přenosovou rychlostí 100 bit/s bude využívat šířku frekvenčního pásma 100 Hz [23,29,30].



Obr. 1.3.4 Pokrytí signálem technologie SigFox v České republice (převzato[24])

Síť s technologií Sigfox [12] je postavena na hvězdicové topologii a je budována na buňkovém principu. Je složena ze základnových stanic a buněk, které pokrývají určité území. Objekty vysílají své zprávy do sítě SigFox, za podmínky, že je v dosahu signálu základnové stanice. Každá jednotlivá základnová stanice se zakládá na využívání místních SigFox operátorů (např. v České republice operátor SimplexCell), kteří obdržené zprávy pošlou do tzv. SigFox Cloudu. Demodulované a detekované zprávy za pomoci základnových stanic jsou přetříděny v SigFox Cloudu a posílány do koncových zákaznických zařízení [30] obr. 1.3.5.



Obr. 1.3.5 SigFox architektura [30].

Charakteristickým znakem sítě je přenosová rychlost 100 bit/s. Technologie SigFox umožňuje přenést v jedné zprávě malé množství dat po 12 bajtech. Umožňuje to šetřit energii uloženou v bateriích daného zařízení. Malé množství dat ve formě zprávy, se přenesou jen několikrát za den. Technologie SigFox omezuje počet těchto zpráv denně na 140 vysílaných 12-bajtových a 4 zpětně potvrzovací 8-bajtové zprávy. V praxi to znamená, že vysílací jednotka může denně poslat 96 dvoustavových signálů (např. zapnuto/vypnuto). [15,30].

Koncové zařízení SigFox pracuje obdobně jako zařízení koncové třídy A u technologie LoRa. Zařízení zahájí vysílání zprávy a pak v náhodném okamžiku začne naslouchat přijímací signál [30].

1.3.3 IQRF

IQRF je komplexní technologie určená pro bezdrátový přenos malého množství dat na velké vzdálenosti s nízkou energetickou náročností s dosahem komunikace na desítky, až stovky metrů. Ve zvláštních případech může být dosah sítě i několik kilometrů [34]. Technologie zahrnuje zařízení (vysílače, brány, směrovače, vývojové nástroje), software a protokoly. Síť IQRF lze snadno zapojit k Internetu za pomoci cloud serverů [35].

Využití technologie je především v IoT sítích pro telemetrii, průmyslové řízení a automatizaci budov. Například se jedná o parkování a pouliční osvětlení. Cílem technologie IQRF je poskytovat bezdrátové připojení v aplikacích, které využívají dálkové ovládání, vyhodnocování dat na dálku nebo propojení několika zařízení k bezdrátové síti [35].

Technologie byla vyvinuta v roce [32] 2004 českou společností MICRORISC. Vlastníkem technologie IQRF je společnost IQRF Tech, která spadá pod společnost MICRORISC. Na vývoji technologie IQRF podílí nezisková organizace [33] IQRF Alliance, která má sídlo v České republice. Členové aliance jsou instituce, univerzity a komerční společnosti, které se podílí na vývoji technologií IQRF.

Technologie pracuje v bezlicenčním ISM pásmu 868 MHz v Evropě, 916 MHz v USA a 433 MHz celosvětově. Data jsou přenášena v paketech o maximální velikosti 64 bajtů s rychlostí, která dosahuje maximálně 19,8 kb/s. Bezdrátový přenos signálu je zajištěn pomocí zařízení nazývaných se transceivery. Transceiver obr. 1.3.6 je malá

inteligentní elektronická deska sloužící k bezdrátovému připojení. Jedná se o základní komunikační zařízení v technologii IQRF. Transceiver může pracovat jako uzel (node) nebo koordinátor. Záleží na nastavení zařízení. Jestliže zařízení není v dosahu sítě, jsou využity ostatní zařízení v síti. Každému zařízení v síti je přidělena adresa a role [34].



Obr. 1.3.6 transceiver (převzato[36])

Pro bezdrátovou komunikaci využívá technologie IQRF dva typy komunikace. V prvním případě komunikaci probíhá na principu peer-to-peer. Zařízení mezi sebou komunikují navzájem. Při odeslání jedné zprávy ze zařízení, je zpráva obdržena všemi zařízeními nacházejících se v dosahu sítě. Druhý způsob komunikace je založen na tzv. mesh síti. V technologii IQRF se používá pro tuto síť označení IQMESH. Síť je tvořena jednotlivými uzly a koordinátorem. Role koordinátora spočívá v řízení jednotlivých odeslaných a přijímaných zpráv v komunikaci. Dává pokyny ke sběru dat z uzlů či zasílá na uzly příkazy. V IQMESH síti může mezi sebou komunikovat navzájem až 240 zařízení. Síť je složena z jednoho koordinátora a až 239 uzlů. Všechny zařízení v síti IQRF pracují na stejném kanálu. A slyší více signálů od ostatních zařízení [34].

Architektura IQRF se skládá ze tří základních vrstev. První vrstvou je operační systém. IQRF technologie využívá ke komunikaci DPA protokolu, který tvoří druhou vrstvu. Protokol DPA (Direct Peripheral Acces) je bajtový orientovaný protokol pro řízení zařízení v IQRF síti. A třetí vrstva se skládá z případného souboru Custom DPA Handler, který umožňuje přizpůsobit chování transceiveru [37].

2 Současný stav trhu antén

V kapitole je nejdříve uvedeno možné rozdělení antén. Dále jsou zde uvedeny druhy antén a popsány výrobní materiály antén. Na konci kapitoly je věnována pozornost výrobcům antén, se zaměřením na antény prutové pracujících na frekvenci 868 MHz.

2.1 Rozdělení a druhy antén

Antény se rozdělují podle několika hledisek. Dělíme je například podle [45]:

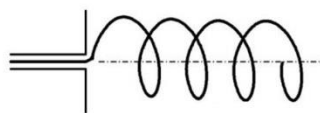
- Podle způsobu použití:
 - na stacionární antény, které jsou trvale instalovány,
 - mobilní antény nacházející se na pohyblivých objektech, jako jsou například lodě, auta, letadla.
 - přenosné antény.
- Podle typu konstrukce:
 - drátové,
 - trubkové,
 - plošné nebo prostorové.
- Podle vyzařovacích charakteristik:
 - směrové,
 - všesměrové.

Všechny antény charakterizuje frekvenční pásmo, na kterém antény pracují.

Drátové antény

Drátové [1] antény jsou založeny na vyzařování vodičů a jejich soustav. Jsou charakteristické většinou větším délkovým rozměr než průměr antény. Antény mají mnoho tvarů, od přímých úseků vodičů po různé tvary smyček, například kruhová smyčka. Na

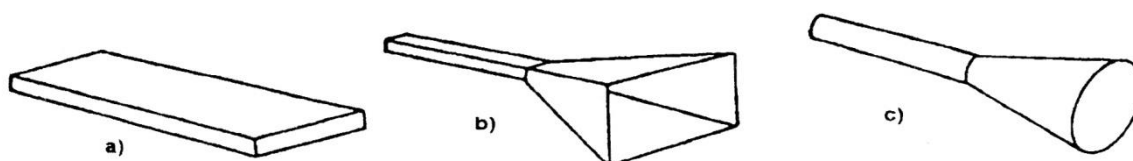
obr. 2.1.1 je uvedena šroubovicová anténa.



Obr. 2.1.1 Šroubovicová anténa (převzato[61])

Plošné antény

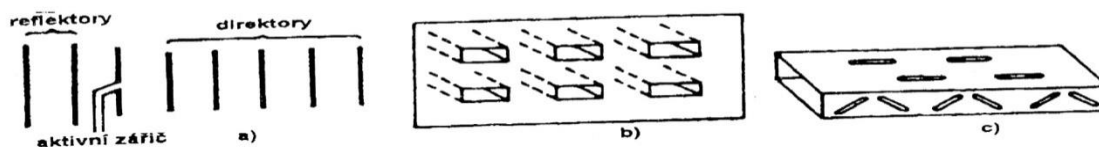
Příklady tvarů plošných antény jsou uvedeny na obr. 2.1.2.



Obr. 2.1.2 Plošné antény: a) pravoúhlý vlnovod b) jehlanový trychtýř c) kuželový trychtýř (převzato[4])

Anténní řady a pole

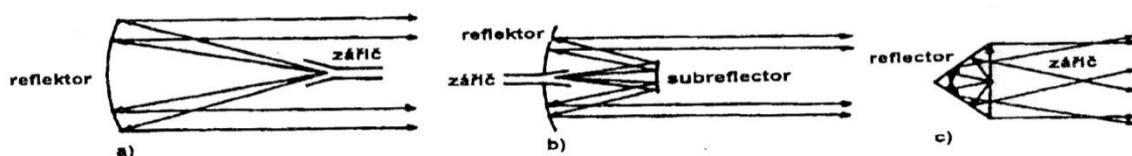
V mnoha aplikacích nedosáhne jeden prvek antény požadovaných vlastností, proto se můžeme setkat s upořádáním jednotlivých zářičů do řady. Různé příklady anténních řad jsou uvedeny na obr 2.1.3.



Obr. 2.1.3 Příklady konfigurací anténních řad a polí: a) Yagiho řada b) plošné vlnovodové pole c) štěrbinová řada (převzato[4])

Reflektorové antény

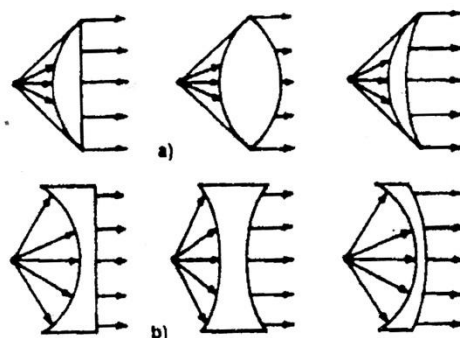
Typickým znakem je pro tento typ antén speciálně tvarovaný reflektor. Pomocí reflektorových antén se docílí formování divergujícího pole primárního zářiče. Antény jsou většinou směrové. Příklady reflektorových antén udává obr. 2.1.4.



Obr. 2.1.4 Reflektorové antény: a) parabolický reflektor s čelním napájením b) parabolický reflektor v Cassegrainově uspořádání c) úhlový reflektor (převzato[4])

Anténní čočky

Anténní čočky se vyznačují specifickým geometrickým tvarem povrchu obr. 2.1.5. Jsou schopny přeměnit divergující energii od zdroje na vlnu požadovaného tvaru, většinou se jedná o rovinnou vlnu.



Obr. 2.1.5 Anténní čočky: a) pro relativní index lomu $n > 1$ b) $n < 1$ (převzato[4])

Podkapitola byla zpracována na základě zdrojů [4, 45]

2.2 Materiály antén

Na výrobu antén používáme vodivé a izolační materiály. Vodivými materiály jsou využívány jako vodiče a mohou sloužit i ke konstrukčním účelům. Jako vodiče jsou využívány například měď, hliník, mosaz a různé druhy ocelí [41].

Pro konstrukci antén jsou důležité izolační materiály. Dříve se jako izolační materiály používaly keramické materiály. Nevýhodou keramických materiálů je jejich křehkost a obtížnost při obrábění. V dnešní době se setkáme s celou řadou plastů, které se používají jako izolační materiály.

Jedním z velice používaných izolačních materiálů je polyvinylchlorid PVC, vyráběn v několika modifikacích s různými vlastnostmi. Například tvrdá modifikace PVC je nazývána NOVODUR, ze kterého jsou vyráběny novodurové pruty, trubky, kryty, hadičky používané jako izolace.

Levný plastický materiál je polyetylen (zkratka PE). Je to měkká hmota, která je snadno formována vytlačováním, vstřikováním nebo foukáním. Z PE jsou vyráběny polotvrdé trubky a pruty. K výrobě trubek a prutů slouží také Polypropylen (zkratka PP), který má podobné vlastnosti jako PE, ale je tvrdší. Pro izolaci anténních konektorů a vodičů je možné využít polytetrafluorethylen (zkratka PTFE), označovaný obchodním názvem teflon. Teflon je vysoce odolný vůči chemickým látkám, teplotní odolnost teflonu je od $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ a zároveň má vysokou odolnost proti působení vnějších klimatických vlivů. Rozšířený izolačním materiál je Akrylonitrilbutadienstyren (zkratka ABS). Vyznačuje se odolností vůči mechanickému poškození, vysokou pevností v tahu a odolností proti nízkým a vysokým teplotám [41,45].

Tab. 2.2.1 Teplotní odolnost plastových materiálů (zpracováno na základě [62])

Materiál	Teplota	
	min. [$^{\circ}\text{C}$]	max. [$^{\circ}\text{C}$]
PVC	-20	80
PE	-40	80
PP	-10	120
PTEE	-260	260
ABS	-40	85

2.3 Výrobci antén

Alcoma

Alcoma je česká společnost zabývající se vývojem a výrobou mikrovlnných radioreléových spojů. Společnost byla založena v roce 1993. Společnost vyrábí vysoce výkonové antény (High Performance). Jedná se o antény trychtýřově parabolické [63].

Jirous

Jirous je česká společnost zabývající se výrobou panelových a parabolických antén, která vznikla v roce 2008. Patří mezi přední výrobce těchto antén ve střední Evropě. Společnost vyrábí antény pro Wi-Fi technologie v pásmu 2,4 GHz a 5 GHz [64].

NiceRF

Je technologická společnost sídlící v Číně zabývající se výzkumem, vývojem a prodejem produktů pro IoT technologie. Mezi její produkty patří například prutové antény pracující na frekvenci 868 MHz [65].

Mezi zahraniční výrobce antén, které pracují na frekvenci 868 MHz, patří například ABRACON, Pulse Electronics, Taoglas a Siretta.



2.4 Nabídka prutových antén 868 MHz na trhu

Antény na frekvenční pásmo 868 MHz v České republice se dají pořídit na internetových obchodech. Mezi známé internetové obchody patří například Mouser Electronics, Digi-Key Electronics a Farnell. V tabulkách 2.4 jsou uvedeny parametry prutových antén od různých výrobců. Antény byly vybrány na základě podobných parametrů měřených antén v této práci.

Tab. 2.4.1 Prutové antény (zpracováno na základě [67,68])

	
Model: SW868 – ZT48	Model: W1063
Výrobce: NiceRF	Výrobce: PulseLarsen Antennas
Frekvence: 868 MHz	Frekvence 863 – 928 MHz
Maximální zisk: 2,15 dBi	Maximální zisk: 1 dBi
VSWR: $\leq 1,5$	VSWR: ≤ 2
Impedance: 50 Ω	Impedance: 50 Ω
Provozní teplota: neuváděna	Provozní teplota: -20 °C do 65 °C
Přibližná cena: 100 Kč	Přibližná cena: 175 Kč

Tab. 2.4.2 Prutové antény (zpracováno na základě [69,70])

	
Model: AEACAQ190012-S868	Model: TI.08.A.0111
Výrobce: ABRACON	Výrobce: Taoglas
Frekvence: 868 MHz	Frekvence 868 – 870 MHz
Maximální zisk: 3,5 dBi	Maximální zisk: - 1,7 dBi
VSWR: < 2,5	VSWR: ≤ 1,5
Impedance: 50 Ω	Impedance: 50 Ω
Provozní teplota: -40 °C do 85 °C	Provozní teplota: -40 °C do 85 °C
Přibližná cena: 165 Kč	Přibližná cena: 180 Kč

Tab. 2.4.3 Prutové antény (zpracováno na základě [71,72])

	
Model: Delta 22A	Model: ANT-WP868SMA-Y
Výrobce: Siretta	Výrobce: LPRS
Frekvence: 868 MHz	Frekvence 868 MHz
Maximální zisk: 3 dBi	Maximální zisk: 2,5 dBi
VSWR: < 1,5	VSWR: ≤ 1,5
Impedance: 50 Ω	Impedance: 50 Ω
Provozní teplota: -20°C do 60 °C	Provozní teplota: -40 °C do 60 °C
Přibližná cena: 175 Kč	Přibližná cena: 180 Kč

3 Měření parametrů mikrovlnných antén

V kapitole jsou popsány parametry mikrovlnných antén. Následuje popis měřící techniky pro měření parametrů antén. Jsou zde uvedeny vzorky antén, které byly měřeny. Dále se kapitola zabývá měřením parametrů mikrovlnných antén, konkrétně se jedná o měření činitele stojatých vln, měření zisku antény a měření směrových charakteristik. Na konci kapitoly jsou popsány konkrétní měřící metody, které byly použity při měření parametrů mikrovlnných antén.

3.1 Parametry mikrovlnných antén

Vstupní impedance

Vstupní impedance antény [1,6] je charakterizována jako impedance antény, která udává poměr napětí a proudu na napájecích svorkách antény. Impedance antény se skládá z reálné a imaginární složky s kapacitním nebo induktivním charakterem. Při rezonanci je impedance antény rovna reálné složce. Charakter impedance antény a velikost složek je závislý na vlnové délce antény a geometrickém uspořádání antény. Reálná složka je tvořena odporem zařízení (vyřazovací odpor antény) R_r , který lze vyjádřit z výkonu P vyzářené antény a z efektivní hodnoty tekoucího proudu anténou podle vztahu [1]:

$$R_r = \frac{2P}{I^2} \quad (3.1.1)$$

kde jsou:

R_r - vyřazovací odpor antény [Ω],

P - výkon vyzářené antény [W],

I – efektivní hodnota vyzářeného proudu [A].

Zisk antény

Velikost zisku se většinou udávána v decibelech, který je určen logaritmičtým poměrem napětí nebo výkonu na přijímači, který je připojen k měřené anténě a následně k anténě referenční, nacházejícím se v témže místě. Podle [45] je zisk dán vztahem:

$$G = 10 \log \frac{P_1}{P_0}, \quad (3.1.2)$$

kde jsou:

G – zisk antény [dB],

P_1 – výkon měřené antény [W],

P_0 – výkon referenční antény [W].

Z uvedeného zdroje [6] je zisk antény určen poměrem vysílaného výkonu k výkonu dodávanému na vstup antény. Neboli zisk antény udává, kolikrát je potřeba zvýšit výkon referenční antény k měřené anténě, pro dosažení stejné intenzity pole v měřeném místě. Jako referenční anténa se bere v potaz tzv. izotropická anténa se ziskem $G = 0$ dB_i, což je anténa hypotetická nereálná, která vyzařuje nebo přijímá vysokofrekvenční energii rovnoměrně do všech směrů. Dále se za referenční anténu, může být určen půlvlnný dipól, který má hodnotu zisku 0 dB_d, respektive vůči izotropické anténě má zisk 2,14 dB_i. Rozdíl mezi těmito uváděnými referenčními anténami je 2,14 dB. Výrobci antén většinou udávají zisk antény v dB_i, protože tato hodnota zisku antény je větší o 2.14 dB, než hodnota zisku udávána v dB_d.

Rezonanční kmitočet

Anténa [45] představuje otevřený rezonanční obvod, kde indukčnost a kapacita je realizována pomocí vodiče. Při rezonanci u antény, musí být délka vodiče násobkem poloviny vlnové délky. Rezonanční kmitočet je závislý na výšce antény nad zemí (je zde uplatňována kapacita tzv. otevřeného kondenzátoru). Závislost mezi kmitočtem, indukčností a kapacitou je dána podle Thomsonova vztahu:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (3.1.3)$$

kde jsou:

f – kmitočet [Hz],

L – indukčnost [H],

C – kapacita [F].

Šířka pásma

Všechny základní parametry antén, jako například vstupní impedance, směrová charakteristika a zisk jsou nepřímo závislé na frekvenci. Není [4] žádná jednotná definice, která by definovala šířku pásma. Šířka pásma [1] specifikuje rozsah kmitočtu, ve kterém jsou vlastnosti antény, vzhledem dané charakteristice, souhlasné se specifikovaným standardem. Šířka pásma je především závislá na typu a konstrukci antény [45].

Směrová a vyzařovací charakteristika

Označení směrová charakteristika je užíváno u přijímacích antén, zatímco pojem vyzařovací charakteristika je používána u vysílacích antén. Jedná se tedy o stejný parametr, který charakterizuje směrové vlastnosti antény. Vyzařované elektromagnetické pole antény lze v prostorových souřadnicích vyjádřit dle vztahu [4,6]:

$$\mathbf{E} = C \cdot A^{j\psi} \mathbf{a}_0 F(\vartheta, \varphi) \cdot \frac{e^{-jkr}}{r}, \quad (3.1.4)$$

kde jsou:

C – obsahuje konstantu prostředí,

$A^{j\psi} \mathbf{a}_0$ – je funkce buzení vektorový charakter určuje např. směr tekoucího proudu,

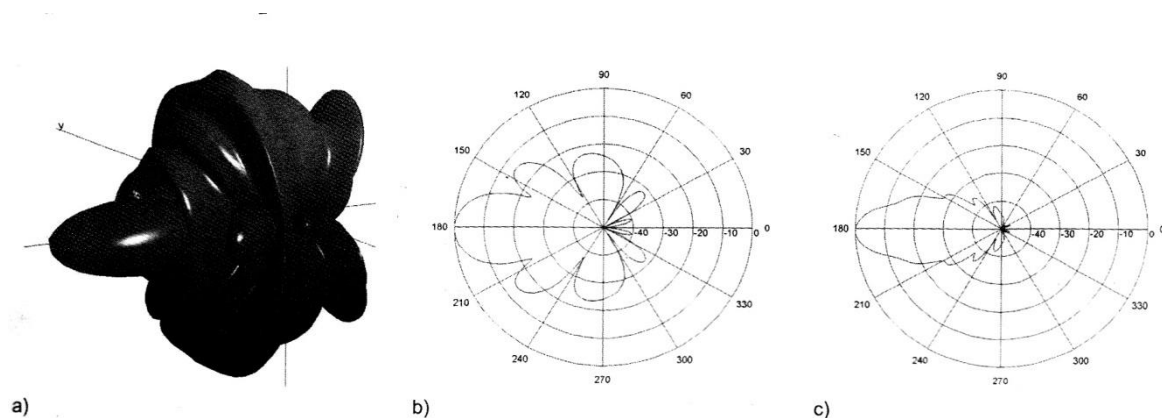
$F(\vartheta, \varphi)$ - značí vyzařovací charakteristiku,

$\frac{e^{-jkr}}{r}$ – závislost na vzdálenosti amplitudy a fáze pole.

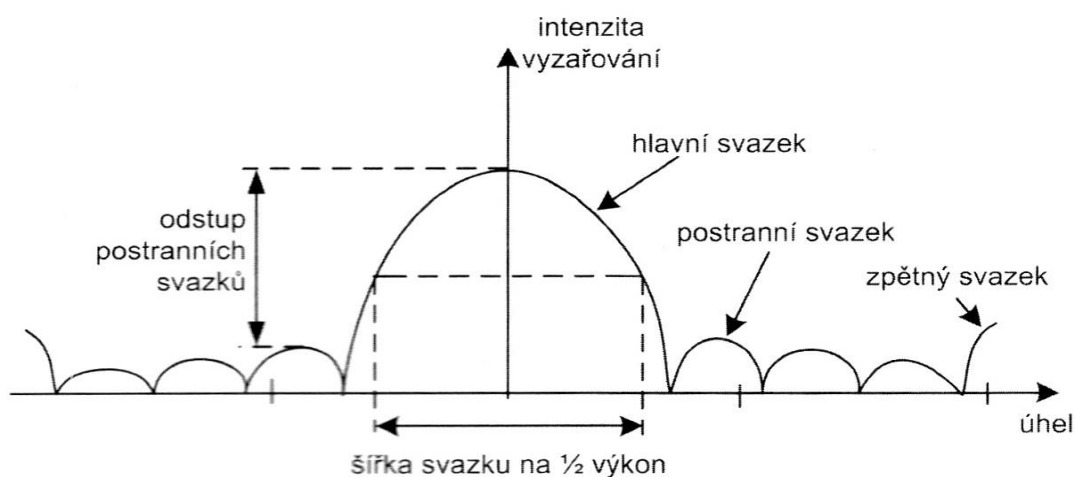
Velikost vysílané či přijímané elektromagnetické energie je vysílána do různých směrů pomocí antény. Směrová charakteristika antény je určena směrovými vlastnostmi antény v závislosti na prostorových souřadnicích. Směrové vlastnosti obsahují komplexní intenzitu elektrického pole (amplitudu a fázi) a polarizační vlastnosti. Pokud je ve směrové charakteristice zobrazen přijímaný výkon, je tato charakteristika označena výkonovou směrovou charakteristikou. Směrová charakteristika zobrazující intenzitu pole je označována, jako směrová. Specifikace rozlišení, tohoto označení má význam např. při výpočtu směrovosti [4].

V [5] praktickém měření je třírozměrná směrová charakteristika antény měřena

v řezech. Obvykle pro měření jsou prováděny dva příčné řezy, procházející hlavní osou antény. Řezy jsou označeny podle orientace antény vůči zemi, jako horizontální a vertikální, nebo dle orientace vektorů, jako řez (rovina E a rovina H). Směrová charakteristika mohou být znázorněny pomocí 3D zobrazení a řezů. Pro příklad slouží znázornění směrové charakteristiky trychtýřové antény obr. 3.1.1. Dalším zobrazením směrových charakteristik je v kartézských souřadnicích obr. 3.1.2.



Obr. 3.1.1 Příklad směrové charakteristiky trychtýřové antény: a) 3D zobrazení b) vertikální řez c) horizontální řez (převzato[5])



Obr. 3.1.2 Směrová charakteristika antény (převzato[5])

Účinnost antény

Účinnost antény charakterizuje poměr mezi celkovým výkonem vyzářený anténou a výkonem na vstupu bezztrátové antény podle vztahu [6]:

$$\eta = \frac{P_{Vyz}}{P_{vst}}, \quad (3.1.5)$$

kde jsou:

η - účinnost antény [-],

P_{Vyz} – celkový výkon vyzářený anténou [W],

P_{vst} – výkon na vstupu bezeztrátové antény [W].

Polarizace

Polarizace antény [4,5] je určena polarizací vyzářené vlny. Polarizace určuje rovinu, v které kmitá elektrická složka elektromagnetického záření. Většina antén je navržena tak, že rozlišujeme polarizaci horizontální či vertikální vůči zemi, jedná se o antény s lineárními polarizačními vlastnostmi. Anténa umístěná vůči zemi horizontálně, vysílá signál horizontální a anténa umístěná vůči zemi vertikálně, vyzařuje signál vertikálně. Dalším případem [46] jsou antény s eliptickými polarizačními vlastnostmi. U nich je vektor intenzity elektrického pole složen ze dvou na sebe kolmých složek, mezi nimiž je fázový posun. Dalším typem je kruhová polarizace, kdy velikost amplitudy je stejná a fázový posun mezi amplitudami je $\pm \pi/2$. Kruhovou polarizaci můžeme dělit na pravotočivou a levotočivou.

Činitel zpětného příjmu

Činitel [46] zpětného příjmu, někdy označován jako předožadní poměr. Je parametr vyjadřující schopnost antény potlačit nežádoucího přijímaný signál z jiného směru, než má daná anténa přijímat signál. Udává poměr mezi napětím na výstupních svorkách antény naměřených ve směru maxima příjmu a maxima napětí opačném nežádoucím směru [1].

Činitel stojatých vln

Činitel stojatých vln [45,46] je označován zkratkou ČSV, v literatuře se můžeme setkat s označením poměr stojatých vln PSV (v angličtině SWR – Standing Wave Ratio). ČSV udává stupeň přizpůsobení antény k napájecí a vysílači. Je definován poměrem maximální a minimální amplitudy (proudu, napětí) stojaté vlny. Hodnota ČSV nabývá hodnot 1 a více. Pokud je hodnota parametru antény ČSV = 1, všechnen výkon je přenesen

do antény a vyzářen (za podmínky, že nemá vlastní anténa velký ztrátový odpor).

Při nedokonalém přizpůsobení antény, ČSV nabývá hodnot větších než 1 a vzniká mezi anténou a napájecím vedením odražená vlna, která je vrácena zpět do vysílače. Z toho důvodu se snižuje účinnost přenosu vysokofrekvenční energie do antény a může to způsobit poškození koncového stupně vysílače. Činitel stojatých vln, můžeme spočítat pomocí vztahu [45]:

$$\text{ČSV} = \frac{1 + \sqrt{B/F}}{1 - \sqrt{B/F}} = \frac{Z_1}{Z_a} = \frac{Z_a}{Z_1}, \quad (3.1.6)$$

kde jsou:

ČSV – činitel stojatých vln [-],

F - výkon přenášené vlny [W],

B – výkon odražené vlny [W],

Z_1 – impedance napáječe [Ω],

Z_a – reálná impedance antény [Ω].

Činitel stojatých vln má souvislost s činitelem odrazu, který je vyjádřen podle následujícího vztahu [1]:

$$\text{ČSV} = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|} [-], \quad |\rho| = \frac{\text{ČSV} - 1}{\text{ČSV} + 1} [-], \quad (3.1.7)$$

kde je:

ρ - činitel odrazu [-].

Hodnota činitele stojatých vln je nejlepší při ČSV = 1. Čím je parametr větší, tím je kvalita impedanční přizpůsobení antény horší. Například hodnota ČSV = 3 odpovídá 25 % odraženého výkonu. Za přijatelnou hodnotu se považuje ještě ČSV = 2 [45,47].

3.2 Vzorky měřených antén

Pro měření parametrů antén bylo testováno 5 vzorků antén, které mi poskytl et. Ing

Petr Kašpar, PhD. Jedná se o antény různých výrobců pracující na frekvenci 868 MHz, které jsou vertikálně polarizované. Bližší technické údaje o testovaných anténách jsou uvedeny v tabulkách 3.2.1, 3.2.2 a 3.2.3. Pro lepší orientaci v textu, byly antény označeny pracovním názvem vzorek 1 až 5.


Tab. 3.2.1 Technické parametry antén – vzorek 1[48], vzorek 2 [49]

	
Model: ANT-868-CW-QW	Model: SW868-ZT100
Výrobce: Linx Technologies	Výrobce: NiceRF
Pracovní označení: Vzorek 1	Pracovní označení: Vzorek 2
Frekvenční rozsah: 750 – 950 MHz	Frekvenční rozsah: 850 – 950 MHz
Maximální zisk: 1,6 dBi	Maximální zisk: 2,15 dBi
VSWR: <1,9	VSWR: ≤ 2,0
Impedance: 50 Ω	Impedance: 50 Ω
Provozní teplota: -40 °C do 90 °C	Provozní teplota: neuvedeno
Přibližná cena: 172 Kč	Přibližná cena: 220 Kč

Tab. 3.2.2 Technické parametry antén- vzorek 3[50], vzorek 5 [51]

	
Model: SW868-WT100	Model: SD868L Outdoor Antenna
Výrobce: NiceRF	Výrobce: Ideetron
Pracovní označení: Vzorek 3	Pracovní označení: Vzorek 5
Frekvenční rozsah: 850 – 950 MHz	Frekvenční rozsah: 860 – 870 MHz
Maximální zisk: 2,15 dBi	Maximální zisk: 3,00 dBi
VSWR: ≤ 2,0	VSWR: ≤ 1,5
Impedance: 50 Ω	Impedance: 50 Ω
Provozní teplota: neuvedeno	Provozní teplota: -50 °C do 70 °C
Přibližná cena: 45 - 100 Kč	Přibližná cena: 1150 Kč

Tab. 3.2.3 Technické parametry antény – vzorek 4 [52]


Model: 2J200GP
Výrobce: 2J Antennas
Pracovní označení: Vzorek 4
Frekvence: AMPS (850 MHz), GSM (900 MHz), DCS (1800 MHz), PCS (1900 MHz) 3G (UMTS 2,1 GHz), WIFI / BLUETOOTH (2,4 GHz), 4G /LTE (791 – 960 / 1710 – 2690)MHz)
Maximální zisk: 2,2 dBi
VSWR: $\leq 2,0$
Impedance: 50 Ω
Provozní teplota: -40 °C do 85 °C
Přibližná cena: 370 Kč

3.3 Vybavení elektrotechnické laboratoře

Měření parametrů antén probíhalo v akreditované zkušební laboratoři [53] v budově Fakulty elektrotechnické na Západočeské univerzitě v Plzni.

3.3.1 Bezodrazová komora – Frankonia SAC - 3

Komory pro měření parametrů antén musí splňovat podmínku nekonečně rozlehlého prostoru, a to do všech směrů. Z tohoto důsledku, jsou bezodrazové komory vybaveny vhodným absorpčním materiálem, který zabezpečí malý odraz pro dopadající vlny. Na obložení komor se většinou používají tzv. pěnové materiály. Důležitou součástí obložení komory je tvar a výška absorbérů. Většinou bývají využity absorbéry s jehlanovitým tvarem. Z důvodu velkých rozměrů absorpčních jehlanů využívaných při nižších frekvencích, se často používají tyto absorbéry s kombinací feritových absorbérů pro obložení komory. Feritové absorbéry mají tvar tenkých destiček, které jsou křehké a mají poměrně velkou hmotnost [4].

K měření parametrů antén byla využita částečně bezodrazová komora od firmy

Frakonia s označením SAC-3 obr. 3.3.1. V komoře může probíhat měření na frekvencích od 26 MHz do 18 GHz. Vnitřní prostor komory má délku 8480 mm, šířku 4955 mm a výšku 5780 mm. Součástí komory je točna s průměrem 2 metry, nastavitelný anténní stojan a jejich řadič. Měření v komoře může být monitorováno za pomoci audiovizuálního systému, který je ovládán v místnosti, která je umístěna za komorou. Z místnosti je ovládána točna a nastavitelný stojan [41,46].



Obr. 3.3.1 Bezodrazová komora FRAKONIA – SAC -3

Pokrytí stěn částečně bezodrazové komory v elektrotechnické laboratoři na Fakultě elektrotechnické je realizováno pomocí absorpčního materiálu feritových absorbérů s kombinací hybridních a s pyramidových absorbérů. Feritové absorbéry pokrývají stěny a strop komory. Hybridní pyramidové absorbéry jsou umístěny na zadní straně komory, na bočních stěnách a na stropě komory, ale nenachází se za nastavitelným anténním stojanem obr 3.3.1. Plocha podlahy není osazena absorbéry.

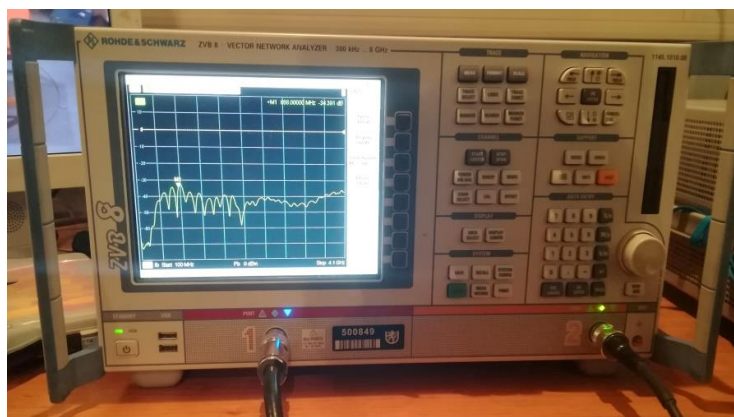
Z důvodu pouhého osazení zadní stěny feritovými absorbéry [46], je pro měření při kmitočtech nad 1 GHz, lepší využít hřebenou trychtýřovou anténu obr 3.3.2.



Obr. 3.3.2 Hřebená trychtýřová anténa (převzato[54])

3.3.2 Vektorový obvodový analyzátor

Vektorový obvodový analyzátor [55] je většinou přenosné laboratorní zařízení, které měří čtyři přenosové parametry libovolné obvodové struktury. Jedná se o s-parametry s dvěma indexy. Prvním index určuje pozici, kde se signál snímá a druhý místo, kde se měřící signál přivádí. Akreditovaná zkušební laboratoř je vybavena vektorovým obvodovým analyzátozem od firmy ROHDE & SCHWARZ obr. 3.3.3, který umožňuje měřit ve frekvenčním rozsahu od 300 kHz do 8 GHz. Vektorový obvodový analyzátor byl použit k měření zisku, směrových charakteristik a činitele stojatých vln.



Obr. 3.3.3 Vektorový obvodový analyzátor

3.4 Postupy měření parametrů mikrovlnných antén

Měření parametrů mikrovlnných antén se uskutečnilo na pěti mikrovlnných anténách. Parametry pěti poskytnutých mikrovlnných antén jsou uvedeny v kapitole 3.2. Pro účel porovnání vlivu vnějšího prostředí na parametry mikrovlnných antén, bylo určeno vedoucím práce změřit a porovnat činitel stojatých vln, zisk antény a směrové charakteristiky.

Měření parametrů mikrovlnných antén bylo nejprve provedeno 19. 12. 2018, následně byly provedeny zkoušky na pěti mikrovlnných anténách v klimatické komoře. Poté bylo provedeno měření parametrů mikrovlnných antén 6. 5. 2019 a 7. 5. 2019 za účelem porovnání parametrů. Měření parametrů u všech 5 antén bylo prováděno v bezodrazové komoře.

3.4.1 Měření činitele stojatých vlny

Pro měření činitele stojatých vln byl využit vektorový obvodový analyzátor, který byl přenesen do bezodrazové komory, kde byl umístěn na stůl. Před měřením ČSV se provedla na vektorovém obvodovém analyzátoru kalibrace, pomocí kalibrační sady. Kalibrace byla provedena i s připojeným koaxiálním kabelem. Na vektorovém obvodovém analyzátoru byl nastaven frekvenční rozsah od 100 MHz do 4,1 GHz. Při měření byl měřen parametr s_{11} , který udával hodnotu parametru činitele stojatých vln. Po připojení antény k vektorovému obvodovému analyzátoru, byla měřená anténa nasměrována k jehlanovým absorbérům, aby se zabránilo odrazu. Pomocí vektorového obvodového analyzátoru byly naměřeny data, které se uložily na flash disk.

Při druhém měření parametrů antén, byl u vzorků 2, 3, 4 a 5 změřen parametr činitele odrazu v komplexním tvaru. Podle následujících vztahů byl určen parametr ČSV. Nejdříve byla spočtena absolutní hodnota činitele odrazu:

$$|\rho| = \sqrt{Re^2 + Img^2}, \quad (3.4.1)$$

kde jsou:

Re – reálná část činitele odrazu,

Img – imaginární část činitele odrazu,

$|\rho|$ - absolutní hodnota činitele odrazu [-].

Následně byl proveden výpočet pro ČSV [1]:

$$\check{C}SV = \frac{1+|\rho|}{1-|\rho|} [-]. \quad (3.4.2)$$

Tento výpočet nebyl proveden pro dopočtení parametrů ČSV při prvním měření antén, které byly měřeny před klimatickou komorou, protože vektorový obvodovým analyzátozem byl naměřen parametr s_{11} , který přímo souvisel s parametrem ČSV.

3.4.2 Měření zisku

Zisk [4] antény je měřen za pomoci srovnání antény s kalibrovanou anténou daného zisku, nebo se může využít například metoda tří antén. V metodě tří antén se navzájem měří dvojice antén a to způsobem, že se postupně měří přenosy mezi dvěma anténami. Nejdříve se změří anténa číslo 1 s anténou číslo 2, následně anténa 2 s anténou 3 a nakonec anténa 3 s anténou 1. Z takto provedeného měření je možné získat absolutní hodnotu zisku. Měření se provádí na každém frekvenčním pásmu, kde anténa pracuje. Měření zisku se dá zjednodušit, jestliže jsou k dispozici dvě identické antény.

V této práci bylo prováděno měření zisku metodou tří antén. Jelikož vzorků antén je 5, tak k měření byla ještě použita hřebená trychtýřová anténa, která se nachází bezodrazové komoře obr. 3.3.2. Poté bylo možné vytvořit dvě trojice antén a použít metodu tří antén pro měření zisku.

Měření zisku probíhalo v bezodrazové komoře. Mezi anténami byla vzdálenost 3,5 metru. Vektorový obvodový analyzátor byl propojen s anténami a počítačem s programem MATLAB. Měření probíhalo na frekvenčním rozsahu od 100 MHz do 4,1 GHz. Pomocí skriptu v programu MATLAB, byla získána data. Ze získaných dat, pomocí následujícího výpočtu [56], byly určeny zisky antén.

Pro výpočet zisku byla použita radiokomunikační rovnice:

$$P_P = P_V + L_0 + G_P + G_V, \quad (3.4.3)$$

kde jsou:

P_P – přijímaný výkon [dBm],

P_V – vyzářený výkon [dBm],

L_0 – ztráty volným prostorem [dB],

G_P – zisk přijímací antény [dBi],

G_V – zisk vysílací antény [dBi].

Ztráty volným prostorem se vypočtou podle vztahu:

$$L_0 = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right), \quad (3.4.4)$$

kde jsou:

R – vzdálenost mezi anténami [m],

λ – vlnová délka [m].

Vlnová délka je dána vztahem:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (3.4.5)$$

kde jsou:

c – rychlost elektromagnetického vlnění ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s),

f – frekvence [Hz].

Podle radiokomunikační rovnice, se vyjádřila soustava tří rovnic:

$$\begin{aligned} P_{P1} &= P_V + L_0 + G_1 + G_2 \\ P_{P2} &= P_V + L_0 + G_2 + G_3 \\ P_{P3} &= P_V + L_0 + G_1 + G_3 \end{aligned} \quad (3.4.6)$$

kde jako neznámé, byly hodnoty zisku měřených antén G_1, G_2, G_3 , které se dopočetly.

3.4.3 Měření směrových charakteristik

Při měření směrových charakteristik antén se v podstatě určuje hodnota intenzity elektrického pole na kouli o dostatečně velkém poloměru. Ve většině měření, postačí změřit amplitudu ve vybraných rovinách. Měření je prováděno pomocí točny a nezáleží na tom, jestli je anténa přijímací nebo vysílací [4].

Před začátkem měření směrových charakteristik, byla měřená anténa umístěna do bezodrazové komory na stojan, umístěný na stole a připevněna páskou. Naproti měřené

anténě byla umístěna hřebená trychtýřová anténa obr. 3.3.2. Vzdálenost mezi anténami byla 3,5 metru. Pro učení vzdálenosti bylo využito laserového měřiče vzdálenosti. Antény byly umístěny ve výšce 1,9 metrů od podlahy komory. Vektorový obvodový analyzátor byl umístěn do ovládací místnosti za komorou. V ovládací místnosti byl využit počítač, pomocí něhož šlo ovládat točnu v komoře, nastavitelný stojan a vektorový obvodový analyzátor. Vektorový analyzátor byl propojen jedním portem s měřenou anténou a druhý port vedl k hřebené trychtýřové anténě, která byla umístěna na nastavitelném stojanu.

Měření směrových charakteristik bylo provedeno pro každý vzorek antény v horizontální a vertikální rovině. Při umístění měřené antény na stojan, je potřeba dbát pozornost na polohu, kde je anténa umístěna. Anténa by měla být umístěna, ve středu točny a zároveň musí být namířena na střed hřebené antény. Obě antény musejí být měřeny ve stejných polarizačních rovinách.

Po umístění měřené antény do komory, byla komora zavřena a následovalo samostatné měření směrových charakteristik, které bylo ovládáno z měřicí místnosti počítačem, za pomoci programu MATLAB. V MATLABU byl spuštěn skript na měření směrových charakteristik. Při spouštění měřicího skriptu, byla nejdříve zadána výška nastavitelného stojanu na 1,9 metru. Potom byl zadán frekvenční rozsah od 100 MHz do 4,1 GHz. Dále byla zadána hodnota časové brány od 0 do 27 nanosekund, z důvodu eliminace odrazu signálu v komoře při začátku měření. Poté byl měřicí skript spuštěn. Otáčení točny s měřenou anténou probíhalo s krokem 1° s rozsahem 360° . Změření směrové charakteristiky trvalo přibližně 30 až 40 minut. U každé antény byla změřena rovina E a rovina H. Po skončení měření, byla měřícím skriptem vykreslena směrová charakteristika měřené antény v polárních souřadnicích, která byla následně uložena ve formátu *emf*. Postup měření směrové charakteristiky byl proveden u každého vzorku antény.

4 Zkoušky v klimatické komoře

V kapitole jsou uvedeny klimatické zkoušky, které byly provedeny na testovaných vzorcích antén.

4.1 Laboratoř klimatických zkoušek

Regionální inovační centrum elektrotechniky nacházející se na Fakultě elektrotechnické v Plzni, disponuje laboratoří klimatických zkoušek. Laboratoř je vybavena kalibrovanou klimatickou komorou od firmy Vötsch obr. 4.1.1. V komoře se můžou provádět klimatické zkoušky v rozsahu teplot od $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkosti 10 % až 98 % RH. Komora umožňuje provádět zkoušky životnosti materiálu, funkční zkoušky zařízení, akreditované klimatické zkoušky a simulace prostředí [57].



Obr. 4.1.1 Klimatická komora.

4.2 Provedené klimatické zkoušky

Pro posouzení vnějšího vlivu na parametry mikrovlnných antén, byly vybrány zkoušky dle normy ČSN EN 60068-2 ed. 2. Norma popisuje zkoušky na vlivy prostředí technických výrobků. Zkoušky jsou prováděny chladem, suchým teplem, vlhkým teplem konstantním, vlhkým teplem cyklickým, korozivním prostředím, změnou teploty a vodou [41].

Při výběru konkrétní klimatické zkoušky, byly brány v úvahu technické parametry antén, které udávají tabulky 3.2.1, 3.2.2 a 3.2.3. Konkrétně se jednalo o parametr provozní teploty. Dalším hlediskem pro výběr klimatické zkoušky byla maximální a minimální teplota na území České republiky. Maximální naměřená teplota na území České republiky je $40,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ a minimální naměřená teplota je $-42,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ [58]. Vybrána a provedena byla

zkouška vlhkým teplem cyklickým a zkouška změnou teploty, dle platných norem ČSN EN 60068-2-30 ed. 2 a ČSN EN 60068-2-14 ed. 2.

Zkoušky lze provést v řadě za sebou. Jestliže není určeno pořadí zkoušek, závisí výběr pořadí zkoušek na čtyřech úvahách [41]:

- První úvaha spočívá, že nejdříve provedeme nejpřísnější zkoušku, ale nesmíme provést zkoušku, která by měla destruktivní charakter.
- Druhá úvaha spočívá, že nejprve je provedena zkouška, u níž se předpokládá, že méně ovlivní testovaný objekt, než zkouška druhá.
- Třetí úvaha spočívá ve volbě pořadí zkoušek, které zajistí nejkonkrétnější informace o testovaném objektu.
- Čtvrtá úvaha je založena na přesné simulaci konkrétního reálného prostředí.

V našem případě, pro volbu pořadí zkoušek, byla brána druhá úvaha. První zkouška byla provedena vlhkým teplem cyklickým a následovala zkouška změnou teploty. Protože rozsah teplot u zkoušky teplem cyklickým byl od 25 °C do 55°C. Na rozdíl od zkoušky změnou teploty, kde byl teplotní rozsah od -40 °C do 50 °C.

Klimatické zkoušky byly provedeny pro všech 5 vzorků antén. Klimatická řada zkoušek probíhala od 3. 4. 2019 do 12. 4. 2019 v klimatické komoře obr. 4.1.1.

4.2.1 Zkouška dle ČSN EN 60068-2-30 ed. 2

Zkouška [59] je složena z jednoho, nebo více teplotních cyklů při níž je relativní vlhkost udržována na vysoké úrovni. Cyklus zkoušky je založen na dvou teplotních stupních. Přísnost teplotní stupně může být:

- a) Horní teplota cyklu je nastavena na 40 °C a dolní teplota má hodnotu 25 °C. Počet cyklů může být 2, 6, 12, 21 a 56.
- b) Horní teplota cyklu je nastavena na 55 °C. Spodní teplota je nastavena na 25 °C. Počet cyklů, může být 1, 2 a 6.

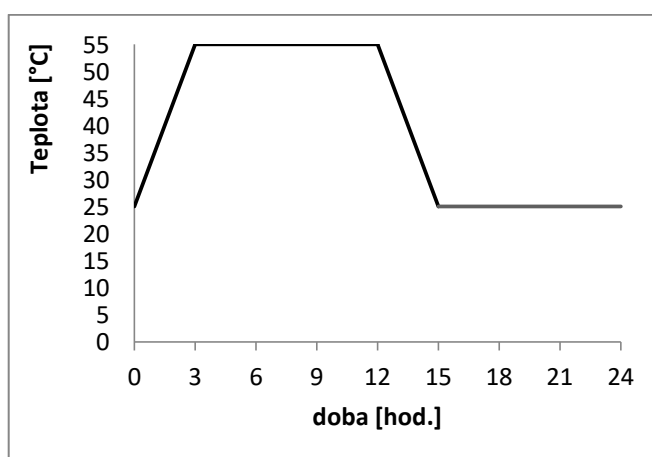
Pro testování vzorků antén byla vybrána horní teplota cyklu 55 °C s počtem 6 cyklů, protože se hledělo na provozní teploty antén udávané výrobcem.

Před testováním vzorků antén v klimatické komoře, byly změřeny požadované parametry antén v bezodrazové komoře. Před vložením do klimatické komory, byly konektory všech testovaných antén opatřeny izolační vulkanizační páskou, aby byly chráněny proti vlhkosti obr. 4.2.1.



Obr. 4.2.1 Vzorek 2 antény opatřen izolační páskou

Po vložení antén do klimatické komory, je nastavena teplota na 25 °C ± 3 K, aby se dosáhlo teplotní rovnováhy u testovaných vzorků a teploty v komoře. Po dosažení teplotní rovnováhy je nastavena relativní vlhkost na 95 %. Tolerance relativní vlhkosti je 2,5 %. Po dosažení požadované teploty a relativní vlhkosti, začne probíhat první cyklus zkoušky graf 4.2.1.



Graf 4.2.1 Průběh teploty 1 cyklus - zkoušky vlhkým teplem cyklickým

Teplota v komoře vystoupá v průběhu tří hodin k teplotě 55 °C. Teplota 55 °C je

udržována po dobu devíti hodin. Po devíti hodinách začne teplota klesat k 25 °C. Klesání teploty trvá 3 hodiny. Teplota 25 °C v komoře je ustálena po dobu devíti hodin. Následně se začne cyklus opakovat. Doba jednoho cyklu trvá 24 hodin. Po ukončení všech cyklů, následuje aklimatizační doba při teplotě 25 °C a pokles na relativní vlhkosti na 45 %. Aklimatizační doba může být 2 až 4 hodiny. Po aklimatizační době bude probíhat zkouška změnou teploty.

4.2.2 Zkouška dle ČSN EN 60068-2-14 ed. 2

Zkouška změnou teploty se zaměřuje na stanovení vlivu změny teploty, nebo řady změn teplot na testovaný vzorek. Vliv zkoušek změnou teploty je určen [60]:

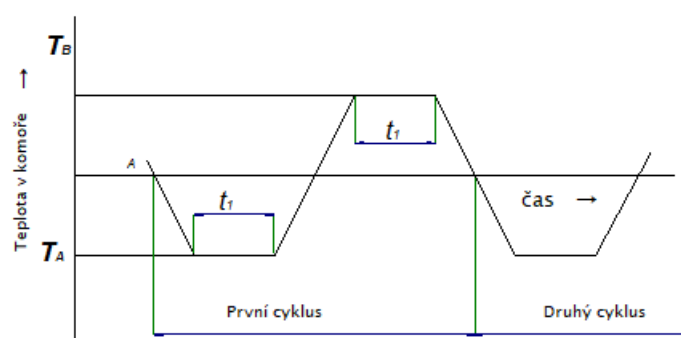
- hodnotami nízké a vysoké zkušební teploty, mezi kterými změna probíhá,
- časem expozice, po který je testovaný vzorek vystaven působení teploty,
- rychlostí změny mezi teplotami,
- počtem cyklů,
- velikostí tepla přeneseného do testovaného vzorku nebo z něho.

V normě ČSN EN 60068-2-14 ed. 2 jsou uvedeny tři postupy, jak provádět zkoušku změnou teploty. Dělíme je na:

- zkoušku s rychlou změnou teploty a předepsanou dobou přemístění,
- zkoušku se změnou teploty se stanovenou rychlostí změny teploty,
- zkouška s rychlou změnou teploty, metoda se dvěma kapalinovými lázněmi.

Pro testování byla vybrána zkouška se změnou teploty se stanovenou rychlostí změny teploty, protože před zkouškou probíhala zkouška vlhkým teplem cyklickým, tak bylo možné nastavit parametry zkoušky na klimatické komoře předem a nemusel být prováděn žádný manuální zásah při testování antén v klimatické komoře.

Pro určení nastavení teploty, rychlosti změny teploty, doby expozice vzorku a počtu cyklů, slouží stupeň přísnosti zkoušky, který je určen v normách ČSN EN 60068-2-1 a ČSN EN 60068-2-2. Na obr. 4.2.2 je znázorněn cyklus zkoušky změnou teploty při stanovené rychlosti.



Obr. 4.2.2 Zkušební cyklus při zkoušce změnou teploty při stanovené rychlosti [60]

Podle normy [60] může být rychlost změny teploty o

- 1 K/min s tolerancí $\pm 0,2$ K/min,
- 3 K/min s tolerancí $\pm 0,6$ K/min,
- 5 K/min s tolerancí ± 1 K/min,
- 10 K/min s tolerancí ± 2 K/min,
- 15 K/min s tolerancí ± 3 K/min.

Čas, po který je potřeba setrvat na dolní mezní teplotě nebo na horní mezní teplotě, je dán normou [60] a může trvat 3 hodiny, 2 hodiny, 1 hodinu, 30 minut a 10 minut.

Zkouška změnou teploty následovala po zkoušce vlhkým teplem cyklickým. Pro cyklus zkoušky byla vybrána dolní mezní teplota -40 °C a horní mezní teplota 50 °C. Cyklus zkoušky byl proveden třikrát. Teplota v komoře se měnila rychlostí 1 K/min. Při začátku zkoušky změnou teploty, byla teplota 25 °C, poté teplota klesla na hodnotu -40 °C. Po dobu 2 hodin se teplota v komoře neměnila a zůstala na teplotě -40 °C. Následovalo zvyšování teploty na 50 °C, na které teplota v komoře setrvala po dobu dvou hodin, následně klesla teplota na -40 °C. Na konci zkoušky změnou teploty vystoupala teplota na 25 °C, na které setrvala 2 hodiny za účelem aklimatizace. Vzorky antény byly následně vyndány z klimatické komory.

Podotknout lze, že antény mezi prvním měření parametrů a druhým měření parametrů, byly uskladněny v pokojové teplotě o 22 °C.

5 Zhodnocení výsledků

Kapitola je věnována porovnáním naměřených výsledků před klimatickými zkouškami a po klimatických zkouškách. Veškeré naměřené výsledky, jsou potom uvedeny v příloženém CD.

5.1 Vliv klimatických zkoušek na materiál antén

Vzorky antén 1, 2, 3, a 5 nezaznamenaly žádné viditelné mechanické zhoršení stavu po provedené řadě klimatických zkoušek.

U vzorku antény číslo 4 došlo k poškození plastové trubky. Vznikla viditelná prasklina, která je vidět na příloženém obr. 5.1.1. Z technických údajů poskytnuté výrobcem, je trubka vyrobena z plastového materiálu ABS. Podle tabulky 2.2.1 je teplotní odolnost plastového materiálu ABS od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při provádění řady klimatických zkoušek, byla anténa vystavována řadě teplotních zkoušek. Nejdříve byla provedena zkouška vlhkým teplem cyklickým, poté následovala zkouška změnou teploty. U klimatické zkoušky změnou teploty byla měněna teplota od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při nízkých teplotách mohlo dojít k vytvoření zmiňované praskliny, jelikož změna teploty byla několikrát opakována, více informací o klimatických zkouškách udává kapitola číslo 4.



Obr. 5.1.1 Porovnání stavu vzorku 4 před klimatickými zkouškami a po klimatických zkouškách

5.2 Porovnání ČSV

Tabulka 5.2.1 udává porovnání mezi hodnotami ČSV naměřených před klimatickými zkouškami a po klimatických zkouškách na kmitočtu 868 MHz. Hodnoty ČSV antén před klimatickými zkouškami jsou u vzorků antén menší než 2, akorát u vzorku číslo 1 byla naměřena hodnota ČSV téměř 3. Přitom výrobce antény udává hodnotu ČSV menší než 2. Po provedení klimatických zkoušek se hodnota ČSV nejvíce zase zvýšila u prutové antény vzorku číslo 1. Ostatní antény měly hodnotu ČSV nepatrně vyšší nebo stejnou. Hodnoty ČSV po klimatických zkouškách byly v souladu s hodnotami, které udávají výrobci, až na vzorek antény číslo 1. Vyhodnocení pro frekvenční rozsah od 850 MHz do 950 MHz, je možné pro každou anténu najít v přílohách práce.

Tab. 5.2.1 Porovnání ČSV na kmitočtu 868 MHz mezi naměřenými hodnotami před klimatickými zkouškami a po klimatických zkouškách

Anténa	Před klimatickými zkouškami	Po klimatických zkouškách
	ČSV (868 MHz) [-]	ČSV (868 MHz) [-]
Vzorek 1	2,94	4,17
Vzorek 2	1,94	1,94
Vzorek 3	1,54	1,78
Vzorek 4	1,10	1,28
Vzorek 5	1,08	1,45

5.3 Porovnání zisku

Tabulka 5.3.1 udává naměřené hodnoty zisku na frekvenci 868 MHz před klimatickou komorou a po klimatické komoře. Hodnota zisku na frekvenčním rozsahu od 850 MHz do 950 MHz je uvedena graficky v přílohách práce, popřípadě na přiloženém CD, kde jsou tabulky s číselnými hodnotami. Při měření zisku metodu tří antén, vyšly hodnoty zisku v záporných hodnotách u všech měřených antén. Nejmenší zisk vykazoval vzorek antény číslo 1, jak při prvním měření, tak i po klimatické zkoušce, kdy se tento zisk ještě zhoršil. Jedná se nejspíše o vadný výrobek. Po vlivu klimatických zkoušek se u vzorku číslo 4, zhoršila hodnota zisku. U vzorku číslo 3 zisk antény zůstat stejný. U vzorku

číslo 5 se zisk zlepšil, což mohlo být způsobeno jiným měřicím kabelem, který byl použit při měření parametrů před klimatickými zkouškami, ale také i poloze, ve které byla anténa nasměrována proti hřebené trychtýřové anténě.

Tab. 5.3.1 Porovnání zisku na kmitočtu 868 MHz mezi naměřenými hodnotami před klimatickými zkouškami a po klimatických zkouškách

Anténa	Před klimatickými zkouškami	Po klimatických zkouškách
	Zisk (868 MHz) [dBi]	ČSV (868 MHz) [dBi]
Vzorek 1	-17,81	-20,28
Vzorek 2	-6,25	-5,22
Vzorek 3	-3,1	-3,1
Vzorek 4	1,46	-1,51
Vzorek 5	-2,36	-0,63

5.4 Porovnání směrových charakteristik

U každého vzorku mikrovlnné antény byly změřeny směrové charakteristiky v rovinách E a H. Směrové charakteristiky byly změřeny před zkouškami v klimatické komoře a následně po zkouškách v klimatické komoře. Směrové charakteristiky měřených antén jsou znázorněny v přílohách této práce.

Při měření čtvrtvlnných prutových antén nastaly odlišnosti směrových charakteristik. Jedná se o vzorky antén 1, 2 a 3. Při měření těchto směrových charakteristik mohlo docházet k průtoku proudu přes vnějšík stínění koaxiálního kabelu, který se pak stává součástí zářiče. Navíc byly antény upevňovány při měření na kovový stojan, což mohlo také ovlivnit směrové charakteristiky. Pro měření těchto antén by bylo lepší, je měřit jako součást konkrétní aplikace, například kdyby anténa byla připojena ke konkrétní protiváze v podobě například rozlité země na desce plošného spoje, která by tvořila zemní rovinu.

U vzorků antén 4, 5 směrové charakteristiky po klimatických zkouškách vykazovaly malé odlišnosti v rovině E.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo seznámit čtenáře s problematikou měření parametrů mikrovlnných antén. Dále provést měření parametrů mikrovlnných antén, které pracují na frekvenci 868 MHz. Vystavit zapůjčené mikrovlnné antény klimatickým zkouškám. A po klimatických zkouškách, provést měření parametrů mikrovlnných antén. A následně porovnat naměřené parametry antén, před klimatickými zkouškami a po klimatických zkouškách.

U všech pěti zapůjčených vzorků antén, byly změřeny jejich parametry. Konkrétně se jedná o činitel stojatých vln, zisk antény a směrové či vyzařovací charakteristiky. Následně byla provedena řada klimatických zkoušek dle norem ČSN EN 60068-2-14 ed. 2 a ČSN EN 60068-2-30 ed. 2 u všech zapůjčených antén. Po klimatické řadě zkoušek, bylo opět provedeno měření zmiňovaných parametrů.

Práce se v první kapitole věnuje historickému vývoji mikrovlnných antén a bezdrátovému přenosu informace. Jsou zde nastíněny technologie pro Internet věcí. Druhá kapitola je zaměřena na izolační materiály antén. Dále se kapitola věnuje trhu s anténami, které pracují na frekvenci 868 MHz. Ve třetí kapitole je uveden popis parametrů mikrovlnných antén a jejich postupy měření. Čtvrtá kapitola se věnuje klimatickým zkouškám a pátá kapitola porovnává získané výsledky, které jsou uvedeny v přílohách této práce.

Bylo zjištěno, že po provedení klimatických zkoušek, se zhoršil parametr činitele stojatých u většiny mikrovlnných antén. Dokonce vzniklo mechanické poškození u antény vzorku 4, kde se objevila prasklina na plastové trubce vyrobené z materiálu ABS.

Pro další účely měření a zkoumání parametrů mikrovlnných antén by bylo zajímavé provést klimatické zkoušky, kde teplota se bude měnit skokem. Při klimatické zkoušce, by se například anténa vystavila teplotě pohybující se pod bodem mrazu, a následně by anténa byla vystavena vysoké teplotě.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] PROCHÁZKA, Miroslav. *ANTÉNY Encyklopedická příručka*. 3. rozšířené vydání. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 384 s. ISBN 80-7300-166-7.
- [2] FREJLACH, Karel. *Z historie radiotechniky*. České Budějovice: K. Frejlach, 1996. Edice bez názvu. ISBN 80-900-1807-6.
- [3] Heinrich Rudolf Hertz. *ConVERTER* [online]. [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/fyzici/hertz-heinrich.htm>
- [4] MAZÁNEK, Miloš a Pavel PECHAČ. *Šíření elektromagnetických vln a antény*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-3032-6.
- [5] PECHAČ, Pavel a Stanislav ZVÁNOVEC. *Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů*. Praha: BEN - technická literatura, 2007. ISBN 978-80-7300-223-7.
- [6] MAZÁNEK, Miloš, Pavel PECHAČ a Jan VRBA. *Základy antén, šíření vln a mikrovlnné techniky*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03997-7.
- [7] MAYER, Daniel. *Pohledy do minulosti elektrotechniky: objevy, myšlenky, vynálezy, osobnosti*. České Budějovice: Kopp, 1999. ISBN 80-723-2092-0.
- [8] *Principy digitální mikrovlnné komunikace* [online]. 2010 [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: <http://www.alcoma.cz/media/document/2-manual-cz-principy-digitalni-mikrovlne-komunikace-2.1.pdf>
- [9] MINOLI, Daniel. *Building the internet of things with IPv6 and MIPv6: the evolving world of M2m communications* [online]. Hoboken, New Jersey: Wiley, [2013] [cit. 2019-04-06]. ISBN 978-111-8473-474. Dostupné z: <http://repo.desakupemalang.id/materi/Internet-of-Things/Building%20the%20Internet%20of%20Things%20with%20IPv6%20and%20MIPv6%20%282013%29%20by%20Daniel%20Minoli.pdf>
- [10] Co je IoT?. *IoT portál* [online]. [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://www.iiot-portal.cz/co-je-iiot/>
- [11] DAVID, Štěpán. *Internet of Things*. Praha, 2018. Diplomová práce. Vysoká škola ekonomická v Praze. Vedoucí práce Antonín Pavlíček.
- [12] BUBÍLEK, Aleš. *Využití technologie IoT*. Plzeň, 2018. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Masopust Jiří.
- [13] *Internet věcí v ČR vyvíjí Jablotron a CZ.NIC* [online]. [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://www.elektrina.cz/turris-a-internet-veci>

- [14] *Internet věcí - Pavel Pohanka* [online]. [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <http://i2ot.eu/internet-of-things/>
- [15] MEKKI, Kais, Eddy BAJIC, Frederic CHAXEL a Fernand MEYER. *A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment* [online]. [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517302953>
- [16] *LoRaWAN: A technical overview of LoRa and LoRaWAN* [online]. [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>
- [17] *About LoRa Alliance™* [online]. [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://lora-alliance.org/about-lora-alliance>
- [18] *LoRaWAN* [online]. 26. 2. 2016 [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://www.iot-portal.cz/2016/02/29/lorawan/>
- [19] MÁCHA, Miroslav. *LoRa Technology* [online]. [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/8732-lora-technology.html>
- [20] *Objevte svět IoT* [online]. [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://www.cra.cz/objevte-svet-iot>
- [21] *Internet věcí - bezdrátově s velkým dosahem: LoRa, LoRaWAN* [online]. [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: www.raycom.cz/data/article/filemanager/LoRa.pdf
- [22] MIKULÁŠEK, Michal. *BEZDRÁTOVÁ SENZORICKÁ SÍŤ VYUŽÍVAJÍCÍ LORA TECHNOLOGII*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické V Brně. Vedoucí práce Vladislav Škorpil.
- [23] *Sigfox, a 0G Network: Connecting Your Physical World* [online]. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://www.sigfox.com>
- [24] *Sigfox: Aktuální pokrytí v ČR* [online]. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://simplecell.eu/technologie-sigfox/>
- [25] *Služby IoT - Připojíme vaše chytrá zařízení k internetu* [online]. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://www.cra.cz/sluzby-iot>
- [26] *Seznamte se: Síť Sigfox začíná měnit svět kolem nás. Doma i v průmyslu: Sigfox v ČR* [online]. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://www.svetchytre.cz/a/pAcDD/seznamte-se-sit-sigfox-zacina-menit-svet-kolem-nas-doma-i-v-prumyslu>
- [27] *Simplecell* [online]. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://simplecell.eu/>

- [28] *Oživujeme věci: Vytváříme IoT revoluci!* [online]. [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: <https://www.simplecell.eu/wp-content/uploads/2014/08/Sigfox-SimpleCell-Brozura.pdf>
- [29] ŘEHOŘÍK, Vojtěch. *Internet věcí na platformě Arduino*. Plzeň, 2018. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Jaroslav Freisleben.
- [30] VOJÁČEK, Antonín. *SIGFOX - princip, struktura, protokol, použití* [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/sigfox-princip-struktura-protokol-pouziti.html>
- [31] *Internet of Things (2.část) – Technologie pro bezdrátový přenos dat* [online]. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/internet-of-things-2cast-technologie-pro-bezdratovy-prenos-dat.html>
- [32] *We develop and deliver the IQRF* [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://www.iqrf.tech/>
- [33] *IQRF Alliance: Do it wireless* [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://www.iqrfalliance.org/alliance>
- [34] *Technology for wireless: Connecting devices to IoT via wireless mesh networks* [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://www.iqrf.org/>
- [35] *IQRF* [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://www.iot-portal.cz/2017/11/27/iqrf/>
- [36] *TR-72D-WMB series: Transceiver for Wireless M-Bus* [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://www.iqrf.org/products/transceivers/tr-72d-wmb>
- [37] SPURNÁ, Ivona. *Bezdrátová technologie IQRF (3)* [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: https://www.atpjournals.sk/rubriky/prehladove-clanky/bezdratova-technologie-iqrf-3.html?page_id=23653
- [38] RAMBOUSEK, Adam. *Historie mobilní komunikace* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: https://www.fi.muni.cz/usr/jkucera/pv109/2003/xrambous_index.htm
- [39] *Historie elektřiny a magnetizmu: Z historie antén* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: www.crk.cz/FILES/VR-ANT/49.%20Šroubovicové%20antény%20pro%20přenosné%20a%20mobilní%20radiostanice.pdf
- [40] *Dr. HAROLD HENRY BEVERAGE* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://ok1ike.c-a-v.com/soubory/beverage.htm>
- [41] PAVELEC, Miroslav. *Vliv vnějšího prostředí na parametry mikrovlnných antén*. Plzeň, 2015. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Petr Kašpar.

- [42] KASAL, Miroslav. *SMĚROVÉ A DRUŽICOVÉ SPOJE: Přednášky* [online]. Brno: FEKT VUT Brno, 2003 [cit. 2019-05-02]. ISBN 80-214-2496-6. Dostupné z: www.urel.feec.vutbr.cz/~sebestaj/MRAR/SDS.pdf
- [43] *Microwave Link Networks* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: https://ethw.org/Microwave_Link_Networks
- [44] *Mikrovlnné spoje* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://ttc-marconi.com/produkty-a-sluzby/mikrovlnne-spoje/>
- [45] MATUSZCZYK, Jacek. *Antény prakticky: BE*. 3. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-178-0.
- [46] MRÁZ, Jan. *Radiotechnická měření v bezodrazové komoře*. Plzeň, 2005. Diplomová. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Jiří Masopust.
- [47] JORDAN, Karel. *Stojaté vlny* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://ok1like.c-a-v.com/soubory/stojvlny.htm>
- [48] *ANT-868-CW-QW-SMA* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/Linx-Technologies/ANT-868-CW-QW-SMA?qs=XYAu1o%252BHdOJJXtkpS%252BSVYw%3D%3D>
- [49] *SW868-ZT100* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/item/4pcs-NiceRF-SW433-ZT100-868MHz-Straight-Rod-Rubber-Antenna-Free-Shipping/32382009209.html>
- [50] *SW868-WT100* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://arduino-shop.cz/arduino/2126-868mhz-uhlova-prutova-antena-sw868-wt100-100-mm.html>
- [51] *SD868L - Outdoor Antena* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: http://eshop.loratech.cz/index.php?id_product=13&controller=product&id_lang=1
- [52] *2J200GP-600RG58-C91N* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.soselectronic.cz/products/2j2j200gp-600rg58-c91n-183508>
- [53] *Elektrotechnická laboratoř - ETL* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.rice.zcu.cz/cz/services/ETL/index.html>
- [54] *Double Ridged Horn Antenna* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.schwarzbeck.de/en/component/content/article/10-antennas/15-double-ridged-horn-antenna.html>
- [55] LIBOR, Havlíček. *Vektorový analyzátor: co ukryvá, k čemu slouží a jak jej správně používat* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/testovani-a-mereni/vektorovy-analyzator-co-ukryva-k-cemu-slouzi-a-jak-jej-spravne-pouzivat.html>

- [56] ROTH, Jan. *Realizace logaritmicko-periodické antény pro IV. - V. televizní pásmo*. Plzeň, 2011. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Jan Mráz.
- [57] *Klimatické a tepelné zkoušky* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: https://www.rice.zcu.cz/cz/services/ETL/services/clima_tests.html
- [58] *Rekordy počasí* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.meteocentrum.cz/zajimavosti/encyklopedie/rekordy-pocasi>
- [59] ČSN EN 60068-2-30. *Zkoušení vlivů prostředí: Část 2-30: Zkoušky - Zkouška Db: Vlhké teplo cyklické (cyklus 12 h + 12 h)*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [60] ČSN EN 60068-2-14 ED. 2. *Zkoušení vlivů prostředí: Část 2-14: Zkoušky - Zkouška N: Změna teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [61] *Šroubovicová anténa* [online]. [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: <http://www.technika.ilcik.cz/garmin-gpsmap-60csx/co-je-lepsi-helix-nebo-patch.html>
- [62] *Vlastnosti plastů* [online]. [cit. 2019-05-26]. Dostupné z: <https://www.verkon.cz/vlastnosti-plastu/>
- [63] *ALCOMA* [online]. [cit. 2019-05-26]. Dostupné z: <http://www.alcoma.cz/>
- [64] *O společnosti Jirous s.r.o.* [online]. [cit. 2019-05-26]. Dostupné z: <http://cz.jirous.com/o-firme>
- [65] *NiceRF* [online]. [cit. 2019-05-26]. Dostupné z: https://www.nicerf.com/about_123.html
- [66] *About Linx* [online]. [cit. 2019-05-26]. Dostupné z: <https://linxtechnologies.com/wp/company/about-linx/>
- [67] *NiceRF 868MHz anténa - prutová SW868-ZT48 48mm* [online]. [cit. 2019-05-26]. Dostupné z: <https://arduino-shop.cz/arduino/3171-nicerf-868mhz-antena-prutova-sw868-zt48-48mm.html>
- [68] *PulseLarsen Antennas W1063* [online]. [cit. 2019-05-26]. Dostupné z: <https://www.digikey.cz/product-detail/en/pulselarsen-antennas/W1063/553-1474-ND/1634416>
- [69] *ABRACON AEACAQ190012-S868* [online]. [cit. 2019-05-26]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/ABRACON/AEACAQ190012-S868?qs=fAHHVMwC%252BbiTEyIee5CBNg%3D%3D>

- [70] *Taoglas TI.08.A.0111* [online]. [cit. 2019-05-26]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/Taoglas/TI08A0111?qs=sGAEpiMZZMuBT KBKvsBmlLx6Cy%252ByiIEyzdujqJ4mTRM%3D>
- [71] *DELTA22A/X/SMAM/S/S/20 - Prutová Anténa* [online]. [cit. 2019-05-26]. Dostupné z: https://cz.farnell.com/siretta/delta22a-x-smam-s-s-20/868mhz-ism-band-115mm-small-antenna/dp/3020309?MER=bn_search_2TP_LastViewed_2
- [72] *LPRS ANT-WP868SMA-Y* [online]. [cit. 2019-05-26]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/LPRS/ANT-WP868SMA-Y?qs=j%252B1pi9TdxUYgTZia3%252BBYYA%3D%3>

Seznam příloh

PŘÍLOHA A - VZOREK 1	I
PŘÍLOHA B - VZOREK 2.....	III
PŘÍLOHA C - VZOREK 3.....	V
PŘÍLOHA D - VZOREK 4	VII
PŘÍLOHA E - VZOREK 5.....	IX

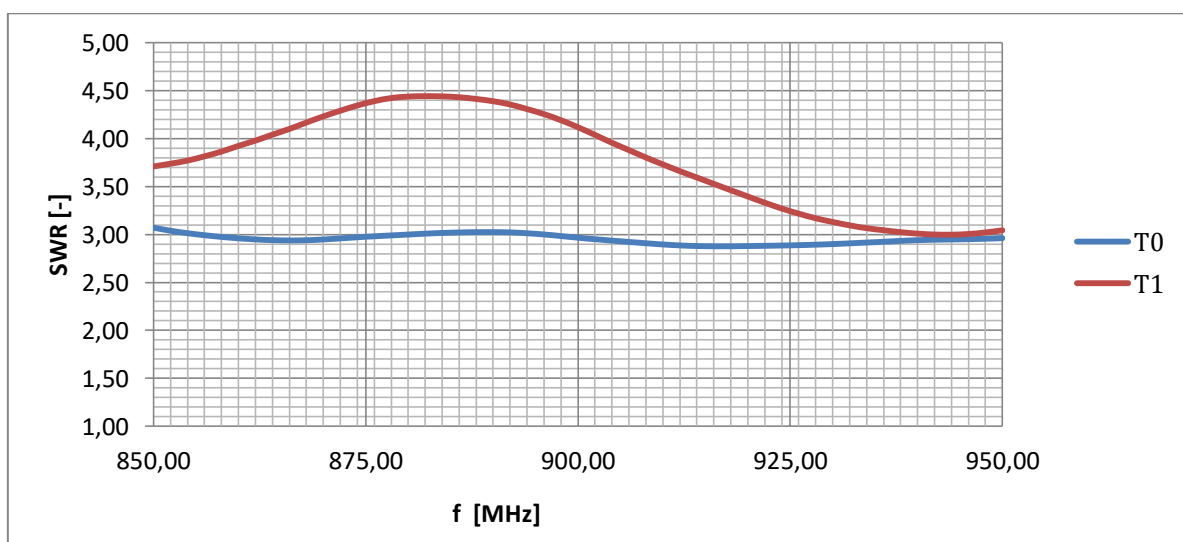
PŘÍLOHA A - vzorek 1



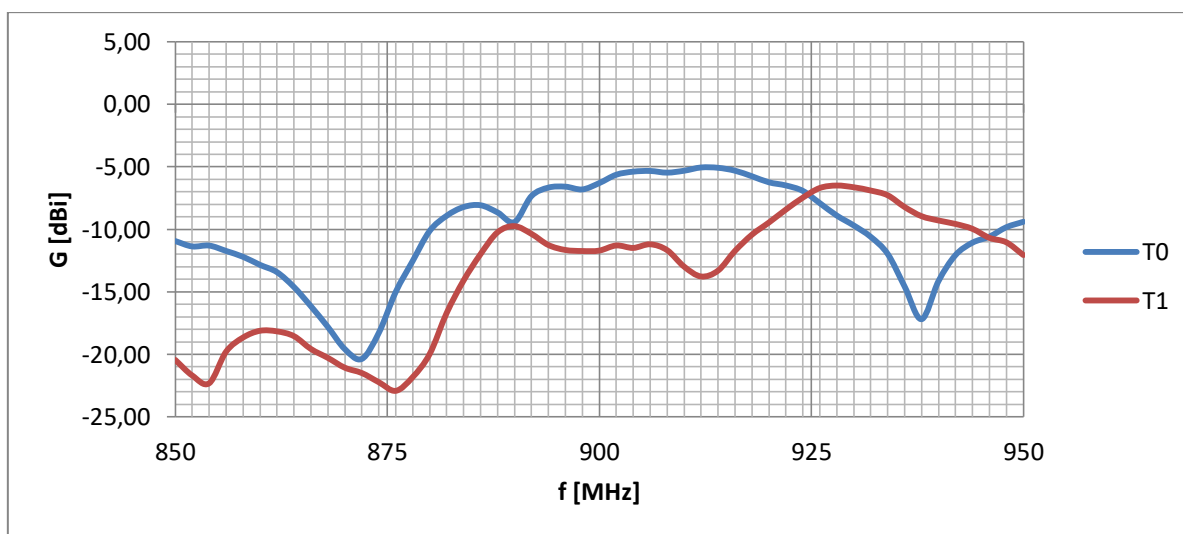
Vzorek 1	SWR [-]	Frekvence
Měřeno před komorou	2,94	868
Měřeno po komoře	4,17	868

Vzorek 1	G [dBi]	Frekvence [MHz]
Měřeno před	-17,81	868
Měřeno po komoře	-20,28	868

Porovnání ČSV:



Porovnání zisku:

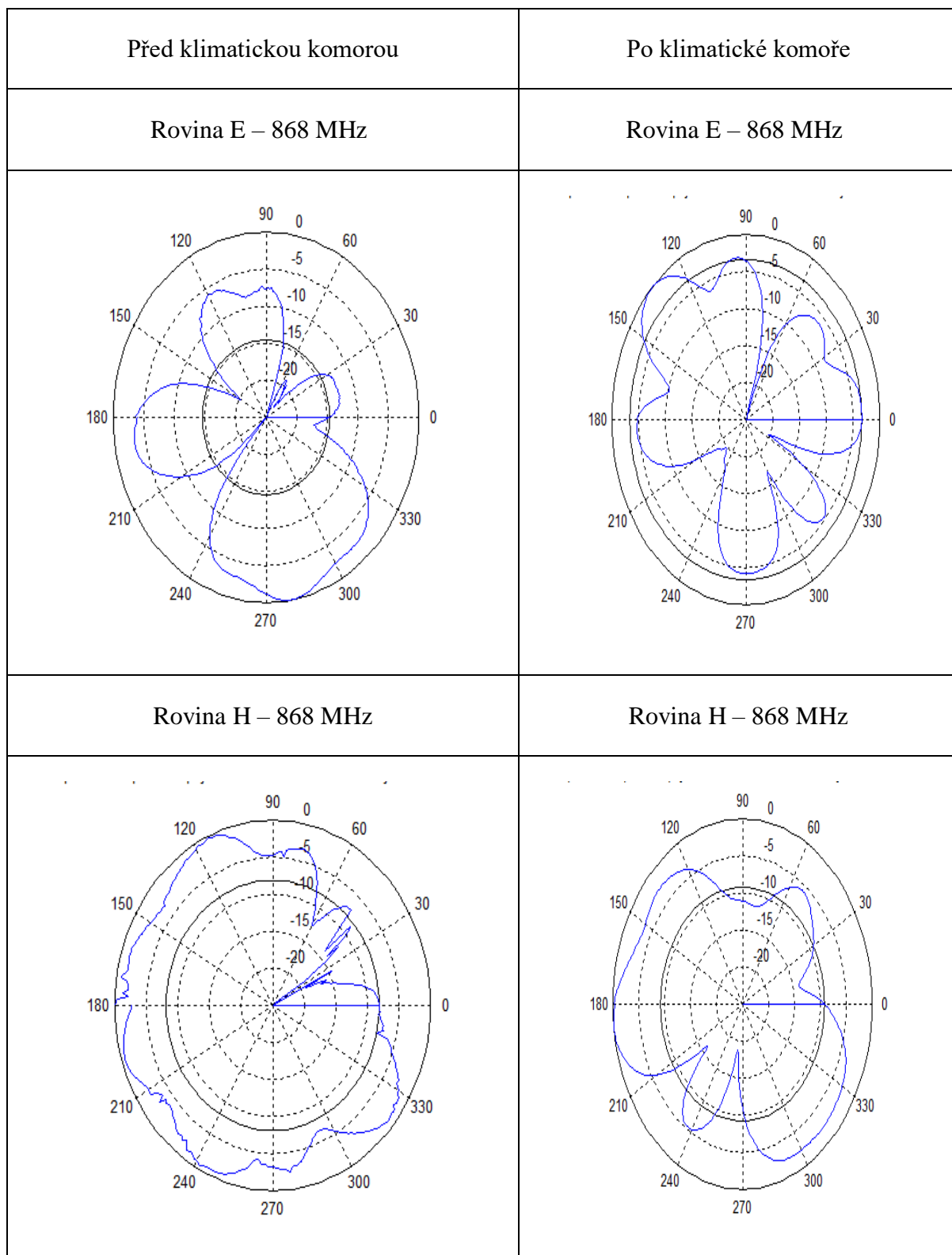


Legenda:

T0 – měření v čase před klimatickou zkouškou

T1 – měření v čase po klimatické zkoušce

Směrové charakteristiky – vzorek 1:



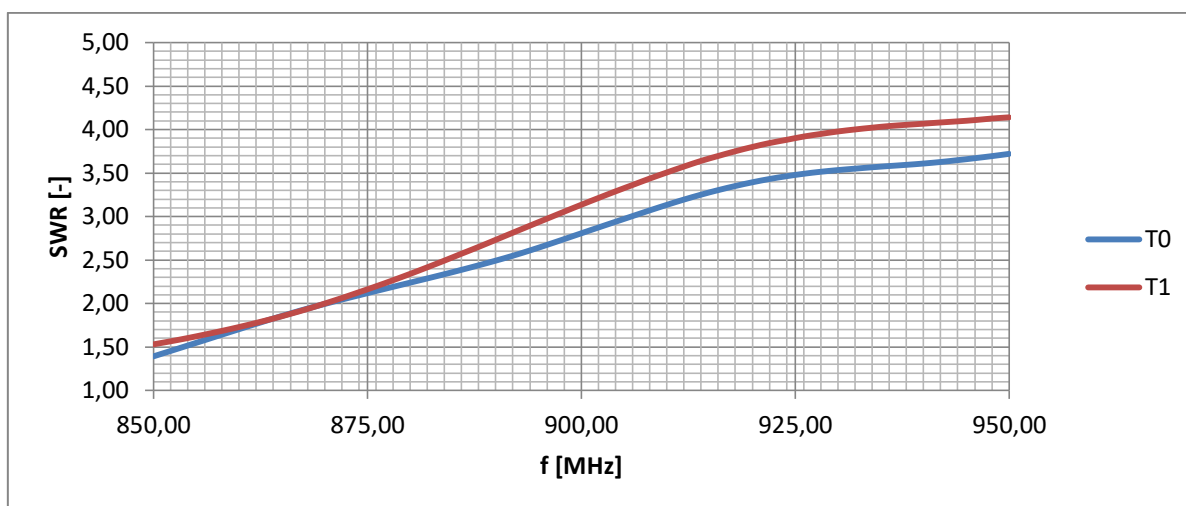
PŘÍLOHA B - vzorek 2



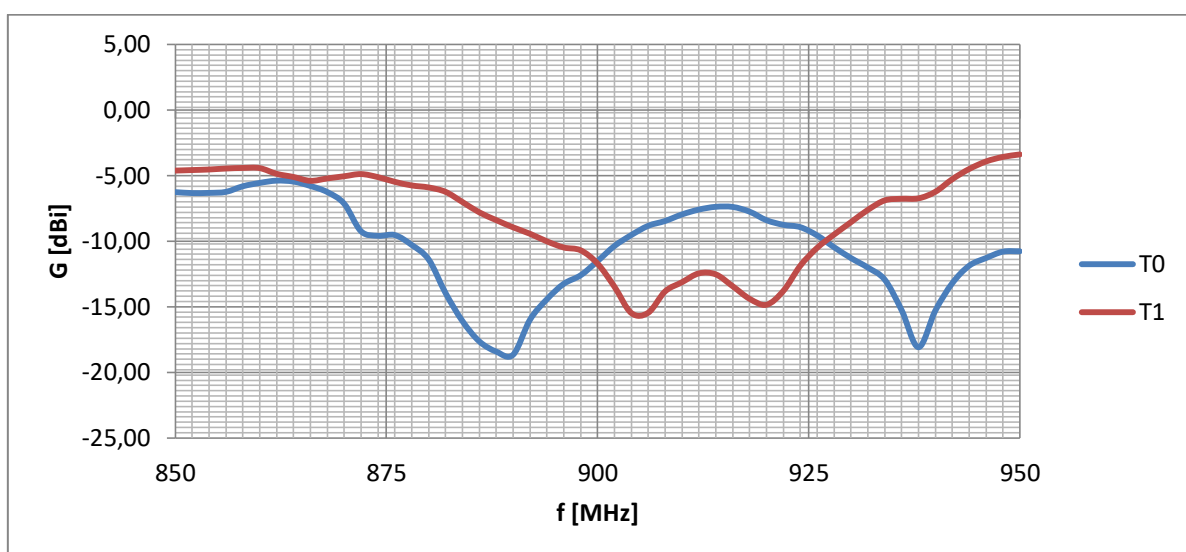
Vzorek 2	SWR [-]	Frekvence
Měřeno před komorou	1,94	868
Měřeno po komoře	1,94	868

Vzorek 2	G [dBi]	Frekvence
Měřeno před komorou	-6,25	868
Měřeno po komoře	-5,22	868

Porovnání ČSV:



Porovnání zisku:

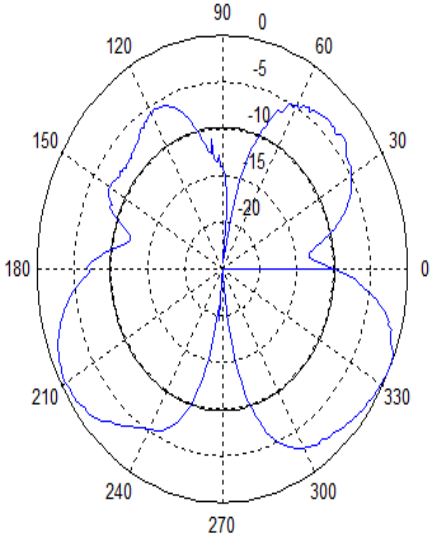
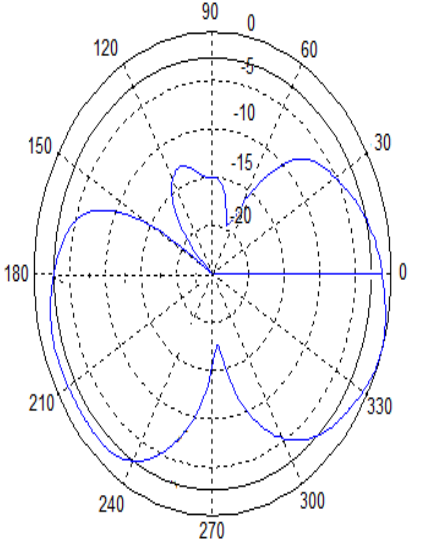
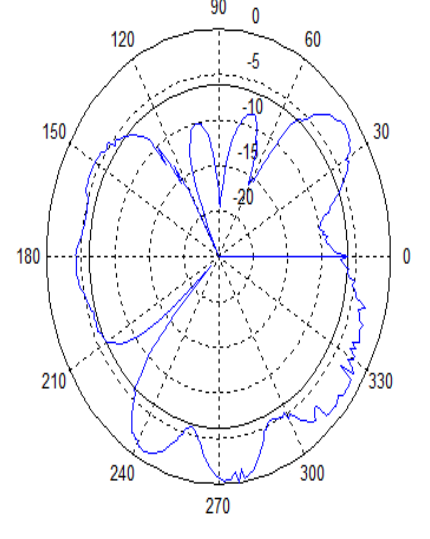
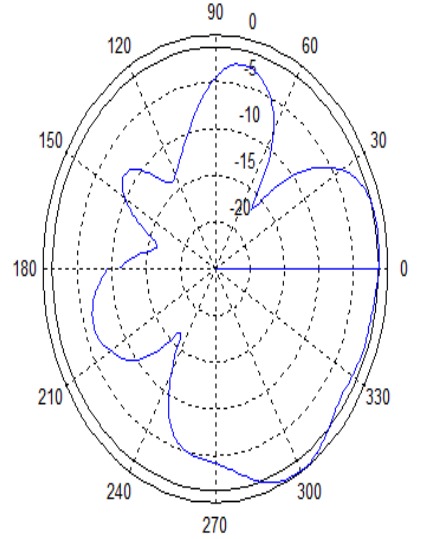


Legenda:

T0 – měření v čase před klimatickou zkouškou

T1 – měření v čase po klimatické zkoušce

Směrové charakteristiky – vzorek 2:

Před klimatickou komorou	Po klimatické komoře
Rovina E – 868 MHz	Rovina E – 868 MHz
	
Rovina H – 868 MHz	Rovina H – 868 MHz
	

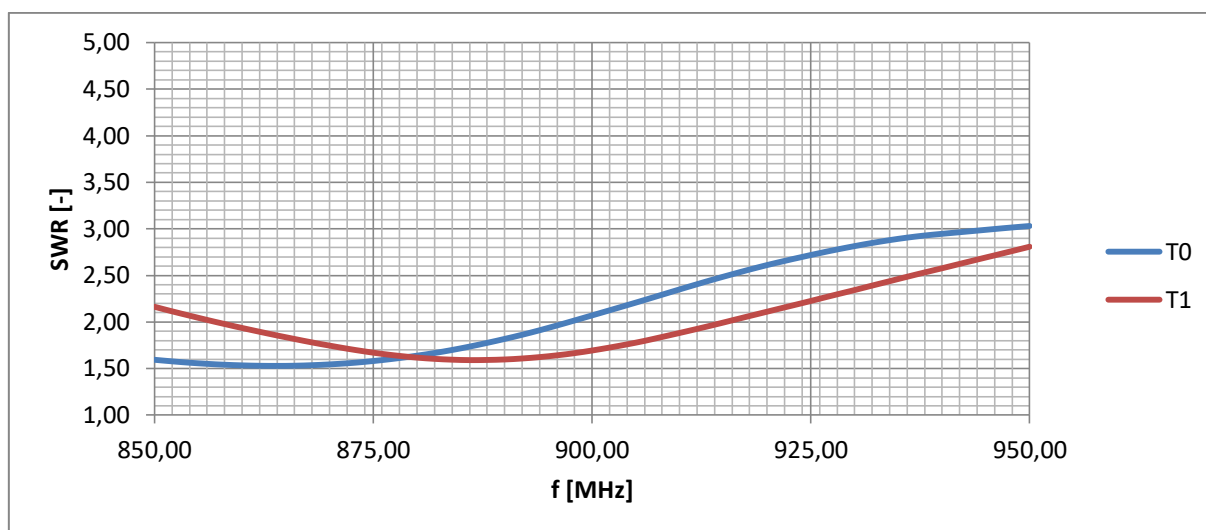
PŘÍLOHA C - vzorek 3



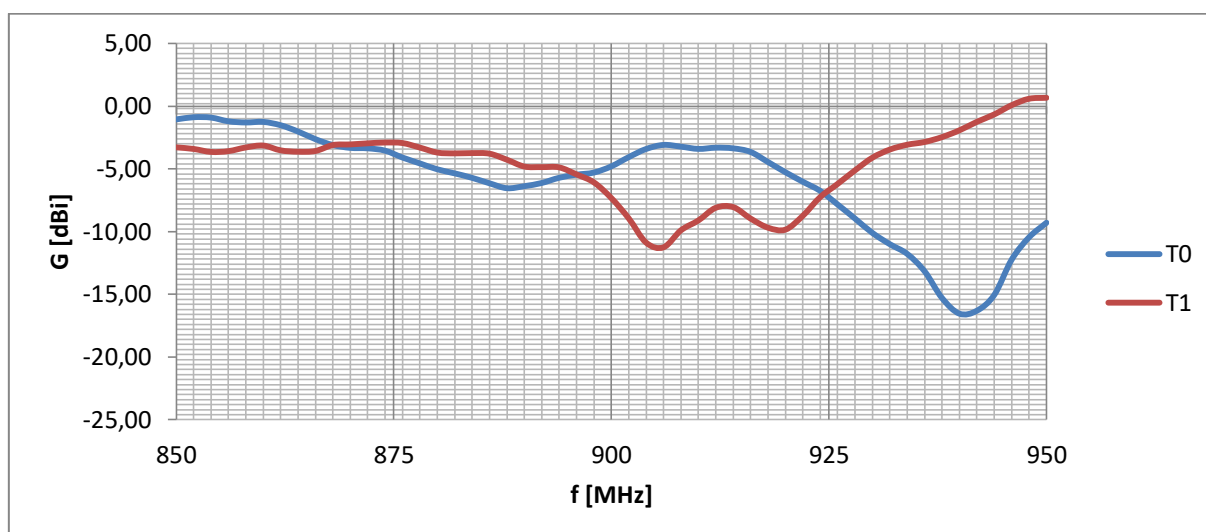
Vzorek 3	SWR [-]	Frekvence
Měřeno před komorou	1,54	868
Měřeno po komoře	1,78	868

Vzorek 3	G [dBi]	Frekvence
Měřeno před komorou	-3,1	868
Měřeno po komoře	-3,1	868

Porovnání ČSV:



Porovnání zisku:

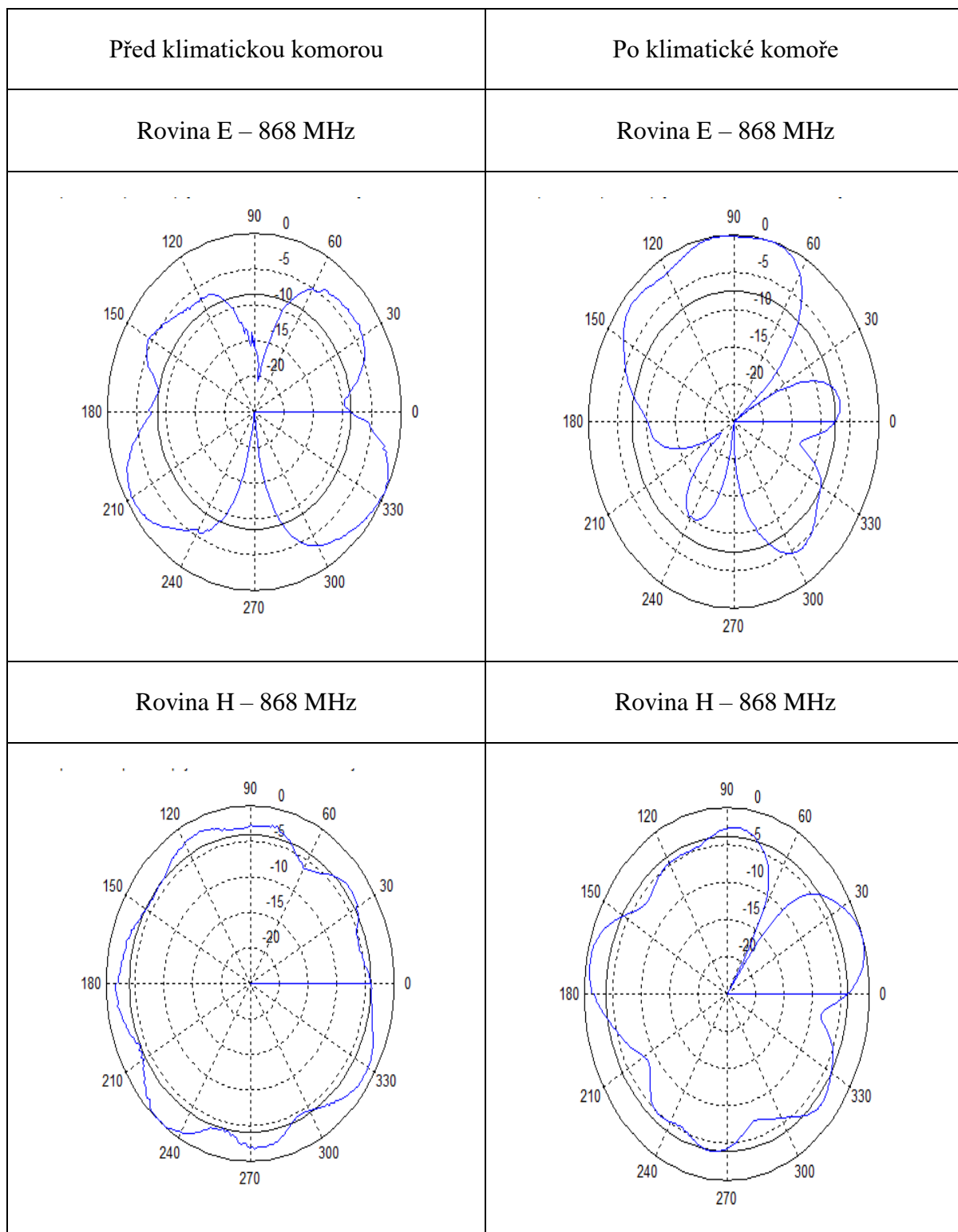


Legenda:

T0 – měření v čase před klimatickou zkouškou

T1 – měření v čase po klimatické zkoušce

Směrové charakteristiky – vzorek 3:



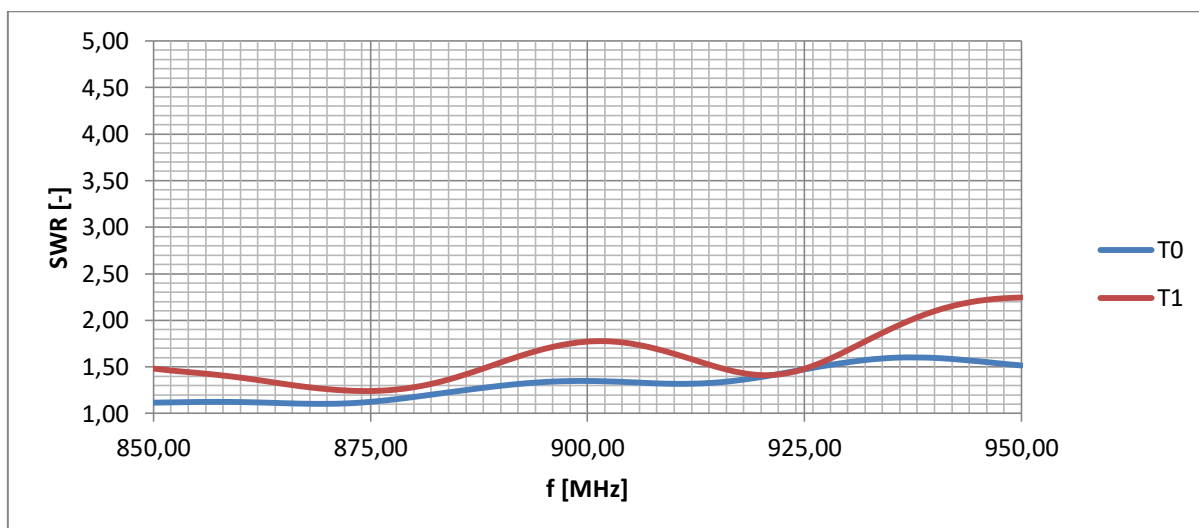
PŘÍLOHA D - vzorek 4



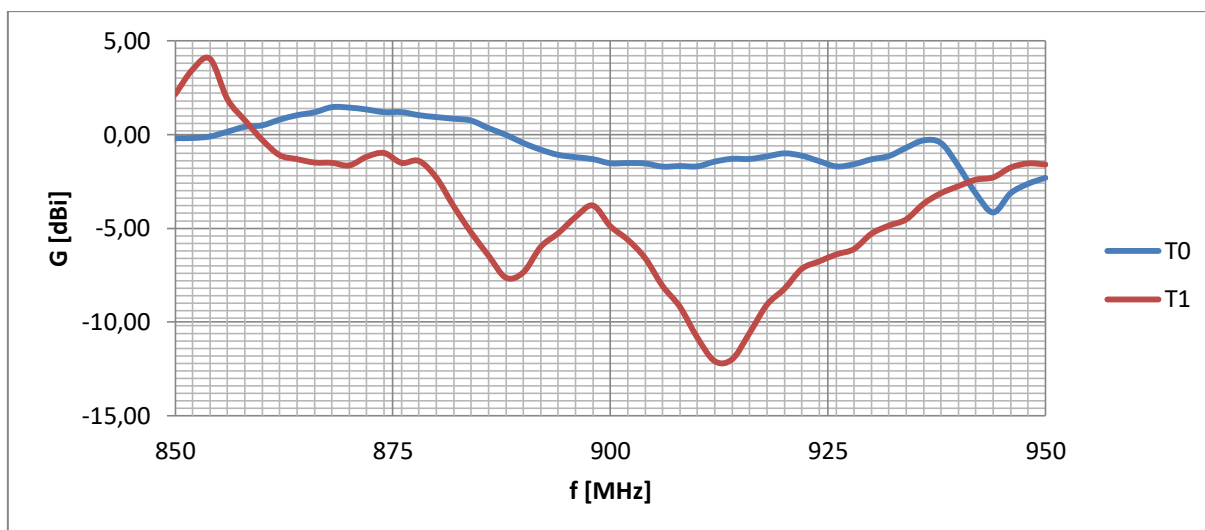
Vzorek 4	SWR	Frekvence
Měřeno před komorou	1,10	868
Měřeno po komoře	1,28	868

Vzorek 4	G [dBi]	Frekvence
Měřeno před komorou	1,46	868
Měřeno po komoře	-1,51	868

Porovnání ČSV:



Porovnání zisku:

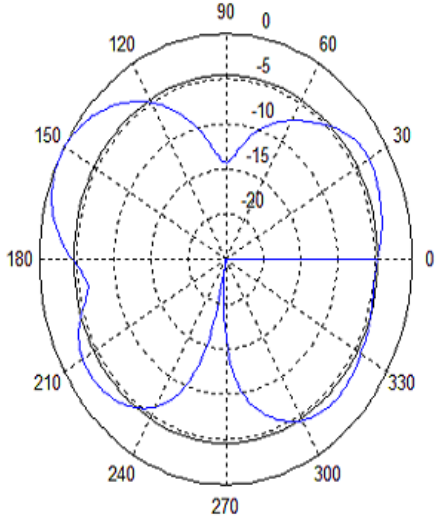
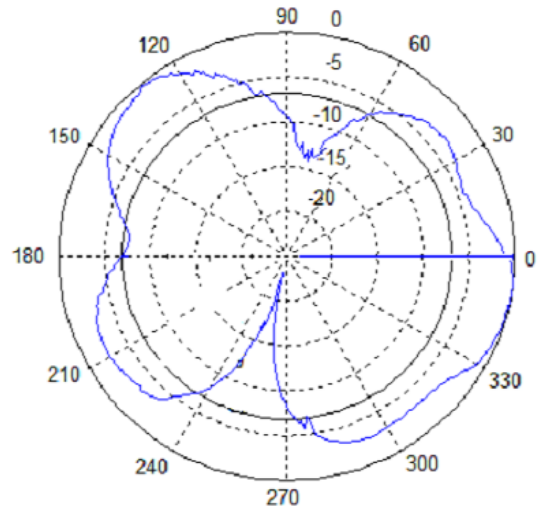
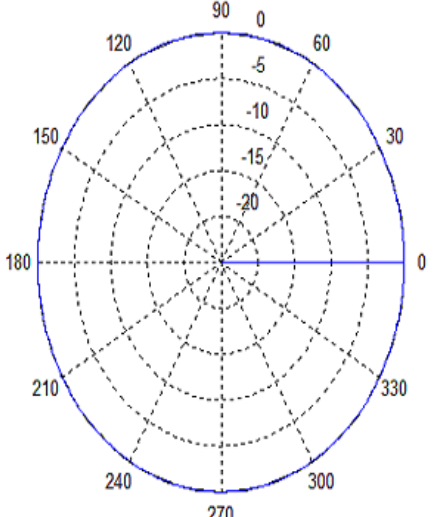
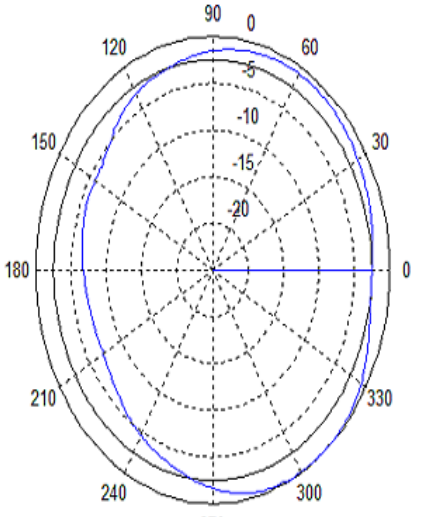


Legenda:

T0 – měření v čase před klimatickou zkouškou

T1 – měření v čase po klimatické zkoušce

Směrové charakteristiky – vzorek 4:

Před klimatickou komorou	Po klimatické komoře
Rovina E – 868 MHz	Rovina E – 868 MHz
	
Rovina H – 868 MHz	Rovina H – 868 MHz
	

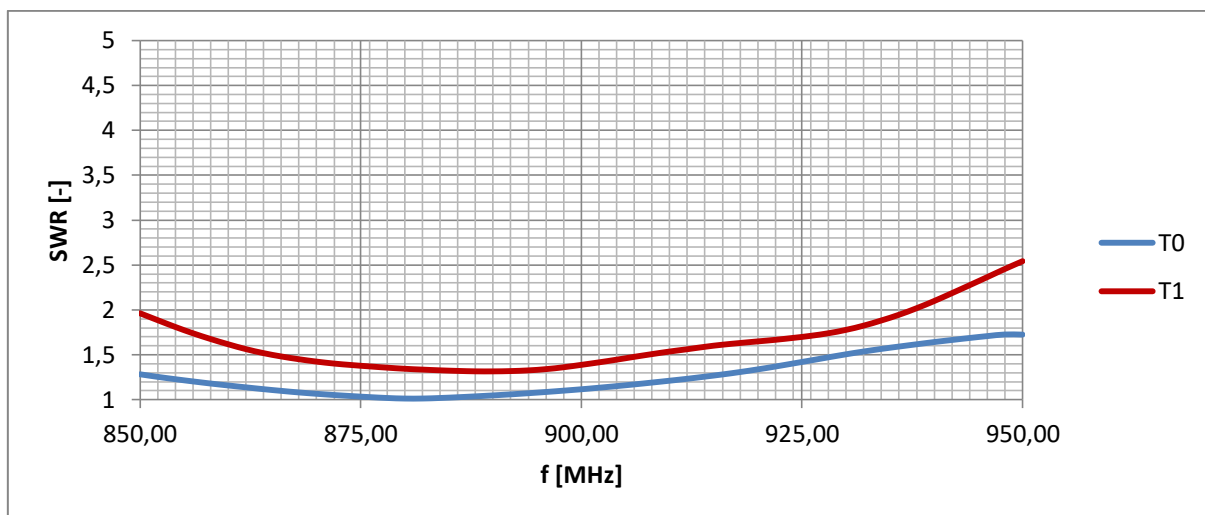
PŘÍLOHA E - vzorek 5



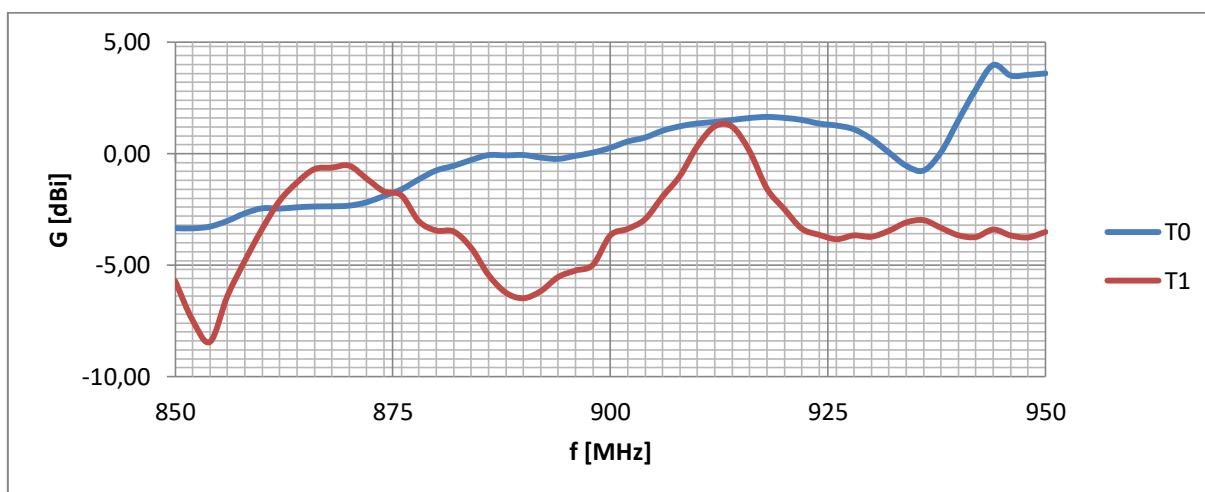
Vzorek 5	SWR [-]	Frekvence
Měřeno před komorou	1,08	868
Měřeno po komoře	1,45	868

Vzorek 5	G [dBi]	Frekvence
Měřeno před komorou	-2,36	868
Měřeno po komoře	-0,63	868

Porovnání ČSV:



Porovnání zisku:



Legenda:

T0 – měření v čase před klimatickou zkouškou

T1 – měření v čase po klimatické zkoušce

Směrové charakteristiky – vzorek 5:

Před klimatickou komorou	Po klimatické komoře
Rovina E – 868 MHz	Rovina E – 868 MHz
Rovina H – 868 MHz	Rovina H – 868 MHz