

## SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE Fakulta elektrotechniky a informatiky

Ing. Kornel Lisý

Autoreferát dizertačnej práce

## VYSOKOFREKVENČNÉ ELEKTROMAGNETICKÉ VLASTNOSTI ELEKTRONICKÝCH KOMPOZITNÝCH MATERIÁLOVÝCH ŠTRUKTÚR

na získanie akademického titulu doktor ("philosophiae doctor", v skratke "PhD.")

v doktorandskom študijnom programe: Teoretická elektrotechnika

v študijnom odbore: Elektrotechnika

Forma štúdia: denná

Miesto a dátum: Bratislava, august 2021



**Dizertačná práca** bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave elektrotechniky Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave

Predkladateľ:	<b>Ing. Kornel Lisý</b> Ústav elektrotechniky Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava
Školiteľ:	<b>doc. Ing. Rastislav Dosoudil, PhD.</b> Ústav elektrotechniky Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava
Oponenti:	

Autoreferát bol rozoslaný dňa: .....

na Fakulte elektrotechniky a informatiky
 Slovenská technická univerzita v Bratislave
 Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, miestnosť .....

prof. Dr. Ing. Miloš Oravec dekan fakulty

## Obsah

Zoznam použitých skratiek	. 2
Zoznam použitých symbolov	. 3
Úvod	. 6
1. Ciele a tézy dizertačnej práce	. 7
2. Kompozitné materiálové štruktúry	. 7
2.1. Typy kompozitov	. 8
2.1.1. Dvojzložkové kompozity	. 8
2.1.2. Viaczložkové (hybridné) kompozity	. 8
2.2. Plnivá do kompozitov	. 8
2.2.1. Feritové plnivá	. 8
2.2.2. Kovové feromagnetické plnivá	. 9
2.2.3. Uhlíkové plnivá	. 9
2.2.3.1. Alotropické modifikácie uhlíka	. 9
2.2.4. Hybridné plnivá	11
2.3. Matrice kompozitov	11
2.3.1. Polymérna matrica	12
3. Vybrané vysokofrekvenčné elektromagnetické vlastnosti kompozitných materiálov	12
3.1. Elektrické vlastnosti	14
3.1.1. Elektrická konduktivita	14
3.2. Dielektrické vlastnosti	15
3.2.1. Komplexná permitivita	15
3.3. Magnetické vlastnosti	17
3.3.1. Komplexná permeabilita	17
3.4. Absorpčné vlastnosti	20
4. Meranie materiálových parametrov	23
4.1. Meranie elektrickej konduktivity resp. rezistivity	23
4.2. Meranie frekvenčných závislostí komplexnej permitivity a permeability	23
4.2.1. Meranie komplexnej permitivity	24
4.2.2. Meranie komplexnej permeability	25
5. Naplnenie téz v kontexte publikovaných príspevkov	26
5.1. Príspevok I	26
5.2. Príspevok II	26
5.3. Príspevok III	27
5.4. Príspevok IV	28
5.5. Príspevok V	28
5.6. Príspevok VI	29
5.7. Príspevok VII	30
6. Prínosy dizertačnej práce a možné aplikácie získaných poznatkov	31
7. Prehľad súvisiacich príspevkov, konferencií a vedeckých projektov	32
Záver	34
Literatúra	37
Summary	39

# Zoznam použitých skratiek

AFD	publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách		
AFH	abstrakty príspevkov z domácich konferencií		
APC-7	precízny 7 mm konektor (Amphenol Precision Connector)		
С	uhlík (chemický prvok)		
CB	uhlíkové sadze (Carbon Black)		
CI	karbonylové železo (Carbonyl Iron)		
CF	uhlíkové vlákna (Carbon Fibres)		
CNF	uhlíkové nanovlákna (Carbon Nano Fibres)		
CNTs	uhlíkové nanotrubice (Carbon Nano Tubes)		
Co	kobalt (chemický prvok)		
EM	elektromagnetický		
EMI	elektromagnetická interferencia (EM rušenie)		
ESD	elektrostatický výboj (Electrostatic Discharge)		
Fe	železo (chemický prvok)		
FeSiAl	ferosilícium		
ΙΟ	integrovaný obvod		
IR	infračervená oblasť (Infra Red)		
LED	elektroluminiscenčná dióda – svetelná dióda (Light Emitting Diode)		
Li	lítium (chemický prvok)		
LiZn	lítno-zinočnatý napr. ferit		
LiZnTi	LiZn ferit substituovaný titánom		
Mn	mangán (chemický prvok)		
MnZn	mangánato-zinočnatý		
MW	mikrovlnná oblasť (Micro-Wave) 300 MHz – 3 GHz		
MWCNTs	mnohostenné uhlíkové nanotrubice (Multi-Walled Carbon Nano Tubes)		
NBR	prírodný butadiénový kaučuk (Natural Butadiene Rubber)		
NF	nízke frekvencie, nízkofrekvenčný, frekvenčné pásmo približne do 3 MHz		
Ni	nikel (chemický prvok)		
NiZn	nikelnato-zinočnatý		
OLED	organické LED technológie		
PE	polyetylén		
PMMA	polymetylmetakrylát		
PVC	polyvinylchlorid		
RF	rádiofrekvenčný (Radio Frequency)		
RX	prijímač (Receiver)		
SWCNTs	jednostenné uhlíkové nanotrubice (Single-Walled Carbon Nano Tubes)		
TX	vysielač (Transceiver)		
UHF	Ultra-High Frequency – oblasť veľmi vysokých frekvencií (300 MHz – 3 GHz)		
UV	ultrafialová (Ultraviolet) oblasť		
VF	vysoké frekvencie, vysokofrekvenčný, frekvenčné pásmo c ca 3 $\rm MHz-300~GHz$		
VIS	viditeľná (visible) oblasť		
VVF	pásmo veľmi vysokých frekvencií (300 MHz – 3 GHz)		
WiFi	komunikačný štandard (Wireless Fidelity)		
YIG	ytriový granát (Yttrium Iron Garnet) – mikrovlnný ferit		
Zn	zinok (chemický prvok)		

# Zoznam použitých symbolov

absorpčný útlm
parameter charakterizujúci šírku relaxačného spektra alebo konštanta v pohybovej rovnici vektora magnetizácie v doménach (určuje rezonančný resp. relaxačný charakter priebehu)
parameter charakterizujúci asymetriu disperznej krivky alebo koeficient tlmenia v pohybovej rovnici doménovej steny
indukcia magnetického poľa
fázor indukcie magnetického poľa
rotujúci fázor indukcie magnetického poľa
fázor-vektor indukcie magnetického poľa
magnetizačná krivka
okamžitá hodnota magnetickej indukcie
maximálna hodnota (amplitúda) fázora magnetickej indukcie
vonkajší priemer toroidnej vzorky
rýchlosť svetla
vnútorný priemer toroidnej vzorky
kapacita kondenzátora
kapacita vzduchového kondenzátora
fulerén tvorený šesť desiatimi atómami uhlíka
vnútorný priemer toroidnej vzorky
hrúbka absorbátora
optimálna hrúbka absorbátora
vonkajší priemer toroidnej alebo diskovej vzorky
indukcia elektrického poľa
fázor indukcie elektrického poľa
rotujúci fázor indukcie elektrického poľa
fázor-vektor indukcie elektrického poľa
okamžitá hodnota elektrickej indukcie
polarizačná krivka
vnútorný priemer toroidnej vzorky
vonkajší priemer toroidnej vzorky
maximálna hodnota (amplitúda) fázora elektrickej indukcie
stratový uhol alebo hĺbka vniku
stratový uhol pri elektrickej indukcii
stratový uhol v prípade magnetickej indukcie
šírka pásma absorpcie
intenzita elektrického poľa
fázor intenzity elektrického poľa
rotujúci fázor intenzity elektrického poľa
fázor-vektor intenzity elektrického poľa
vektor intenzity elektrického poľa

E(t)	okamžitá hodnota intenzity elektrického poľa
$E_0$	intenzita elektrického poľa (pôvodného) priestoru bez tieniaceho krytu
Ei	intenzita elektrického poľa odtieneného (interného) priestoru
$E_{\rm m}$	maximálna hodnota (amplitúda) fázora intenzity elektrického poľa
Et	tangenciálna zložka intenzity elektrického poľa v určitom bode tieneného priestoru
3	komplexná permitivita
Er	komplexná relatívna permitivita
<b>E</b> <sub>0</sub>	permitivita vákua $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$
$\mathcal{E}'$	reálna zložka komplexnej permitivity
$\mathcal{E}''$	imaginárna zložka komplexnej permitivity
$\mathcal{E}'_r$	reálna zložka komplexnej relatívnej permitivity
$\mathcal{E}_r''$	imaginárna zložka komplexnej relatívnej permitivity
f	frekvencia vysokofrekvenčného elektromagnetického poľa
$f_0$	rezonančná frekvencia pri rotačných magnetizačných procesoch
$f_{ m m}$	optimálna frekvencia absorpcie
$f_{\text{relax}}$	relaxačná frekvencia pri rotačných magnetizačných procesoch
G	elektrická vodivosť
h	hrúbka vzorky (vzdialenosť meracích elektród pri meraní dielektrickej permitivity alebo
<b>→</b>	hrúbka toroidu pri meraní magnetickej permeability)
$h_{\rm ac}$	vektor intenzity vonkajšieho striedavého magnetického poľa
H	intenzita magnetického poľa
H	fázor intenzity magnetického poľa
'H(t) ,	rotujuci fazor intenzity magnetickeho poľa
$\mathcal{H}$	fázor-vektor intenzity magnetického poľa
H	vektor intenzity magnetického poľa
H(t)	okamzita hodnota intenzity magnetickeho poľa
$H_0$	intenzita magnetického poľa (povodneno) priestoru bez tieniaceno krytu
$\begin{array}{c} \Pi_{i} \\ \hline \Pi \end{array}$	vektor intenzity lokálnoho afektívnoho magnetického poľe
H cc	intenzita efektívneho poľa magnetokryštálovej anizotropie plniva kompozitu
H <sub>m</sub>	maximálna hodnota (amplitúda) fázora intenzity magnetického poľa
H <sub>t</sub>	tangenciálna zložka intenzity magnetického poľa v určitom bode tieneného priestoru
N N	komplexná susceptibilita testovanej vzorky kompozitu v tvare toroidu
λ γ	komplexná elektrická susceptibilita
$\chi_e$	komplexná magnetická susceptibilita
I I	elektrický prúd
j	imaginárna jednotka
J	prúdová hustota
$\vec{J}$	vektor prúdovej hustoty
$k_w$	tuhosť steny
Ks	koeficient tienenia

λ	vlnová dĺžka
т	hmotnosť iónu
$\overrightarrow{m}$	vektor striedavej zložky vektora magnetizácie
М	útlm vplyvom mnohonásobných odrazov
$\overrightarrow{M}$	vektor magnetizácie
Ms	magnetizácia nasýtenia
μ	komplexná permeabilita
$\mu_{ m r}$	komplexná relatívna permeabilita
$\mu_0$	permeabilita vákua $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$
$\mu'$	reálna zložka komplexnej permeability
$\mu^{\prime\prime}$	imaginárna zložka komplexnej permeability
$\mu_r'$	reálna zložka komplexnej relatívnej permeability
$\mu_r''$	imaginárna zložka komplexnej relatívnej permeability
ω	kruhová frekvencia
$\omega_0$	rezonančná kruhová frekvencia
$\overrightarrow{P}$	vektor elektrickej polarizácie
Pc	celkový stratový výkon magnetizačných strát
$P_{ m hs}$	hysterézne straty
$P_{\rm rs}$	remanentné (zvyškové) straty
$P_{\mathrm{vp}}$	straty vírivými prúdmi
R	elektrický odpor alebo útlm odrazom
RL	odrazové straty (Return Loss)
$RL_{\min}$	minimum odrazových strát
ρ	elektrická rezistivita (merný elektrický odpor)
S	plocha meracích elektród
$S_{11}$	rozptylový parameter, resp. komplexný koeficient odrazu (reflexie)
$S_{21}$	rozptylový parameter, resp. komplexný koeficient prenosu (transmisie)
SE	tieniaca účinnosť (Shielding Effectiveness) tieniaceho materiálu
$\sigma$	elektrická konduktivita (merná elektrická vodivosť)
t	čas
U	elektrické napätie
x	výchylka iónu z jeho rovnovážnej polohy
Y	admitancia
Y <sub>vzorka</sub>	admitancia meranej vzorky
Ζ	impedancia
Z <sub>0</sub> , Z <sub>air</sub>	charakteristická (vlnová) impedancia voľného prostredia (vzduchu)
Zmeraná	nameraná impedancia prípravku s vloženou diskovou vzorkou
Zopen	nameraná impedancia prípravku s rozpojenými elektródami
Zvzorka	skutočná impedancia meracieho prípravku s vloženou diskovou vzorkou
Z <sub>short</sub>	nameraná impedancia prípravku so skratovanými meracími elektródami
Z <sub>vst</sub>	vstupná impedancia meracieho prípravku (koaxiálneho vlnovodu)

## Úvod

Neustála miniaturizácia elektrických a elektronických obvodov, ich integrácia a vyššia rýchlosť, sústavný vývoj a zdokonaľovanie elektronických súčiastok vedie k novým nárokom kladeným na materiálový výskum. Obsadenie existujúcich frekvenčných pásem, neustále požiadavky trhu a dopyt po flexibilných (ohybných) a transparentných elektronických zariadeniach, smart textil kombinovaný s nanočasticami medi, striebra či zlata, potreba získania vyššej prenosovej rýchlosti a väčšieho objemu dát ako aj fakt, že mnohé zariadenia majú svoju vnútro-obvodovú komunikáciu zabezpečenú už nie pomocou klasických zberníc, ale pomocou TX a RX čipov (tj. každý obvod má mať svoj vlastný vysielač a prijímač) nás vedie k tomu, že v dnešnej dobe má ešte väčší význam zaoberať sa vysokofrekvenčnými elektromagnetickými (EM) parametrami materiálov za účelom ich optimalizácie pre návrh elektronického systému, ktorý spĺňa dnešné náročné požiadavky. V tejto práci je náš pohľad sústredený na kompozitné materiálové štruktúry, ktorých výsledné vlastnosti môžeme cielene ovplyvňovať, [36, 37, 38].

Jednou z mnohých aplikácii elektronických kompozitných materiálových štruktúr je ich použitie ako absorbátorov energie EM vĺn pre zníženie interferenčného šumu. Takéto využitie materiálov sa nazýva EM tienenie. Princíp činnosti absorbátora je znázornený na obr. 1.1.



Obr. 1.1 Princíp činnosti absorpčného materiálu, [6]

Horúcou témou v materiálovom výskume je syntéza hybridných kompozitných materiálov na báze uhlíkových štruktúr (uhlíkové nanotrubice, fulerény, uhlíková pena a iné alotropické modifikácie uhlíka), ktoré ponúkajú sľubné využitie ako v elektrotechnickom, tak aj v stavebnom, chemickom či strojárskom priemysle. Organické materiály sa ukazujú ako perspektívne materiály zase z pohľadu flexibility a transparentnosti.



Obr. 1.2 Požiadavky modernej doby - ohybnosť a transparentnosť, [19, 20]

## 1. Ciele a tézy dizertačnej práce

V tejto časti uvádzame špecifikáciu zadania a vytýčené tézy dizertačnej práce. Počas tvorby tejto práce sme realizovali výskum, ktorý viedol k naplneniu stanovených téz.

## Špecifikácia zadania:

Podstatou dizertačnej práce je syntéza elektronických kompozitných materiálových štruktúr s viaczložkovými magnetodielektrickými plnivami (NiZn, MnZn, LiZnTi, karbonylové železo CI) a polymérnymi prírodnými alebo syntetickými matricami (butadiénakrylonitrilový kaučuk NBR, polyvinylchlorid PVC) a analýza vybraných elektromagnetických vlastností (komplexná permitivita, komplexná permeabilita, elektrická konduktivita alebo rezistivita). Pri vyšetrovaní vlastností kompozitných materiálov s rôznymi magnetickými plnivami a polymérnymi matricami sa bude naviac skúmať kvantitatívny vzťah medzi elektrickými, dielektrickými a magnetickými charakteristikami kompozitných materiálov a ich elektromagnetickými absorpčnými vlastnosťami.

## Tézy dizertačnej práce:

- I. Vývoj a príprava dvoj a viaczložkových elektronických kompozitných materiálových štruktúr na báze granulárnych magneticky mäkkých spinelových feritových plnív (NiZn, MnZn, LiZnTi) a kovových feromagnetických plnív (karbonylové železo CI).
- II. Návrh a realizácia meracieho pracoviska na testovanie a interpretáciu vysokofrekvenčných elektromagnetických vlastností pripravených materiálov v pásme do 3 GHz (perspektívne aj vyššie).
- III. Optimalizácia elektromagnetických absorpčných parametrov testovaných materiálov (odrazové straty, optimálna frekvencia a šírka pásma absorpcie, optimálna hrúbka absorbátora) s cieľom ich využitia na tieniace účely v elektronických obvodoch inteligentných systémov a informačno-komunikačných systémov (kritérium optimalizácie: odrazové straty kompozitu majú byť menšie ako – 6 dB, resp. – 15 dB a optimálna hrúbka absorbátora sa stanoví pri optimálnej frekvencii, pri ktorej dôjde k maximálnemu pohlteniu energie RF žiarenia).
- IV. Čiastočná analýza vplyvu rôznych alotropických foriem (modifikácií) uhlíkových plnív (napr. uhlíkové sadze CB, uhlíkové nanorúrky CNT, uhlíkové nanovlákna CNF, grafén GP) na modifikáciu elektromagnetických absorpčných (tieniacich) charakteristík viaczložkových kompozitných materiálov.

## 2. Kompozitné materiálové štruktúry

V jednoduchom priblížení môžeme kompozit definovať ako dvoj, resp. viaczložkový materiál zložený z plniva, ktorý je rozptýlený v matrici, pričom plnivo plní skôr funkciu výstuže, ktorá spevňuje výsledný materiál. Kompozitné materiály v dôsledku prítomnosti viacerých fáz (zložiek) sú heterogénne materiály – nemôžu byť homogénne. Nový kompozit sa spravidla vyznačuje synergickým efektom (daná vlastnosť kompozitu je v porovnaní s tou istou vlastnosť ou jednotlivých zložiek značne vylepšená). V praxi to znamená, že pri vysokej pevnosti a tuhosti majú kompozity pomerne malú hmotnosť. Synergický efekt sa uplatňuje aj v prípade EM parametrov a ich kombinácii s mechanickými parametrami: trup lietadla by mal spĺňať nielen mechanické a tepelné požiadavky na výdrž, ale kompozit, z ktorého je trup zostrojený, by mal plniť aj funkciu zvýšenia EM odolnosti lietadla. V oblasti vojenského priemyslu sa kompozitné materiály využívajú ako prevencia proti

detekcii lietadla nepriateľským radarom, zlepšujú odolnosť lietadla voči zameraniu nepriateľskou strelou a pod. Plnivo kompozitu má funkciu výstuže, ale určuje aj výsledné EM vlastnosti kompozitu. Výroba kompozitov býva spojená s nižšími výrobnými nákladmi ako pri výrobe kompaktného materiálu. Vlastnosti kompozitu zároveň závisia aj od vlastností plniva, medzi ktoré patrí veľkosť a distribúcia veľkosti častíc plniva, geometria a orientácia týchto častíc. Výrazný vplyv na výsledné vlastnosti kompozitu má stupeň dispergácie a objemový podiel plniva v matrici, [1, 2, 21].

## 2.1. Typy kompozitov

V technickej praxi sa uplatňujú viaceré druhy kompozitných materiálových štruktúr. Vo všeobecnosti môžeme kompozity rozdeliť na dvojzložkové a viaczložkové.

## 2.1.1. Dvojzložkové kompozity

Najjednoduchším prípadom kompozitu je materiál tvorený jedným plnivom rozptýleným v jednej matrici. Takýto kompozit sa nazýva dvojzložkový a jeho štruktúru môžeme vidieť na obr. 2.1.



Obr. 2.1 Ilustračný obrázok dvojzložkového kompozitu, [6]

## 2.1.2. Viaczložkové (hybridné) kompozity

V prípade viaczložkového kompozitu ide o syntézu dvoch a viac odlišných plnív, ktoré sú rozptýlené v jednej matrici. Pri týchto materiáloch má zmysel hovoriť o tom, koľko zložiek tvorí plnivo, pretože matrica kompozitu často býva len jednozložková. V prípade dvoj a viaczložkového plniva už automaticky hovoríme o viaczložkovom kompozitnom materiáli. Obr. 2.2 znázorňuje štruktúru viaczložkového hybridného kompozitu, ktorý je zložený zo štyroch druhov plniva (LiZn ferit, karbonylové železo CI a dva iné typy plnív) a nemagnetickej polymérnej matrice (PVC).



Obr. 2.2 Ilustračný obrázok viaczložkového kompozitu, [6]

## 2.2. Plnivá do kompozitov

## 2.2.1. Feritové plnivá

V oblasti materiálov pre elektrotechniku sú magneticky mäkké ferity veľmi často používané ako plnivo do kompozitnej štruktúry. Magneticky ide o ferimagnetiká, ktoré sa vyznačujú vysokými hodnotami magnetickej permeability. Ferity sú keramické a vo všeobecnosti polykryštalické materiály (tvoria ich zrná, kryštality), ktoré sa vyznačujú štruktúrou podobnou minerálu spinelu MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. Ferity môžeme opísať všeobecnou chemickou rovnicou MeO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, kde Me je dvojmocný

kovový ión, ako napr. zinok (Zn), nikel (Ni), mangán (Mn) či lítium (Li). Výroba feritov sa najčastejšie realizuje keramickou metódou, ale v súčasnosti poznáme aj iné chemické metódy. Ferity sú typické malou elektrickou konduktivitou, ale vysokou tvrdosťou a zároveň krehkosťou. V dôsledku toho, že ferity sú kompaktné materiály, pri výrobe kompozitov s feritovým plnivom sa ferit musí najprv rozdrviť na potrebnú frakciu. Ako príklad týchto plnivových štruktúr uvádzame granulárne magneticky mäkké spinelové feritové plnivá NiZn, MnZn, LiZnTi, YIG. V súvislosti s feritovými štruktúrami možno poznamenať, že ich frekvenčné závislosti zložiek komplexnej permeability majú typický rezonančný priebeh. Ak sa ferit rozdrví na prášok s určitou granulometriou, morfológiou a vmiesi sa do matrice v určitej koncentrácii, potom takto vzniknutý kompozit vykazuje najčastejšie relaxačný priebeh zložiek komplexnej permeability, čo znamená, že jej reálna zložka  $\mu'$  monotónne klesá a imaginárna zložka  $\mu''$  nemá také ostré maximá ako v prípade kompaktných feritov. Toto je dôsledok tzv. magnetického zriedenia výslednej kompozitnej štruktúry ako následok prechodu z vysokohustotného kompaktného magnetika (feritu) na nízkohustotný kompozit (práškové feritové plnivo + nemagnetická polymérna matrica), [4, 5, 6].

#### 2.2.2. Kovové feromagnetické plnivá

Tieto plnivá sa podobne ako ferity vyznačujú vysokou hodnotou permeability. Príkladom týchto plnív sú kovové práškové feromagnetiká Co (kobalt), FeSiAl (ferosilícium), CI (karbonylové železo). Používajú sa najčastejšie v kombinácii s feritmi ako hybridné plnivá do kompozitov pre účely tienenia absorpciou v širšom frekvenčnom rozsahu (10<sup>8</sup> až 10<sup>10</sup> Hz), [4, 5, 6].

#### 2.2.3. Uhlíkové plnivá

#### 2.2.3.1. Alotropické modifikácie uhlíka

Kedysi boli známe iba dve formy výskytu uhlíka – diamant a grafit. Okolo roku 1960 bol vytvorený fulerén C<sub>60</sub>. Dnes už poznáme ďalšie alotropické modifikácie uhlíka. Vlastnosti každej z foriem sa odlišujú v závislosti od mikroštruktúry a chemických väzieb jednotlivých atómov uhlíka tvoriacich tieto formy. V diamante má každý atóm uhlíka obsadené všetky svoje väzby ďalšími atómami uhlíka, a preto diamantu nezostávajú žiadne voľné elektróny, vďaka čomu ho považujeme za izolant. Na druhej strane v prípade grafitu a fulerénov zostáva aspoň jeden voľný elektrón vo väzbe, ktorý môže byť nosičom elektrického náboja. V tejto kapitole si priblížime grafit, uhlíkové nanotrubice a uhlíkové sadze, [7, 35].



Obr. 2.3 Ilustračný obrázok rôznych foriem výskytu uhlíka – alotropických modifikácií

## Grafén

Grafén pozostáva z jednej atómovej vrstvy grafitu, v rámci ktorej sú atómy uhlíka usporiadané v hexagonálnej mriežke. Z pohľadu vodivosti (tepelnej a elektrickej) ide o anizotropný materiál, ktorý má aj vysokú tuhosť, ktorá je tiež silne smerovo závislá. Tento materiál sa opisuje ako jedna rovinná vrstva hexagonálnych uhlíkových štruktúr navzájom spojených silnou kovalentnou väzbou. Silná anizotropia dáva tomuto materiálu potenciál uplatniť sa pri výrobe kompozitov, tenkých pásikov (filmov), senzorov či v aplikáciách elektromagnetického tienenia. Grafén našiel široké využitie pre svoje elektrické a optické vlastnosti. Existujú nanokompozity vo forme tenkého olejového filmu s grafénovými fliačkami, ktoré svojimi absorpčnými vlasnosťami slúžia na vojenské (radaru) neviditeľné aplikácie. Taktiež zohráva dôležitú úlohu v dnešnom "uhlíkovom" výskume, pretože jeho navrstvením vzniká grafit a zvinutím grafénu vznikajú nanotrubice, ktoré sú predmetom výskumov súčasnej komunity odborníkov a vedcov, [8, 9, 39, 40].



Obr. 2.5 Ilustračný obrázok štruktúry grafénu

#### Uhlíkové nanotrubice

Uhlíkové nanotrubice (carbon nanotubes – CNTs) sú zvinuté vrstvy grafénu. Tieto pomerne "novoobjavené" štruktúry majú výborné vlastnosti z hľadiska chemického uchovania energie, a tak sú základom rôznych palivových článkov. Uplatnenie našli aj v niektorých elektronických prístrojoch, senzoroch, aktuátoroch a v nanomateriáloch, resp. nanokompozitoch. Vo všeobecnosti platí, že ide o materiály s nízkou hmotnosťou a veľkou pevnosťou s výhodnými elektromagnetickými vlastnosťami. Nanotrubice sú mechanicky odolnejšie, elektricky a tepelne vodivejšie, a chemicky a biologicky viac aktívne ako napr. grafit.



Obr. 2.8 Uhlíkové nanotrubice – jednostenné (vľavo) a mnohostenné (vpravo)

Zásluhou nanotrubíc môžu vznikať zaujímavé typy materiálov ako vodivé polyméry, pevnostná keramika, vysoko anizotropické izolátory a iné. Kompozity obsahujúce uhlíkové nanotrubice sú dnes tvorené najmä na báze polymérnej matrice a nachádzajú svoje uplatnenie v modernej ohybnej flexibilnej elektronike (flexible electronics), napr. ako transparentné elektródy, [2, 7].

Uhlíkové nanotrubice delíme na jednostenné (Single-Walled Carbon Nano Tubes – SWCNTs) a mnohostenné (Multi-Walled Carbon Nano Tubes – MWCNTs). Jednostenné uhlíkové nanotrubice

sú vytvorené zvinutím jednej vrstvy grafénu do tvaru trubice. Mnohostenné uhlíkové nanotrubice sú zložené z viacerých zvinutých vrstiev grafénu, pričom tieto vrstvy sú vložené jedna do druhej a počet takýchto zvinutých vrstiev grafénu môže presiahnuť dvadsaťpäť (viac ako dvadsaťpäť stenová nanotrubica). Vonkajší priemer mnohostenných uhlíkových nanotrubíc sa pohybuje od 1 do 50 nm. Vnútorný priemer dosahuje iba niekoľko nanometrov. Vo všeobecnosti platí, že v porovnaní s jednostennými uhlíkovými nanotrubicami, mnohostenné uhlíkové nanotrubice vykazujú vyššiu chemickú odolnosť, majú lepšie mechanické vlastnosti, priaznivý pomer plochy a dĺžky, sú tvrdšie, jednoduchšie a pri veľkokapacitnej výrobe je technológia ich výroby lacnejšia, [42].

Zaujímavou vlastnosťou niektorých druhov nanotrubíc je, že ich elektrický odpor sa s rastúcou dĺžkou nanotrubice nemení. Uhlíkové nanotrubice sú taktiež výbornými emitormi elektrického poľa, pre svoj malý priemer a vysoko anizotropickú povahu, [7].

#### Uhlíkové sadze (carbon black)

Ide o štandardnú formu uhlíka, ktorá sa pridáva ako plnivo do kompozitov za účelom zvýšenia elektrickej vodivosti. Zmenší sa tým však flexibilita kompozitu. Tieto sadze sú v niektorých aplikáciách nežiaducim elementom, napr. ak sa primiešajú do materiálu, ktorý má plniť funkciu izolantu. Zníži sa tým celková elektrická pevnosť tohto materiálu. Primiešať sa do izolantu nemusia priamo, môžu to byť len nečistoty, [7].



Obr. 2.9 Uhlíkové sadze a ich štruktúra

#### 2.2.4. Hybridné plnivá

Pod pojmom hybridné plnivá máme na mysli také plnivá, ktoré sú tvorené dvomi a viac zložkami, ktoré majú odlišnú fyzikálnu štruktúru, magnetické či elektrické vlastnosti a predtým netvorili spoločnú kompaktnú štruktúru. V tejto práci za hybridné plnivo pokladáme napr. plnivo, ktorého zložky sú tvorené ferimagnetickým LiZn alebo MnZn feritom a feromagnetickým karbonylovým železom CI alebo ferosilíciom FeSiAl.

#### 2.3. Matrice kompozitov

Výber matrice, z ktorej je kompozit pripravený, je základom pre determinovanie jeho výsledných vlastností. Považujeme za dôležité uviesť fakt, že majoritný vplyv na mechanické vlastnosti kompozitu má práve matrica. Z tohto hľadiska je dôležité, koľko percent z kompozitu tvorí matrica. Výsledný kompozit znamená 100 objemových % (obj.%, vol.%) materiálu. Vo všeobecnosti platí, že vyšší percentuálny podiel plniva (na úkor podielu matrice) vedie k menšej súdržnosti kompozitu. Pre účely tejto práce nie sú mechanické vlastnosti prioritou, úzko však súvisia s praktickou použiteľnosťou a manipuláciou s kompozitným materiálom. Kompozity môžu byť tvorené matricou rôznej bázy. Poznáme kompozity na báze polymérnej, keramickej, kovovej alebo uhlíkovej matrice. V našom výskume, ktorý je aj predmetom tejto práce, sme pracovali s polymérnymi matricami.

#### 2.3.1. Polymérna matrica

Polyméry sú používané pre ich nenáročné a nízko teplotné možnosti aplikácie. Nízka teplota spracovania polymérnych kompozitov prispieva k jednoduchosti výroby takýchto štruktúr. Vo všeobecnosti majú polyméry nižšiu pevnosť než kovy alebo keramika, ale sú ďaleko viac chemicky odolnejšie. Polyméry sú svojou mikroštruktúrou obrovské reťazovité molekuly pospájané atómami uhlíka prostredníctvom kovalentnej väzby. Vznikajú polymerizáciou monomérov. K polymérom patrí PE (polyetylén), PVC (polyvinylchlorid), PMMA (polymetylmetakrylát), epoxidová živica, kaučuková guma a iné. Zatiaľ čo čisté kovy majú pevnú teplotu tavenia, polymérny materiál vykazuje pomerne širokú škálu týchto teplôt. Je potrebné dodať, že vlhkosť, teplota a prílišné vystavenie UV žiareniu však môže mať za následok degradáciu daného polyméru, vplyvom ktorej stráca svoje vlastnosti aj výsledný kompozit. UV žiarenie narúša väzbu uhlíkov, z ktorých je polymér vytvorený. Odolnosť polymérnej matrice proti UV žiareniu môžeme posilniť pridaním uhlíkových sadzí do matrice. Z pohľadu elektrickej konduktivity je drvivá väčšina polymérov prakticky nevodivá. Existujú aj elektricky vodivé polyméry, ktoré sú veľmi drahé a technológia ich spracovania ešte nie je úplne zvládnutá – je často náročné vytvoriť z tohto materiálu špecifický tvar. Elektricky vodivé polyméry (napr. polyacetylén, polypyrol, polyanilín) sú naviac krehké a ťažko znášajú niektoré podmienky prostredia ako napr. vlhkosť. Preto, ak je potrebný polymér s vyššou konduktivitou (napr. pre dosiahnutie lepších tieniacich vlastností materiálu), vytvára sa z neho kompozit s elektricky vodivým plnivom ako napr. grafén, grafit, uhlíkové sadze, uhlíkové nanotrubice alebo uhlíkové vlákna. Elektrické vlastnosti takéhoto kompozitu závisia od veľkosti, tvaru, resp. od granulometrie, morfológie a koncentrácie elektricky vodivých častíc rozptýlených v kompozite, [2, 10, 11, 44, 45].

# 3. Vybrané vysokofrekvenčné elektromagnetické vlastnosti kompozitných materiálov

Materiály, z ktorých je kompozit vyrobený výrazne ovplyvňujú celkové vlastnosti novej štruktúry. Poznať elektromagnetické vlastnosti jednotlivých zložiek kompozitu je kľúčovým faktorom pre východisko syntézy budúceho kompozitu a pre determinovanie jeho výsledných elektromagnetických vlastností. Rozlišujeme elektrické, dielektrické, magnetické a absorpčné vlastnosti kompozitného materiálu.

Bezdrôtový prenos informácií, mobilná komunikácia, vojenská (proti)radarová technika, aplikácie súvisiace s potlačením nežiadúcich EMI (použitím tieniacich a absorpčných materiálov) ako aj ďalšia vysokofrekvenčná technika s výhodou využíva vlastnosti vysokofrekvenčných EM polí. Ak uvažujeme izotropné prostredie s aktívne pôsobiacim vysokofrekvenčným EM poľom a zároveň charakteristické veličiny tohto poľa ( $\vec{E}(t), \vec{H}(t), \vec{D}(t), \vec{B}(t)$ ) sú harmonickou funkciou času, zavedieme zodpovedajúce fázor-vektory ( $\vec{E}, \vec{\mathcal{H}}, \vec{\mathcal{D}}, \vec{\mathcal{B}}$ ). Potom prvé dve Maxwellove rovnice ( $rot \ \vec{\mathcal{H}} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{\mathcal{D}}}{\partial t}$  a  $rot \ \vec{\mathcal{E}} = -\frac{\partial \vec{\mathcal{B}}}{\partial t}$ ) môžeme prepísať do komplexného tvaru, [4, 6, 16–18, 22, 24]:  $rot \ \vec{\mathcal{H}} = j\omega\varepsilon_0 \left[\varepsilon_{r_1} - j\left(\varepsilon_{r_2} + \frac{\sigma}{r_1}\right)\right] \vec{\mathcal{I}}$ (3.1)

$$\operatorname{rot} \vec{\mathcal{H}} = j\omega\varepsilon_0 \left[ \varepsilon_{r_1} - j \left( \varepsilon_{r_2} + \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \right) \right] \vec{\mathcal{E}}$$
(3.1)

$$rot \,\vec{\mathcal{E}} = -j\omega\mu_0 \left(\mu_r' - j\mu_r''\right) \mathcal{\tilde{H}}$$
(3.2)

V uvedených rovniciach sú zakomponované mikroštrukturálne interakcie látky vyjadrené makroskopickými parametrami izotropnych elektrotechnických materiálov, ktorými sú elektrická konduktivita  $\sigma$ , komplexná permitivita  $\varepsilon$  a komplexná permeabilita  $\mu$  podľa nasledujúcich rovníc (v prípade anizotropného prostredia by sme museli použiť tenzory).

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left( \varepsilon_r' - j \varepsilon_r'' \right) = \varepsilon_0 \left[ \varepsilon_{r_1} - j \left( \varepsilon_{r_2} + \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right) \right] = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$
(3.3)

$$\mu = \mu_0 \left( \mu_r' - j \mu_r'' \right) = \mu_0 \mu_r \tag{3.4}$$

Permitivita vákua  $\varepsilon_0$  a permeabilita vákua  $\mu_0$  sú konštanty ( $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  F/m,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m), a preto vzájomnú interakciu vonkajšieho EM poľa a daného materiálu opisujeme pomocou relatívnych hodnôt spomenutých komplexných veličín. Hovoria o schopnosti, akou daný materiál resp. prostredie dokáže pôsobením vonkajšieho EM poľa meniť svoj stav, teda určujú EM vlastnosti daného materiálu. Môžeme tvrdiť, že materiál resp. prostredie svojou prítomnosťou modifikuje vonkajšie elektrické aj magnetické polia. Vložením magnetodielektrika (materiál vykazujúci magnetické a dielektrické vlastnosti, ktorým môže byť ferit, magnetické plnivo či kompozitný systém zložený z magnetického plniva a nemagnetickej polymérnej matrice) do vonkajšieho vysokofrekvenčného EM poľa sa podľa nasledovných vzťahov zmení celková indukcia elektrickej a súčasne aj magnetickej zložky EM poľa, [18]:

$$\vec{\mathcal{D}} = \varepsilon_0 \vec{\mathcal{E}} + \vec{\mathcal{P}} = \varepsilon_0 \vec{\mathcal{E}} + \varepsilon_0 \chi_e \vec{\mathcal{E}} = \varepsilon_0 \left(1 + \chi_e\right) \vec{\mathcal{E}} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{\mathcal{E}} = \varepsilon \vec{\mathcal{E}}$$
(3.5)

$$\vec{\mathcal{B}} = \mu_0 \left( \vec{\mathcal{H}} + \vec{\mathcal{M}} \right) = \mu_0 \vec{\mathcal{H}} + \mu_0 \chi_m \vec{\mathcal{H}} = \mu_0 \left( 1 + \chi_m \right) \vec{\mathcal{H}} = \mu_0 \mu_r \vec{\mathcal{H}} = \mu \vec{\mathcal{H}}$$
(3.6)

kde  $\chi_e = \varepsilon_r - 1$  resp.  $\chi_m = \mu_r - 1$  je komplexná elektrická resp. magnetická susceptibilita. Uvedené vzťahy sú platné pre lineárne materiály resp. prostredie a "slabé" polia. Vektor elektrickej polarizácie  $\vec{P} = \varepsilon_0 \chi_e \vec{Z}$  je vyjadrením objemovej hustoty celkového indukovaného elektrického momentu v objemovej jednotke materiálu resp. prostredia. Analogicky, vektor magnetizácie  $\vec{\mathcal{M}} = \chi_m \vec{\mathcal{H}}$  je vyjadrením objemovej hustoty celkového magnetického momentu v objemovej jednotke materiálu resp. prostredia.

Striedavé EM pole sa vyznačuje frekvenčnou závislosťou všetkých jeho veličín a teda aj komplexná permitivita  $\varepsilon(\omega)$  a permeabilita  $\mu(\omega)$  sú frekvenčne závislé a aj ich jednotlivé zložky. Frekvenčné závislosti reálnych zložiek  $\varepsilon'(\omega)$  a  $\mu'(\omega)$  sa nazývajú disperzné krivky. Frekvenčné závislosti imaginárnych zložiek  $\varepsilon''(\omega)$  a  $\mu''(\omega)$  sa nazývajú absorpčné krivky. Existuje relaxačný priebehu, pričom reálna zložka ( $\varepsilon$ ' a  $\mu$ ') vykazuje monotónny pokles typ s rastúcou frekvenciou. Imaginárna zložka ( $\varepsilon$ " a  $\mu$ ") má v spomenutej oblasti nevýrazné maximum. Okrem relaxačného, poznáme aj rezonančný priebeh, kde v disperznej oblasti má daná reálna zložka najprv ostré maximum sledované prudkým poklesom na zápornú hodnotu a následným rastom na nulovú hodnotu, príslušná imaginárna zložka na tom mieste vykazuje ostré maximum. Tieto závislosti sú znázornené na obr. 3.1 a ich podstata sa v prípade komplexnej permitivity a permeability výrazne odlišuje. Fyzikálny pôvod týchto závislostí súvisí okrem iného hlavne s typom polarizačného mechanizmu resp. magnetizačného procesu, ktorý prebieha v danej frekvenčnej oblasti v magnetodielektrickom materiáli.



Obr. 3.1 Kvalitatívny priebeh a) rezonančného a b) relaxačného typu zložiek (reálnej a imaginárnej) komplexnej permitivity a permeability, [4–6, 18, 22, 24]

#### 3.1. Elektrické vlastnosti

Hlavným predstaviteľom elektrických vlastností kompozitnej materiálovej štruktúry je pre nás elektrická konduktivita, ktorá je prevrátenou hodnotou elektrickej rezistivity materiálu. Tento aspekt sa využíva pri meraní elektrickej konduktivity materiálu.

#### 3.1.1. Elektrická konduktivita

Elektrická konduktivita  $\sigma$  (merná elektrická vodivosť) materiálu (tj. napr. plniva alebo matrice kompozitu) je jedným z materiálových parametrov, ktoré nás zaujímajú pri syntéze kompozitných materiálových štruktúr. Už sme spomenuli, že napr. pridanie elektricky vodivých častíc do elektricky nevodivej matrice (napr. polymérnej) vedie pri takejto štruktúre k zvýšeniu elektrickej konduktivity celého kompozitu. V takomto prípade je dôležité brať na vedomie aj jav elektrických perkolácií, ktorý si bližšie predstavíme v časti 3.1.2.

Elektrická konduktivita  $\sigma$  materiálu je mierou schopnosti materiálu viesť elektrický prúd. Rozmer tejto veličiny je (S/m). Definične konduktivita materiálu predstavuje pomer prúdovej hustoty a intenzity elektrického poľa v určitom mieste materiálu. Ide vlastne o Ohmov zákon v diferenciálnom tvare:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\mathbf{A} \cdot \mathbf{m}^{-2}) \quad \rightarrow \quad \sigma = \frac{J}{E} \quad (\mathbf{S} \cdot \mathbf{m}^{-1})$$
(3.1.1)

kde  $\vec{J}$  je vektor prúdovej hustoty a  $\vec{E}$  je intenzita elektrického poľa.

Pri vytváraní modelu elektrickej konduktivity kompozitu, za účelom predikcie jeho výsledných vlastností, ktoré závisia od jednotlivých zložiek kompozitu, je zrejmé, že celková konduktivita kompozitu bude tiež závisieť od konduktivít jednotlivých jeho zložiek. Okrem iného, elektrická konduktivita jednotlivých zložiek kompozitu má priamy dopad na zvýšenie permitivity celého kompozitu. Poznamenajme, že elektricky vodivé polyméry nie sú vhodnými kandidátmi pre výrobu kompozitu kvôli vysokej cene a problémom spojenými s ich spracovaním (pozri časť 2.4.1).

V súvislosti s elektrickou vodivosťou materiálu chceme spomenúť duálny parameter konduktivity, ktorým je rezistivita. Elektrická rezistivita  $\rho$  je v jednoduchosti prevrátenou hodnotou elektrickej konduktivity  $\sigma$ , [1, 2, 3, 7].

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (\Omega \cdot \mathbf{m}) \tag{3.1.2}$$

#### 3.2. Dielektrické vlastnosti

Hlavným predstaviteľom dielektrických vlastností kompozitnej materiálovej štruktúry je pre nás komplexná permitivita, ktorú chápeme ako efektívny parameter.

#### 3.2.1. Komplexná permitivita

Komplexná permitivita  $\varepsilon$  je definovaná ako súčin absolútnej permitivity  $\varepsilon_0$  (permitivita vákua  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  F/m) a komplexnej relatívnej permitivity  $\varepsilon_r$  podľa vzťahu 3.2.1:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \qquad \left( \mathbf{F} \cdot \mathbf{m}^{-1}, \, \mathbf{F} \cdot \mathbf{m}^{-1}, \, - \right) \tag{3.2.1}$$

Táto veličina vyjadruje, ako materiál interaguje s elektrickým poľom, do ktorého je vložený. Zároveň efektívne definuje vzájomný vzťah medzi elektrickou indukciou materiálu D a intenzitou vonkajšieho elektrického poľa E. Tento vzťah znázorňujeme polarizačnou krivkou D(E), ktorá má pri striedavých poliach slabej intenzity (Rayleigho oblasť) tvar eliptickej hysteréznej slučky podľa obr. 3.2.1 a).



Obr. 3.2.1 Ilustračný obrázok a) hysteréznej slučky D(E) a b) vzťah medzi fázormi  $\mathcal{D}$ ,  $\mathcal{E}$ , resp. zložkami  $\varepsilon'$ ,  $\varepsilon''$  komplexnej permitivity  $\varepsilon$  v komplexnej rovine, [4, 6, 16–18]

V silnejších poliach vplyvom zotrvačnosti častíc dochádza v každom reálnom materiále (napr. v dielektriku) k fázovému oneskoreniu fázora elektrickej indukcie  $\mathcal{D} = D_m e^{-j\delta_e}$ , ktorý fázovo zaostáva za fázorom intenzity elektrického poľa  $\mathcal{E} = E_m$  podľa obr. 3.2.1 b).

Fázové oneskorenie vyjadruje uhol  $\delta_{e}$ , ktorý nazývame stratovým uhlom a tangens tohto uhla predstavuje tzv. stratový činiteľ. Vzhľadom na to, že podľa vzťahu 3.2.1  $\varepsilon_0$  je konštanta, ukazuje sa, že práve komplexná relatívna permitivita  $\varepsilon_r$  (a jej frekvenčná závislosť) je pre nás určujúcim faktorom pri skúmaní EM vlastností materiálov.  $\varepsilon_r$  je potom možné definovať vzťahom 3.2.2 ako podiel spomenutých fázorov  $\mathcal{D}$  a  $\mathcal{E}$  s uvažovaním fázového oneskorenia  $\delta_{e}$ , [18, 23–25]:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\mathcal{D}}{\mathcal{E}} = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{D_m}{E_m} e^{-j\delta_e} = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r''$$
(3.2.2)

kde  $D_{\rm m}$  a  $E_{\rm m}$  sú maximálne hodnoty (amplitúdy) fázorov  $\mathcal{D}$  a  $\mathcal{E}$ .

Komplexná relatívna permitivita závisí predovšetkým od koncentrácie polarizovateľných častíc v materiáli, Reálna zložka  $\varepsilon'_r = \varepsilon_{r_1}$  predstavuje energiu elektrického poľa akumulovanú v materiáli dielektrika. Imaginárna zložka  $\varepsilon''_r = \varepsilon_{r_2} + \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}$  predstavuje straty, teda energiu elektrického poľa, ktorá sa vplyvom stratových mechanizmov v dielektriku nenávratne mení na teplo. Tieto straty sú tvorené dielektrickými stratami ( $\varepsilon_{r_2}$ ), Jouleovými (vodivostnými) stratami ( $\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}$ ) a sú dôsledkom relaxačných a rezonančných stratových mechanizmov dielektrickej polarizácie, [6, 16–18, 23–25].

#### Typy polarizačných mechanizmov v dielektriku

V tejto práci sú pre nás zaujímavé predovšetkým polárne dielektriká, pri ktorých nie sú schopné mikroštrukturálne polarizačné mechanizmy sledovať rýchle dynamické zmeny elektrického poľa okamihovo, ale s určitým časovým oneskorením. Tento jav sa nazýva dielektrická relaxácia. Polarizačné mechanizmy so zásadným vplyvom na výslednú permitivitu materiálu sú najmä **relaxačné** a **rezonančné polarizácie**. Relaxačnými polarizáciami sú konkrétne elektrónová, iónová a orientačná relaxačná polarizácia. Ďalšími špecifickými typmi sú orientačná relaxačná, migračná alebo medzivrstvová polarizácia. Rezonančný typ polarizácie sa uplatňuje iba v časovo premenlivom elektrickom poli s frekvenciou blízkou vlastným kmitom nosičov náboja, ktoré túto polarizáciu spôsobujú. Na základe toho rozoznávame elektrónovú rezonančnú polarizáciu, ktorá sa vyskytuje vo frekvenčnej oblasti viditeľného žiarenia (VIS ~  $10^{15}$  Hz) s presahom až do ultrafialovej oblasti (UV ~  $10^{16}$  Hz), iónovú rezonančnú polarizáciu vyskytujúcu sa v infračervenej oblasti (IR ~  $10^{13}$  Hz) a rezonančnú polarizáciu spôsobenú defektnými elektrónmi v oblasti mikrovĺn (MW ~  $10^9$  Hz). Táto výrazne ovplyvňuje ióny, polárne molekuly a samotné elektróny daného materiálu. Miera príspevkov jednotlivých typov polarizácií k výslednej permitivite dielektrika je rôzna, [6, 16–18, 23–25, 31].



Obr. 3.2.2 Kvalitatívny priebeh komplexnej permitivity  $\varepsilon$ , resp. jej reálnej  $\varepsilon'$  a imaginárnej  $\varepsilon$ zložky s vyznačeným vplyvom rôznych mechanizmov dielektrickej polarizácie s jedným časom relaxácie, [5, 7, 20–22]

#### 3.3. Magnetické vlastnosti

Hlavným predstaviteľom magnetických vlastností kompozitnej materiálovej štruktúry je pre nás komplexná permeabilita, ktorú chápeme ako efektívny parameter.

#### 3.3.1. Komplexná permeabilita

Komplexná permeabilita  $\mu$  je definovaná ako súčin absolútnej permeability  $\mu_0$  (permeabilita vákua  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m) a komplexnej relatívnej permeability  $\mu_r$  podľa vzťahu 3.3.1:

$$\mu = \mu_0 \mu_r \qquad (H \cdot m^{-1}, H \cdot m^{-1}, -)$$
(3.3.1)

Táto veličina vyjadruje, ako materiál interaguje s magnetickým poľom, do ktorého je vložený. Zároveň hovorí o miere magnetizácie magnetického materiálu (magnetika) a efektívne definuje vzájomný vzťah medzi magnetickou indukciou materiálu *B* a intenzitou vonkajšieho magnetického poľa *H*. Tento vzťah znázorňujeme magnetizačnou krivkou B(H), ktorá má pri magnetovaní materiálu v striedavých poliach slabej intenzity (Rayleigho oblasť) tvar eliptickej hysteréznej slučky podľa obr. 3.3.1 a).



Obr. 3.3.1 Ilustračný obrázok a) hysteréznej slučky B(H) a b) vzťah medzi fázormi  $\mathcal{B}$ ,  $\mathcal{H}$ , resp. zložkami  $\mu'$ ,  $\mu''$  komplexnej permitivity  $\mu$  v komplexnej rovine, [6]

V silnejších poliach vplyvom zotrvačnosti častíc dochádza v každom reálnom magnetickom materiáli k fázovému oneskoreniu fázora magnetickej indukcie  $\mathcal{B} = B_m e^{-j\delta_m}$ , ktorý fázovo zaostáva za fázorom intenzity magnetického poľa  $\mathcal{H} = H_m$  podľa obr. 3.3.1 b).

Fázové oneskorenie vyjadruje uhol  $\delta_m$ , ktorý nazývame stratovým uhlom a tangens tohto uhla predstavuje tzv. stratový činiteľ. Toto oneskorenie je dôsledkom vírivých prúdov, hysterézy, magnetizačných procesov a relaxačných javov prebiehajúcich vnútri materiálu. Vzhľadom na to, že podľa vzťahu 3.3.1  $\mu_0$  je konštanta, ukazuje sa, že práve komplexná relatívna permeabilita  $\mu_r$  (a jej frekvenčná závislosť) je pre nás určujúcim faktorom pri skúmaní EM vlastností materiálov. Komplexnú relatívnu permeabilitu  $\mu_r$  potom definujeme vzťahom 3.3.2 ako podiel spomenutých fázorov  $\mathcal{B}$  a  $\mathcal{H}$ s uvažovaním fázového oneskorenia  $\delta_m$ , [4–6, 16–18, 24]:

$$\mu_{r} = \frac{1}{\mu_{0}} \frac{\mathcal{B}}{\mathcal{H}} = \frac{1}{\mu_{0}} \frac{B_{m}}{H_{m}} e^{-j\delta_{m}} = \mu_{r}' - j\mu_{r}''$$
(3.3.2)

kde  $B_{\rm m}$  a  $H_{\rm m}$  sú maximálne hodnoty (amplitúdy) fázorov  $\mathcal{B}$  a  $\mathcal{H}$ .

Komplexná relatívna permeabilita predovšetkým závisí od koncentrácie magnetovateľných častíc v materiáli a od mechanizmov, ktoré proces magnetovania sprevádzajú resp. ovplyvňujú, pričom jej reálna zložka  $\mu'_r$  úzko súvisí s pružnými (vratnými) procesmi uplatňujúcich sa počas premagnetovania a predstavuje energiu magnetického poľa akumulovanú v materiáli. Táto energia sa potom pri odmagnetovaní (na)vráti do zdroja. Zaostávanie fázora magnetickej indukcie  $\mathcal{B}$  pri striedavom magnetovaní má za následok, že imaginárna zložka vždy dosahuje iba záporné hodnoty. Imaginárna zložka  $\mu''_r$  preto vo všeobecnosti predstavuje straty, teda energiu magnetického poľa, ktorá sa vplyvom striedavého magnetovania spotrebuje a nenávratne sa premieňa na teplo. Vplyv hysterézy, procesov relaxácie, magnetickej viskozity, vírivých prúdov a rezonančná absorpcia vnútri materiálu sú mechanizmy zodpovedné za spomenuté zaostávanie fázora  $\mathcal{B}$  a tak aj za magnetizačné straty, [4–6, 16–18, 24, 26].

#### Magnetizačné straty pri striedavej magnetizácii materiálu

Súhrnný vplyv troch základných stratových mechanizmov uplatňujúcich sa pri striedavom magnetovaní materiálu vyjadrujeme pomocou celkového stratového výkonu  $P_c$  podľa vzťahu 3.3.3 ako súčet čiastkových stratových výkonov od jednotlivých mechanizmov magnetizačných strát, ktorými sú *hysterézne straty*  $P_{hs}$ , *straty vírivými prúdmi*  $P_{vp}$  a *zvyškové* (remanentné) *straty*  $P_{rs}$ , [31].

$$P_{\rm c} = P_{\rm hs} + P_{\rm vp} + P_{\rm rs}$$
 (W) (3.3.3)

#### Disperzia zložiek komplexnej permeability, jav relaxácie a rezonancie

Ťažiskom využitia kompozitných materiálových štruktúr na báze magnetických plnív s vysokou rezistivitou (napr. ferity) vďaka minimalizácii strát od vírivých prúdov je práve oblasť EM polí vysokých frekvencií. Vo feromagnetikách vplyvom vonkajšieho magnetického poľa dochádza k rotácii magnetických momentov a vplyvom ich doménovej štruktúry nastáva jav feromagnetickej rezonancie a relaxácie. Spomenuté deje sú príčinou vzniku frekvenčnej disperzie komplexnej permeability. Problematika rezonancie a relaxácie nie je triviálna záležitosť nakoľko, z principiálneho hľadiska, oba **základné magnetovacie mechanizmy** (*posuvy* doménových stien a *rotácia* magnetických momentov resp. výsledného vektora magnetizácie v jednotlivých doménach feromagnetika) môžu vykazovať relaxačný alebo rezonančný charakter. Z tohto pohľadu rozoznávame dvojakú rezonanciu vo feromagnetiku podľa procesu, ktorý ju spôsobuje:

\* Rezonancia doménových stien spôsobená pohybom resp. vibráciou týchto stien,



Obr. 3.3.3 Ilustrácia typu a posuvu doménovej steny

Prirodzená feromagnetická rezonancia spôsobená natáčaním vektorov magnetických momentov môže byť zapríčinená rotáciou magnetických momentov resp. výsledného vektora magnetizácie v jednotlivých doménach feromagnetika, [4, 6, 16–18].



Obr. 3.3.4 Rotácia vektora magnetizácie M

#### Rezonancia doménových stien

Snaha doménovej štruktúry feromagnetika sledovať časové zmeny pôsobiaceho magnetického poľa vyúsťuje do pohybu doménových stien (obr. 3.3.3). Oscilačný charakter tohto pohybu môžeme formálne opísať rovnicou vynútených kmitov stratového harmonického oscilátora, [4, 6, 16–18]:

$$m_{\rm ds} \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \beta \frac{dx(t)}{dt} + k_{\rm ds} x(t) = 2\mu_0 \vec{M} \cdot \vec{H}$$
(3.3.4)

kde  $m_{ds}$  je efektívna hmotnosť doménovej steny vztiahnutá na jednotku plochy,  $k_{ds}$  určuje tuhosť a x(t) polohu doménovej steny,  $\vec{H}$  predstavuje vektor intenzity vonkajšieho magnetického poľa,  $\beta$  je faktor útlmu určujúci energetické straty, t je čas a  $M_s$  je magnetizácia nasýtenia. Za predpokladu, že počas svojho pohybu zostáva doménová stena rovinná, dynamika rovinnej 180°-ovej steny ( $\pi$ -stena, obr. 3.3.3) je opísaná rovnicou 3.3.7. Tento predpoklad znamená, že zanedbáme akékoľvek ohyby doménovej steny a rovnako aj **pinning-effect**, teda zachytávanie doménovej steny pri pohybe v záchytných "špendlíkových" energetických centrách, ktoré ešte viac deformujú tvar a znásobujú rozvibrovanie Blochových (doménových) stien Weissových domén podľa obr. 3.3.5, [4, 6, 16–18].



Obr. 3.3.5 Pinning efekt steny magnetickej domény s incidujúcim záchytným centrom

#### 3.4. Absorpčné vlastnosti

#### **Odrazové straty**

Absorpčné parametre patria k najdôležitejším EM parametrom kompozitných materiálov. Tieto parametre sú frekvenčne závislé a vo všeobecnosti ich získame prepočtom z materiálových parametrov – komplexnej permeability a komplexnej permitivity, ktorých stratová zložka je tvorená aj príspevkom elektrickej konduktivity. Kompozitné materiály môžu byť použité ako absorbátory vyžiarených EM vĺn. Princíp tienenia absorbátorom znázornený na obrázku 1.1 v úvode tejto práce dopĺňame obrázkom 3.4.1, ktorý názorne ilustruje princíp činnosti absorbátora použitého ako tieniaci materiál. Schopnosti a mieru pohltenia nežiaduceho žiarenia (EMI) absorbátorom vyjadrujú jeho absorpčné parametre, ktorými sú najmä odrazové straty *RL* (Return Loss), optimálna frekvencia absorpcie  $f_m$ , šírka pásma absorpcie  $\Delta f$  a optimálna hrúbka materiálu  $d_m$ . Spôsob stanovenia týchto parametrov je znázornený na obr. 3.4.2, [4–6, 11–14].



Obr. 3.4.1 Princíp absorbátora elektromagnetického vlnenia

Z nameraných frekvenčných závislostí komplexnej permitivity, permeability a elektrickej konduktivity dokážeme prepočtom stanoviť frekvenčnú závislosť odrazových strát *RL*:

$$RL = 20\log|S_{11}| = 20\log\left|\frac{Z_{vst} - Z_0}{Z_{vst} + Z_0}\right|$$
(3.4.1)

pričom  $Z_0$  je charakteristická (vlnová) impedancia voľného priestoru (vákua, resp. aj vzduchu) vyjadrená ako  $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} \approx 377 \Omega$  a  $Z_{vst}$  je vstupná impedancia meracieho prípravku na rozhraní vzduchu a absorpčného materiálu, ktorá je vyjadrená pomocou  $Z_0$  vzťahom:

$$Z_{vst} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} tgh(\gamma d)$$
(3.4.2)

pričom  $\varepsilon_r$  je komplexná relatívna dielektrická permitivita absorpčného materiálu,  $\mu_r$  je komplexná relatívna magnetická permeabilita absorpčného materiálu, *d* je hrúbka absorpčného materiálu v smere šírenia EM vlny a  $\gamma$  je konštanta šírenia vĺn daná vzťahom  $\gamma = j\omega \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} / c$ , kde *c* je rýchlosť svetla rovná  $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Odrazové straty *RL* vyjadrujú mieru toho, koľko z dopadajúcej (incidujúcej) EM vlny sa z materiálu odrazí. Analogicky, pri minimálnom odraze, nastáva maximum absorpcie, takže pomocou *RL* dokážeme vyjadriť mieru absorpcie materiálu. Čím budú *RL* menšie, teda viac záporné, tým bude materiál menej odrážať dopadajúce EM žiarenie, ale zároveň bude viac toto žiarenie absorbovať. K mechanizmu absorpcie prichádza v okamihu impedančného prispôsobenia v koaxiálnom meracom vlnovode na rozhraní vzduchu a absorpčného materiálu. Takéto impedančné prispôsobenie znamená, že podiel vstupnej a charakteristickej impedancie bude rovný jednej ( $Z_{vst} / Z_0 = 1$ ) a komplexný koeficient odrazu – rozptylový parameter  $S_{11}$  bude rovný nule ( $S_{11} = 0$ ). Ďalšie absorpčné parametre preto hľadáme numericky využitím počítačového programu, ktorý z frekvenčnej závislosti odrazových strát *RL(f)* stanoví optimálnu frekvenciu absorpcie  $f_m$  a minimum *RL*<sub>min</sub> odrazových strát a následne vypočíta optimálnu hrúbku absorbátora  $d_m$ .



Obr. 3.4.2 Spôsob stanovenia absorpčných parametrov materiálov pre prípad  $RL \le -20$  dB

Šírka pásma absorpcie  $\Delta f$  predstavuje frekvenčný interval, v ktorom dochádza k splneniu podmienky absorpcie, ktorá musela byť vopred zadefinovaná. Podmienka absorpcie určuje, koľko percent dopadnutej EM vlny bude pohltenej absorbátorom. Touto podmienkou vyjadrujeme útlm EM žiarenia v materiáli, resp. najvyššiu povolenú mieru odrazových strát, v jednotkách dB (decibel). Absorpčné kritérium odrazových strát pre pohltenie 75 % dopadajúcej EM vlny je – 6 dB, pre 90 % je to – 10 dB, pre 97 % je to – 15 dB a najpoužívanejšie kritérium je – 20 dB, čo predstavuje 99 % pohltenie dopadajúcej EM vlny daným absorpčným materiálom.

Optimálna frekvencia absorpcie  $f_m$  je frekvencia, pri ktorej sú odrazové straty *RL* minimálne  $RL = RL_{min}$ . Tejto frekvencii odpovedá aj optimálna hrúbka absorbátora  $d_m$ . Považujeme za potrebné spomenúť, že daný materiál nikdy nenavrhujeme na použitie v oblasti pracovných frekvencií, ktoré sú presne rovné optimálnej frekvencii absorpcie  $f_m$ , pretože pri tejto frekvencii dochádza k urýchleniu tepelnej degradácie absorpčného materiálu. Materiál navrhujeme tak, aby jeho optimálna frekvencia absorpcie  $f_m$  bola mierne nižšia alebo vyššia ako sú pracovné frekvencie konkrétnej aplikácie.

#### Tieniaca účinnosť

V tejto časti sa sústredíme na opis tieniacej účinnosti vyjadrenej pomocou jednotlivých fyzikálnych mechanizmov, ktoré stoja za vznikom efektu tienenia vo vzdialenom EM poli. Vzťah 3.4.5 vyjadruje tieniacu účinnosť ako súčet jednotlivých mechanizmov útlmu (útlm odrazom R, útlm aborpciou A a útlm prostredníctvom mnohonásobných odrazov M), pričom každý z týchto

mechanizmov svojím čiastkovým pohltením energie EM vlny stojí za výsledným efektom EM tienenia [18, 29–30]:

$$SE = R + A + M$$
 (dB) (3.4.5)

#### Útlm odrazom R

Na rozhraniach vzduch-tieniaci materiál-vzduch dochádza k čiastočnému odrazu EM vlny, čo je dôvodom vzniku útlmu odrazom. Z princípu použitia tieniaceho materiálu ako odrušovacieho prostriedku je zjavné, že hlavný útlm odrazom vzniká na "vstupnom" rozhraní. Na "výstupné" rozhranie prejde len veľmi malá časť EM vlny. Útlm odrazom nezávisí od hrúbky tieniaceho materiálu a jeho účinnosť je funkciou elektrickej vodivosti tieniaceho materiálu, [18, 29–30].

#### Absorpčný útlm A

V tomto prípade ide o mechanizmus pohltenia časti EM vlny prechádzajúcej tieniacim elektricky vodivým materiálom určitej hrúbky pri zásadnom vplyve tepelných Jouleových strát a hĺbke vniku  $\delta$  elektromagnetického poľa do tieniaceho materiálu podľa vzťahu 3.4.6, z čoho môžeme usudzovať, že s nárastom frekvencie je tento útlm silnejší. Okrem toho, absorpčný útlm priamoúmerne závisí od hrúbky tieniaceho materiálu, [18, 29–30].

$$A = 20 \log e^{\frac{1}{\delta}}$$
 (dB)  $\rightarrow A = 8,69 \cdot \frac{1}{\delta}$  (dB) (3.4.6)

#### Útlm prostredníctvom mnohonásobných odrazov M

Prechod EM vlny vodivým tieniacim krytom je sprevádzaný množstvom opakovaných odrazov tejto vlny (a jej "fragmentov") od všetkých incidujúcich rozhraní podľa obr. 3.4.3 a). V prípade realizácie tienenia výlučne elektricky vodivým materiálom s hrúbkou podstatne väčšou ako hĺbka vniku EM vlny, možno vplyv útlmu spojeného s mnohonásobnými odrazmi prakticky zanedbať. Avšak v prípade elektricky vodivého tieniaceho materiálu s hrúbkou menšou ako hĺbka vniku dochádza vplyvom mnohonásobných odrazov k zníženiu celkovej tieniacej účinnosti tohto materiálu. Je ale na mieste dodať, že tienenie absorbátormi EM vlny s výhodou využíva nezanedbateľnosť kumulatívneho vplyvu mnohonásobných odrazov každej čiastkovej odrazenej EM vlny na celkový tieniaci účinok tieniaceho systému, [18, 29–30].



Obr. 3.4.3 a) Mnohonásobné odrazy na vstupe a výstupe tieniaceho materiálu b) Kolmý dopad rovinnej EM vlny na tieniaci materiál

## 4. Meranie materiálových parametrov

#### 4.1. Meranie elektrickej konduktivity resp. rezistivity

Kľúčovým prvkom merania elektrickej konduktivity je kvalitný elektrický kontakt (ohmický kontakt), pretože výpočty spojené s týmto meraním predpokladajú jednak lineárnu závislosť medzi prúdovou hustotou  $\vec{J}$  a intenzitou elektrického poľa  $\vec{E}$  ( $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ ) a jednak to, že odpor medzi sondou (elektródou) a vzorkou je zanedbateľný. V prípade vzoriek s hodnotou konduktivity resp. rezistivity spadajúcej do oblasti polovodičov stačí použiť dvojelektródový systém. Vzorku v tvare disku sme napájali konštantným U = 20 V a merali sme prúd *I* ampérmetrom. Pri známych rozmeroch vzorky (hrúbka *h* a priemer *D*) sa konduktivita stanovila pomocou nasledovného vzťahu:

$$\sigma_{dc} = \frac{1}{\rho_{dc}} = \frac{h \cdot I}{S \cdot U} \tag{4.1.1}$$

kde  $S = \frac{\pi D^2}{4}$  je aktívna plocha meracej elektródy (resp. plocha vzorky), obr. 4.1.1 vľavo. Meracie pracovisko je na obr. 4.1.1 vpravo, [1, 5, 6, 11 – 14].



Obr. 4.1.1 Vzorka materiálu v tvare disku a meracie pracovisko pre stanovenie elektrickej konduktivity vzoriek materiálov

#### 4.2. Meranie frekvenčných závislostí komplexnej permitivity a permeability

Na meranie frekvenčných závislostí zložiek komplexnej permeability  $\mu = \mu' - j\mu''$  a permitivity  $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$  analyzovaných vzoriek kompozitných systémov sme použili vektorový obvodový analyzátor Agilent E5071C, meraním rozptylových parametrov vzoriek vo frekvenčnom rozsahu od 1 MHz do 3GHz, obr. 4.2.1 a), [4, 6, 16–18].



Obr. 4.2.1 a) Pracovisko pre meranie frekvenčných závislostí komplexnej permeability a permitivity, b) spôsob merania parametra  $S_{11}$  vektorovým obvodovým analyzátorom

Tento prístroj jednoportovo (Port 1) meria parameter  $S_{11}$ , teda rozptylový parameter rovný komplexnému koeficientu odrazu. Nameriame teda podiel intenzít elektrických zložiek EM poľa odrazenej a dopadajúcej EM vlny. Meraním získané hodnoty koeficientov odrazu pri jednotlivých frekvenciách analyzátor prepočíta na príslušné hodnoty impedancie pre konkrétne hodnoty frekvencie podľa vzťahov, [4, 6, 16–18]:

$$S_{11} = \frac{Z_{vst} - Z_0}{Z_{vst} + Z_0} \qquad \implies \qquad Z_{vst} = Z_0 \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \qquad (4.2.1, 4.2.2)$$

Pre správne meranie bolo potrebné najprv nastaviť parametre merania vektorového analyzátora: rozsah meracích frekvencií (1 MHz až 3 GHz), konštantnú hodnotu výstupného signálu (-15 dBm) a logaritmické frekvenčné rozmietanie. Následne je potrebné prístroj kalibrovať tromi štandardnými záťažami: s nulovou impedanciou  $Z = 0 \Omega$  (stav nakrátko), s nulovou admitanciou Y = 0 S (stav naprázdno) a s vlnovou impedanciou  $Z = 50 \Omega$  (stav impedančného prispôsobenia).

Na meranie boli použité príslušné prípravky: magnetický prípravok 16454A a dielektrický prípravok 16453A. Do nich sa vložila testovaná vzorka kompozitného materiálu. Analyzátor meria samozrejme aj pripojený prípravok. Z tohto dôvodu sa po kalibrácii posunula kalibračná (meracia) rovina na rozhranie prípravku tvorené APC-7 konektorom tak, ako je to znázornené na obr. 4.2.1 b).

#### 4.2.1. Meranie komplexnej permitivity

Pre meranie komplexnej permitivity kompozitných vzoriek v tvare diskov sme použili dielektrický prípravok 16453A, obr. 4.2.3 (poznámka: vzorka môže mať tvar aj hranola, doporučené rozmery sú na obrázku). Vplyv meracích elektród a parazitných javov sme eliminovali použitím obvodu na obr. 4.2.4 b), [4, 6, 16–18].



Obr. 4.2.3 Dielektrický prípravok 16453A pre meranie komplexnej permitivity



Obr. 4.2.4 a) Náhradný obvod diskovej vzorky, b) obvod pre kompenzáciu "short" a "open".

Celková impedancia  $Z_{meraná}$  obvodu na kompenzáciu "short" a "open" (obr. 4.2.4 b) je:

$$Z_{\text{meraná}} = Z_{\text{short}} + \frac{Z_{\text{vzorka}} Z_{\text{open}}}{Z_{\text{vzorka}} + Z_{\text{open}}} \longrightarrow Z_{\text{vzorka}} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{\text{meraná}} - Z_{\text{short}}} - \frac{1}{Z_{\text{open}}}}$$
(4.2.3)

kde  $Z_{\text{meraná}}$  je nameraná impedancia prípravku 16453A s diskovou vzorkou,  $Z_{\text{vzorka}}$  je skutočná impedancia prípravku so vzorkou (po eliminácii vplyvu meracích elektród),  $Z_{\text{short}}$  je nameraná impedancia prípravku so skratovanými meracími elektródami a  $Z_{\text{open}}$  je nameraná impedancia prípravku s rozpojenými elektródami. Z náhradnej schémy vzorky (obr. 4.2.4 a), ak namiesto celkovej impedancie budeme uvažovať celkovú admitanciu  $Y_{\text{vzorka}} = 1/Z_{\text{vzorka}}$ , možno odvodiť vzťah pre komplexnú (relatívnu) permitivitu:

$$Y_{\text{vzorka}} = \frac{1}{Z_{\text{vzorka}}} = G + j\omega C = j\omega C_0 \left(\frac{C}{C_0} - j\frac{G}{\omega C_0}\right) = j\omega C_0 \varepsilon$$
(4.2.4)

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' = \frac{Y_{\text{vzorka}}}{j\omega C_0} = \frac{h \cdot Y_{\text{vzorka}}}{j\omega \varepsilon_0 S}$$
(4.2.5)

kde  $C_0 = \varepsilon_0 S/h$ .

#### 4.2.2. Meranie komplexnej permeability

Komplexnú relatívnu permeabilitu sme merali pomocou prípravku 16454A, ktorý predstavuje koaxiálny vlnovod so skratom na konci (obr. 4.2.5). Merací prípravok sa k obvodovému analyzátoru pripája prostredníctvom konektora APC-7. Meranie spočívalo v určení rozdielov získaných hodnôt vstupných impedancií magnetického prípravku bez vloženej vzorky a s vloženou vzorkou. Najprv sa vykonávalo meranie prípravku bez vloženej vzorky a potom s vloženou vzorkou, [4, 6, 16–18].



Obr. 4.2.5 Magnetický prípravok 16454A pre meranie komplexnej permeability

Získali sme tak hodnoty vstupných impedancií prípravku bez vloženej vzorky  $Z_{air}$  a vstupných impedancií prípravku s vloženou vzorkou Z. Tieto hodnoty sme použili na výpočet hodnôt komplexnej (relatívnej) permeability testovaných vzoriek kompozitných materiálov, pričom sme pri výpočtoch vychádzali z nasledovného vzťahu:

$$\mu = \mu' - j\mu'' = 1 + \chi = 1 + \frac{(Z - Z_{air})}{jd.f.\mu_0.\ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)}$$
(4.2.6)

kde  $\chi$  je komplexná susceptibilita testovanej vzorky kompozitu v tvare toroidu, *d* je hrúbka vzorky materiálu v tvare toroidu, *D*<sub>1</sub> a *D*<sub>2</sub> sú vnútorný a vonkajší priemer vzorky materiálu v tvare toroidu, *f* je frekvencia vysokofrekvenčného elektromagnetického poľa a  $\mu_0$  je permeabilita vákua (a približne aj vzduchu),  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Hm<sup>-1</sup>, [4, 6, 16–18].

## 5. Naplnenie téz v kontexte publikovaných príspevkov

V úvode práce boli sformulované štyri tézy, ktorých naplnenie je cieľom tejto práce. Hlavným prostriedkom k naplneniu vytýčených téz bola realizácia výskumu, ktorého výsledky zaznamenávajú príspevky publikované na konferenciách s národnou i medzinárodnou účasťou. Nasledujúce podkapitoly ponúkajú prehľad cieľov a výsledkov jednotlivých publikácií a ich význam v kontexte naplnenia stanovených téz.

#### 5.1. Príspevok I

### Názov: Measurement and Evaluation of Dielectric, Magnetic and Microwave Absorbing Properties of Carbonyl Iron Loaded Polymer Composites

V príspevku sa skúmal vplyv objemovej koncentrácie karbonylového železa (CI) rozptýleného v polymérnej PVC matrici na hodnotu odrazových strát (RL) materiálu vo frekvenčnom pásme od 1 MHz do 3 GHz. Cieľom bolo posúdiť vhodnosť takéhoto kompozitu pre účely tienenia v elektronických aplikáciách napr. v smartfónoch, počítačoch, radaroch a podobne. Objemová koncentrácia karbonylového železa v testovaných vzorkách sa menila v intervale 10-60 obj.% s krokom 10 obj.%. Pomocou meracích metód opísaných v kap. 4 sme na vzorkách v tvare disku získali frekvenčné závislosti komplexnej permitivity znázornené na druhom obrázku (Fig. 2 a) a na vzorkách v tvare toroidu sme získali frekvenčné závislosti komplexnej permeability vzoriek kompozitu (Fig. 2 b). Merania sme realizovali pomocou vektorového obvodového analyzátora Agilent E5071C. Z experimentálne stanovených materiálových parametrov sme postupom uvedeným v časti 3.4 získali frekvenčné závislosti odrazových strát jednotlivých vzoriek kompozitov, z ktorých sme numerickou simuláciou určili absorpčné parametre kompozitných vzoriek s príslušnou objemovou koncentráciou CI v PVC. Kritériom posúdenia tieniaceho efektu bola hodnota odrazových strát  $RL \le -20$  dB (99 % pohltenie EM žiarenia). Získané výsledky uvádzame na treťom obrázku (Fig. 3). Príprava CI/PVC kompozitu, meranie jeho EM vlastností, stanovenie absorpčných vlastností a ich optimalizácia pre využitie na tieniace aplikácie vo frekvenčnej oblasti informačnokomunikačných technológií a inteligentných elektronických systémov viedli k čiastočnému naplneniu téz I, II a III. Výsledky ukázali, že s rastúcou koncentráciou plniva CI v PVC matrici rástli aj hodnoty reálnych a imaginárnych zložiek komplexnej permitivity a permeability materiálu v rámci celého meraného frekvenčného pásma a zároveň došlo k posunu minima odrazových strát (RLmin) smerom k nižším frekvenciám. Tento príspevok bol prezentovaný na konferencii s medzinárodnou účasťou MEASUREMENT 2019, [12].

#### 5.2. Príspevok II

### Názov: UHF noise suppression in circuits of smart electronics using electromagnetic mixture media

V príspevku sme skúmali EM materiálové a absorpčné parametre kompaktného LiZn feritu a kompozitných štruktúr na báze polymérnej PVC matrice a LiZn feritového plniva s meniacou sa objemovou koncentráciou od 10 do 60 obj.% vo frekvenčnom pásme od 1 MHz do 3 GHz. Cieľom bolo posúdiť vhodnosť takéhoto kompozitu ako materiálu na potlačenie nežiaduceho interferenčného šumu v oblasti VVF (veľmi vysokých frekvencií) v elektronických obvodoch smart systémov pracujúcich pri týchto frekvenciách. Vektorovým obvodovým analyzátorom sme experimentálne pomocou koaxiálneho vlnovodu získali frekvenčné závislosti komplexnej permitivity a komplexnej permeability testovaných vzoriek LiZn feritu a kompozitov LiZn/PVC. Zistili sme, že magnetická permeabilita kompozitnej štruktúry dosahovala rádovo nižšie hodnoty ako v prípade kompaktného

feritu. Je to dôsledkom efektu magnetického zriedenia materiálu, ku ktorému došlo rozdrvením predtým kompaktného feritu na častice a rozptýlením týchto častíc do nemagnetickej polymérnej matrice. Dielektrická permitivita nevykazovala čo do veľkosti výrazné zmeny, nastal však mierny pokles jej hodnoty s rastúcou frekvenciou. Frekvenčná disperzia permeability bola spôsobená rezonanciou doménových stien a javom prirodzenej feromagnetickej rezonancie tak LiZn feritu, ako aj LiZn/PVC kompozitov. Frekvenčnú disperziu permitivity testovaných materiálov zapríčinili rezonančné a relaxačné javy spojené s rôznymi typmi dielektrických polarizácií (najmä medzivrstvovej a migračnej). Algoritmom odvodeným v časti 3.4 sme stanovili aj frekvenčné závislosti odrazových strát RL týchto vzoriek a zistili sme, že s rastúcim podielom LiZn feritu v PVC matrici dochádza k posunu minima odrazových strát (RLmin) smerom k nižším frekvenciám, pričom samotný ferit mal minimum odrazových strát pri najnižšej frekvencii ( $f_m = 306$  MHz). Z frekvenčných závislostí odrazových strát sme vypočítali ďalšie absorpčné parametre skúmaných materiálov, ktoré prezentujeme vo forme tabuľky získaných údajov. Za kritérium bolo zvolené aspoň 97 % pohltenie EM vlny, čo predstavuje maximálne možný útlm odrazových strát - 15 dB. Frekvenčné závislosti odrazových strát sú znázornené na deviatom obrázku Fig. 9 a absorpčné parametre skúmaných vzoriek materiálov uvádzame v tabuľke I. Zistili sme, že samotný LiZn ferit pohlcuje EM žiarenie v užšom pásme vo frekvenčnej oblasti približne od 160 do 500 MHz. Kompozitná štruktúra s LiZn feritovým plnivom prejavila svoje EM absorpčné vlastnosti od vyšších frekvencií, konkrétne od 750 MHz. Príprava LiZn/PVC kompozitu, meranie jeho EM vlastností, stanovenie absorpčných vlastností a ich optimalizácia pre využitie na tieniace aplikácie vo frekvenčnej oblasti inteligentných informačno-komunikačných technológií viedli k čiastočnému naplneniu téz I, II a III. Tento príspevok bol prezentovaný na domácej konferencii doktorandov ELITECH'19, [11].

#### 5.3. Príspevok III

#### Názov: Permeability, Permittivity and EM-wave Absorption Properties of Polymer Composites Filled with MnZn Ferrite and Carbon Black

Merania sa realizovali na vektorovom obvodovom analyzátore Keysight E5063A vo frekvenčnej oblasti od 1 MHz do 3 GHz na magnetickom a dielektrickom prípravku (pozri časť 4.2). Okrem toho sme merali aj jednosmernú elektrickú konduktivitu  $\sigma_{dc}$  vzoriek štandardnou dvojelektródovou metódou (pozri časť 4.1). Z nameraných hodnôt impedancií, resp. admitancií a nameraných rozptylových parametrov sme získali frekvenčné závislosti komplexnej permitivity apermeability vzoriek hybridných kompozitov (Fig. 2 a 3), kde ako plnivo boli použité MnZn ferit a uhlíkové sadze (CB) a ako matrica sa použila prírodná butadiénová guma – kaučuk (NBR). Parametrom závislosti bol podiel MnZn feritu v kompozite. Tento podiel sa vyjadroval v jednotkách phr. Táto jednotka hovorí o tom, koľko jednotiek častíc plniva pripadá v kompozite na 100 jednotiek kaučukovej matrice. Podiel MnZn plniva sa menil od 0 do 500 phr s krokom 100 phr. Cieľom tohto príspevku bolo skúmať vhodnosť takejto kompozitnej štruktúry v tieniacich aplikáciách pracujúcich v oblasti do 3 GHz. S rastúcim podielom MnZn feritu sme pozorovali nárast komplexnej permeability aj permitivity kompozitu. Závislosti materiálových parametrov ( $\mu$ ,  $\varepsilon$ ) od frekvencie boli ovplyvnené rezonančnými a relaxačnými efektami úzko zviazanými s rozličnými druhmi magnetizačných procesov a polarizačných mechanizmov.

Z nameraných údajov materiálových parametrov sme získali frekvenčné závislosti odrazových strát (Fig. 4), pri ktorých sme pozorovali posun minima odrazových strát  $RL_{min}$  smerom k nižším frekvenciám s rastúcim podielom MnZn plniva. Z priebehu odrazových strát sme určili aj ostatné absorpčné parametre tejto hybridnej kompozitnej štruktúry, ktoré uvádzame v tabuľke I (Table I).

Zo získaných údajov sme zistili, že uvedené kompozitné materiály sú vhodné pre tieniace účely v pásme od 300 MHz do 2 GHz. Príprava MnZn/CB/NBR kompozitov, meranie ich EM vlastností, stanovenie absorpčných vlastností, ich optimalizácia pre využitie na tieniace aplikácie vo frekvenčnej oblasti inteligentných informačno-komunikačných technológií a samotné vyšetrenie vplyvu uhlíkového plniva na výsledné EM vlastnosti kompozitov viedli k čiastočnému naplneniu téz I, II, III a IV. Tento príspevok bol prezentovaný na medzinárodnej vedeckej konferencii o magnetizme CSMAG'19. Príspevok bol publikovaný v karentovanom časopise Acta Physica Polonica, [14].

#### 5.4. Príspevok IV

#### Názov: Two-Port Frequency-Domain Measurement of Material Parameters using Network Analysis Method

Svojím zameraním na metodiku merania pomocou vektorového obvodového analyzátora Agilent E5071C, tento príspevok zásadným spôsobom rieši tézu č. II a rozširuje možnosti stanovenia komplexnej permeability vzoriek materiálov prstencového tvaru do frekvenčnej oblasti nad 3 GHz. Namiesto 1-portového merania komplexného koeficientu odrazu (resp. rozptylového parametra S11) koaxiálneho prípravku (16454A) s vloženou vzorkou a zakončeného skratom sa v tomto prípade realizuje 2-portové meranie parametrov  $S_{11}$  a  $S_{21}$  na koaxiálnom vedení s vloženou vzorkou. Namerané parametre S<sub>11</sub> a S<sub>21</sub> sa pomocou určitého algoritmu (Nicolson-Ross-Weir-ov algoritmus) prepočítajú na hodnoty permeability  $\mu$  a permitivity  $\varepsilon$ . Mosadzný koaxiálny vlnovod bol navrhnutý a vyrobený na Ústave elektrotechniky FEI STU a ukázalo sa, že je vhodný pre meranie do frekvencie 6,5 GHz. Mosadz poskytuje vysokú elektrickú konduktivitu (asi  $2 \cdot 10^7$  S/m) a dobrú opracovateľnosť. Pre správne šírenie TEM vlny je vnútorný porvch vysoko leštený. Priemer vonkajšieho a vnútorného vodiča zabezpečuje charakteristickú 50 Ω vlnovodovú impedanciu, ktorá bola potvrdená VF meraním vlnovodu LCR metrom. Dĺžka vlnovodu (87 mm) bola zvolená s ohľadom na zabezpečenie dostatočnej citlivosti pri meraní. Verifikácia navrhnutého vlnovodu a použitej meracej metódy bola uskutočnená na reprezentatívnej vzorke kompozitu (27 obj. % MnZn feritu v kaučukovej matrici) čo najviac homogénnej štruktúry s hladkým povrchom. Vzorka meraného materiálu by svojimi rozmermi mala presne odpovedať vnútorným rozmerom vlnovodu, inak by mohli vzniknúť vzduchové medzery, ktoré je potrebné korigovať výpočtom. V pásme do 3 GHz sa výsledky získané z 2-portového merania porovnali aj s výsledkami získanými pomocou 1-portového merania popísaného v časti 4.2.2. Dosiahla sa dobrá zhoda (Fig. 3) a potvrdila sa tým relevantnosť použitej meracej metódy. Použitím MnZn plniva kompozitu tento príspevok čiastočne rieši aj tézu I. Tento príspevok bol prezentovaný na konferencii s medzinárodnou účasťou MEASUREMENT 2019, [13].

#### 5.5. Príspevok V

# Názov: Design of electromagnetic absorbers and shields for high-frequency applications

Príspevok sa zaoberá návrhom tieniacich materiálov a absorbátorov EM vĺn pre niektoré vysokofrekvenčné aplikácie. Predmetom skúmania sú kompozitné materiály na báze hybridného MnZn/LiZn feritového magnetického plniva rozptýleného v nemagnetickej polymérnej PVC matrici. Jedným z cieľov tohto príspevku bolo zmerať vektorovým obvodovým analyzátorom Agilent E5071C vo frekvenčnej oblasti 1 MHz – 1 GHz komplexnú permeabilitu vzoriek hybridných kompozitov s konštantným objemovým plnením 65 obj. % a časticovou frakciou 0-250 $\mu$ m. Objemový pomer MnZn/LiZn sa spolu na 5 vzorkách menil od 1/0 po 0/1 s krokom 0.2 pri zachovanom objemovom plnení 65 obj. % hybridného plniva v matrici. Merania sa realizovali

použitím koaxiálneho magnetického prípravku 16454A, pričom sa získala závislosť frekvenčnej disperzie komplexnej relatívnej permeability, z ktorej sme stanovili hodnotu odrazových strát RL jednotlivých vzoriek. Získali sme frekvenčný interval, v ktorom je daný materiál použiteľný na tieniace účely pri zachovaní stanovenej podmienky absorpcie  $RL \le -20$  dB (99 % pohltenie EM žiarenia) pri optimálnej hrúbke materiálu. So zvyšujúcim sa podielom LiZn plniva pozorujeme v oblasti nízkych frekvencií pokles reálnej zložky komplexnej relatívnej permeability. Takto meniaca sa konfigurácia kompozitu znižuje celkovú schopnosť materiálu akumulovať energiu EM poľa a tým zároveň dochádza k zvýšeniu demagnetizačného poľa vnútri vzorky pričom sa rezonančná frekvencia ako aj využiteľnosť kompozitu pre tieniace účely posunula do oblasti vyšších frekvencií. Opísané skutočnosti sú demonštrované grafmi v časti IV. Okrem zvyšovania kritických frekvencií dochádza pri zvyšovaní LiZn podielu v kompozite k znižovaniu optimálnej hrúbky takéhoto absorbátora EM žiarenia. Využiteľnosť z pohľadu absorpčných vlastností tejto kompozitnej materiálovej štruktúry prehľadne opisuje tabuľka I (Table I). Príspevok ukázal, že EM absorpčné vlastnosti výsledného materiálu môžu byť nastavené lepšie použitím hybridného feritového plniva v porovnaní s použitím feritového plniva iba jednej zložky. Navrhované absorbátory sú vhodné na redukciu vedených a/alebo vyžarovaných EM vĺn v oblasti elektroniky a komunikačných systémov. Príprava MnZn/LiZn/PVC kompozitu, meranie jeho EM vlastností, stanovenie absorpčných vlastností a ich optimalizácia pre využitie na tieniace aplikácie vo frekvenčnej oblasti informačno-komunikačných inteligentných technológií viedli k čiastočnému naplneniu téz I, II a III. Tento príspevok bol prezentovaný na konferencii doktorandov ELITECH'20, pričom bol ocenený cenou dekana, [32].

## 5.6. Príspevok VI

# Názov: Rubber composites filled with carbon nanotubes and magnetic ceramics for electromagnetic noise reduction in cars

Príspevok skúmal vhodnosť použitia vybraných kompozitných materiálov pre tieniace aplikácie zamerané na zníženie EMI v automobiloch vo frekvenčnom pásme 1 MHz až 3 GHz používanom tak v civilnom ako aj vo vojenskom sektore. Pre svoju veľkú hustotu, hmotnosť, náchylnosť ku korózii, pomerne neekonomické spracovanie a výraznému odrazu EM vĺn, kovy nie sú vhodné na tienenie špeciálnych aplikácií napr. v letectve. V tomto príspevku skúmame vplyv uhlíkových viacstenových nanorúrok (MWCNTs) v kombinácii s magneticky mäkkým feritovým plnivom (MnZn ferit) na výsledné absorpčné vlastnosti celej takto nakonfigurovanej štruktúry. Meranie sa preto realizovalo na kompozitných materiáloch na báze hybridného plniva (ferit-uhlíkové nanorúrky) so stálym príspevkom 5 phr nanorúrkového plniva (CNT) v konštantnom objemovom plnení kompozitu, kde ako výstuž bola použitá prírodná kaučuková guma (NBR). Feritovú zložku plniva zastáva MnZn ferit (plnenie od 0 do 500 phr s krokom 100 phr). S poklesom tejto zložky a nárastom frekvencie sledujeme nižšie hodnoty reálnej časti relatívnej permeability vzoriek (Figure 1 vľavo). Vzorka s nulovým zastúpením feritového plniva (0 phr) vykazovala nemagnetický charakter. V oblasti najstrmšieho nárastu reálnej zložky komplexnej permeability sa nachádza maximum stratovej imaginárnej zložky komplexnej permeability. V tejto oblasti začína pásmo frekvencií s uspokojivou schopnosťou EM absorpcie kompozitu. Prudký pokles reálnej a imaginárnej časti komplexnej relatívnej permitivity (Figure 1) a rastúcou frekvenciou je dôsledkom nižších hodnôt elektrickej rezistivity (Table 1) prítomného polovodivého feritu. Vyššie hodnoty permitivít pri týchto vzorkách kompozitov sú dôsledkom prítomnosti elektricky vodivého nanorúrkového plniva. Pre posúdenie tieniacej účinnosti sme výpočtom z nameraných údajov získali frekvenčné priebehy odrazových strát (Figure 2). V stanovenom frekvenčnom pásme sme pozorovali tieniaci efekt ( $RL \leq -6$  dB, resp. 75 % pohltenie EM žiarenia) iba pri vzorkách absorbátorov

s optimálnou hrúbkou 3 mm. Minimum odrazových strát však ďaleko presahovalo hranicu 3 GHz. Vykonané merania elektrickej rezistivity tiež prispeli k získanému priebehu odrazových strát. Bolo preukázané, že vyššia elektrická vodivosť CNT plniva má priamy vplyv na tieniace vlastnosti kompozitov tým spôsobom, že posúva minimum odrazových strát do vyšších frekvencií. Meranie elektrickej rezistivity bolo realizované pomocou štandardnej dvojelektródovej metódy (kapitola 4.1). Pozorované vzorky materiálov sa ukazujú vhodné pre použitie najmä v tieniacich aplikáciách ďaleko nad rámec stanoveného meracieho rozsahu, a preto sa javia ako vhodné materiály pre budúcnosť VF techniky. Príprava CNT/MnZn/NBR kompozitu, meranie jeho EM vlastností, stanovenie absorpčných vlastností, ich optimalizácia pre využitie na tieniace aplikácie vo frekvenčnej oblasti informačno-komunikačných inteligentných technológií používaných v automobiloch ako aj samotné skúmanie vplyvu MWCNTs na výsledné vlastnosti viedli k čiastočnému naplneniu téz II, III a IV. Príspevok bol prezentovaný na konferencii s medzinárodnou účasťou PMA & SRC 2020 v Bratislave, [33, 41].

#### 5.7. Príspevok VII

#### Názov: Carbon-based composites for electromagnetic shielding purposes

Ťažiskom tejto práce boli kompozitné materiálové štruktúry s matricou z prírodnej kaučukovej gumy NBR, ktoré obsahovali tri typy uhlíkových plnív – viacstenové uhlíkové nanorúrky MWCNT, uhlíkové nanovlákna CNF a grafén GP. Z údajov (Figure 1) získaných meraním komplexnej relatívnej permitivity vzoriek na vektorovom obvodovom analyzátore Agilent E5071C a elektrickej rezistivity štandardnou dvojelektródovu metódou sa vyhodnocoval vplyv typu plniva (MWCNT, CNF, GP) na odrazové straty RL (Figure 2). Meranie sa realizovalo v pásme frekvencií od 1 MHz po 3 GHz. V dôsledku vysokej konduktivity MWCNT, zvyšovaním obsahu MWCNT v kompozite rádovo klesá rezistivita MWCNT/NBR kompozitu. Zároveň v porovnaní s CNF/NBR a GP/NBR kompozitmi, v prípade MWCNT/NBR kompozitu výrazne narastajú hodnoty permitivity. Dosiahnuté frekvenčné závislosti komplexnej permitivity vzoriek kompozitov sú spôsobené prebiehajúcimi polarizačnými mechanizmami a nízkou hodnotou rezistivity elektricky vodivých uhlíkových plnív. Najvplyvnešjí polarizačný mechanizmus je pravdepodobne medzivrstvová polarizácia spojená s prítomnosťou priestorového náboja nahromadeného na hraniciach zŕn. V tejto súvislosti, najvyššiu tieniacu účinnosť (v širokých a vysoko položených frekvenčných pásmach) vykazovali práve kompozity s MWCNT plnením. Naopak, najnižšie tieniace účinnosti resp. najnižšie hodnoty permitivity vykazovali kompozity s grafénovým plnivom. Meraním kompozitov, kde ako plnivo sú použité rôzne alotropické modifikácie uhlíka, sa ukazuje, že najmä vplyvom ich vyššej vodivosti, posúvajú uhlíkové plnivá možnosti tieniacich aplikácií do vyšších frekvencií (desiatky GHz) nachádzajúcich sa mimo nami stanoveného frekvenčného pásma. Zároveň je takýto kompozit lepšie odolný voči mechanickému namáhaniu. Meranie EM vlastností MWCNT/NBR, CNF/NBR a GP/NBR kompozitov, stanovenie ich absorpčných vlastností, ich optimalizácia pre využitie na tieniace aplikácie vo frekvenčnej oblasti používaných v informačno-komunikačných inteligentných technológiách ako aj samotné skúmanie vplyvu použitých alotropických modifikácií uhlíka (CNT, CNF, GP) na výsledné vlastnosti viedli k čiastočnému naplneniu téz II, III a IV. Príspevok bol prezentovaný na konferencii s medzinárodnou účasťou PMA & SRC 2020 v Bratislave, [34, 43].

## 6. Prínosy dizertačnej práce a možné aplikácie získaných poznatkov

Prínos tejto práce spočíva najmä v realizovanom výskume špecifikovanom v úvode práce. Realizácia, získané poznatky a závery sú prehľadne zhrnuté v komentároch k publikovaným výstupom v predchádzajúcej kapitole. Výraznou devízou tejto práce je dôsledné spracovanie teoretickej základne potrebnej k realizácii ďalšieho výskumu v oblasti, ktorú práca pokrýva. Práca rozširuje oblasť skúmania elektromagnetických vlastností materiálov o uhlíkové organické materiály a posúva tým oblasti skúmaných frekvencií do výrazne vyšších hodnôt.

Teraz uvedieme stručný prehľad vybraných aplikácií kompozitných materiálových štruktúr najmä v oblasti elektromagnetického tienenia. V oblasti EM tienenia sú efektívne elektricky vodivé materiály. V prípadoch s najprísnejšími požiadavkami na tienenie sa používajú kovové klietky. Pri nižších nárokoch sa používajú elektricky vodivé kompozity na báze uhlíkových sadzí, elektricky vodivého (kovového) plniva, uhlíkových nanotrubíc alebo uhlíkových vlákien. Kompozitné materiály so sebou prinášajú širokú škálu možností využitia. V dnešnom priemysle poznáme kompozitné štruktúry pre termické aplikácie, elektrické aplikácie, elektromagnetické aplikácie, termoelektrické aplikácie, dielektrické aplikácie, optické aplikácie, magnetické aplikácie, elektrochemické aplikácie či biomedicínske aplikácie. Ďalej prinášame prehľad niektorých aplikácií zo spomenutých oblastí techniky, [4, 15].

Vybrané aplikácie elektronických kompozitných materiálových štruktúr:

- EM tienenie (elektricky vodivé kompozity)
- Ochrana proti ESD elektrostatický výboj (podložky, časti matičných dosiek, tašky na notebooky a iné)
- Transparentné (priehľadné) elektródy v OLED systémoch a vo flexibilnej (ohybnej) elektronike
- Aktuátory a snímače ohybu
- Substráty v mikroelektronike pre zvyšovanie stupňa integrácie (dosky plošných spojov, elektrické kontakty, konektory, puzdra, dielektrické medzivrstvy)
- Prvky karosérií automobilov a lietadiel (ako aj časti avioniky), ktoré vyžadujú čo najmenšiu hmotnosť z dôvodu úspory paliva
- Kozmické inžinierstvo a príprava na 6. generáciu komunikačných systémov
- Zníženie detekovateľnosti vojenských lietadiel a plavidiel (toto sa dosahuje znížením odrazu EM vĺn od vojenského objektu napr. absorpčným materiálom)
- Piezoelektrické a pyroelektrické (PYR) senzory a feroelektrické aplikácie
- Zabezpečenie budov proti vibráciám a odposluchu
- Posúvanie EM tienenia do oblasti značne vyšších frekvencií (desiatky GHz) pri použití plniva na báze alotropických modifikácií uhlíka.

## 7. Prehľad súvisiacich príspevkov, konferencií a vedeckých projektov

V tejto časti uvádzame zoznam publikovaných príspevkov, vedeckých konferencií a prehľad vedeckých projektov, na ktorých dizertant participuje.

#### Zoznam evidovaných publikovaných príspevkov:

#### ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

ADC01 DOSOUDIL, Rastislav [60 %] - LISÝ, Kornel [30 %] - KRUŽELÁK, Ján [10 %]. Permeability, permittivity and EM-wave absorption properties of polymer composites filled with MnZn ferrite and carbon black. In *Acta Physica Polonica A*. Vol. 137, Iss. 5 (2020), s. 827-830. ISSN 0587-4246 (2019: 0.579 - IF, Q4 - JCR Best Q, 0.214 - SJR, Q3 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.12693/APhysPolA.137.827 ; CC: 000558676100076 ; SCOPUS: 2-s2.0-85087978090.

#### AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- AFD01 DOSOUDIL, Rastislav [80 %] LISÝ, Kornel [10 %] ĎURMAN, Vladimír [10 %]. Two-port frequency-domain measurement of material parameters using network analysis method. In *Measurement 2019 : 12th International conference on measurement. Smolenice, Slovakia, May 27-29, 2019.* Bratislava : Slovak academy of sciences, **2019**, S. 335-338. ISBN 978-80-972629-3-8. V databáze: IEEE: 8779996 ; WOS 000502830700076.
- AFD02 DOSOUDIL, Rastislav [50%] LISÝ, Kornel [40 %] KRUŽELÁK, Ján [10 %]. Carbon-based composites for electromagnetic shielding purposes. In *PMA 2020 and SRC 2020, Book of Proceedings*. 1.vyd. Bratislava : FCHPT STU, 2020, S. 137-140. ISBN 978-80-89841-13-4.
- AFD03 LISÝ, Kornel [50 %] DOSOUDIL, Rastislav [50 %]. Absorption materials for reduction of electromagnetic interference noise of electronic and mechatronic systems. In *Electromechanical systems application in industry 2017 : Zliechov, Slovakia. August 30-September 1, 2017.* 1.vyd. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2017, S. 43-48. ISBN 978-80-227-4753-0.
- AFD04 LISÝ, Kornel [25 %] DOSOUDIL, Rastislav [60 %] UŠÁKOVÁ, Mariana [15 %]. Measurement and evaluation of dielectric, magnetic and microwave absorbing properties of carbonyl iron loaded polymer composites. In *Measurement 2019 : 12th International conference on measurement. Smolenice, Slovakia, May 27-29, 2019.* Bratislava : Slovak academy of sciences, **2019**, S. 240-243. ISBN 978-80-972629-3-8. V databáze: IEEE: 8779863 ; WOS 000502830700053.
- AFD05 LISÝ, Kornel [45 %] DOSOUDIL, Rastislav [40 %] UŠÁKOVÁ, Mariana [15 %]. UHF noise suppression in circuits of smart electronics using electromagnetic mixture media. In *ELITECH'19 [elektronický zdroj] : 21st Conference of doctoral students. Bratislava, Slovakia. May 29, 2019.* 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, **2019**, CD-ROM, [5] s. ISBN 978-80-227-4915-2.

- AFD06 LISÝ, Kornel [50 %] DOSOUDIL, Rastislav [45 %] UŠÁKOVÁ, Mariana [5 %]. Design of electromagnetic absorbers and shields for high-frequency applications. In *ELITECH'20* [elektronický zdroj] : 22st Conference of doctoral students. Bratislava, Slovakia. May 27, 2020. 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2020, CD-ROM, [5] s. ISBN 978-80-227-5001-1.
- AFD07 LISÝ, Kornel [50 %] DOSOUDIL, Rastislav [40 %] KRUŽELÁK, Ján [10 %]. Rubber composites filled with carbon nanotubes and magnetic ceramics for electromagnetic noise reduction in cars. In *PMA 2020 and SRC 2020, Book of Proceedings*. 1.vyd. Bratislava : FCHPT STU, 2020, S. 151-154. ISBN 978-80-89841-13-4.

#### Zoznam navštívených konferencií:

Konferencia	Rok	Miesto konania	Príspevok
MEASUREMENT'19	2019	Smolenice	Ι
ELITECH'19	2019	FEI STU Bratislava	II
ELITECH'20	2020	FEI STU Bratislava	V
PMA & SRC 2020	2020	Bratislava	VI

Tab. 7.1 Prehľad konferencií, na ktorých sa dizertant zúčastnil

## Vedecké projekty:

- VEGA, ev. číslo projektu: 1/0405/16, názov projektu: Príprava a analýza vybraných EM, mikroštrukturálnych a fyzikálnochemických vlastností pokročilých magnetických, magnetodielektrických, kompozitných a nanokompozitných materiálových štruktúr, doba riešenia: 01.01.2016-31.12.2019, zodpovedný riešiteľ: doc. Ing. Rastislav Dosoudil, PhD.
- číslo 2) APVV. ev. projektu: APVV-16-0059, názov projektu: Výskum nových magnetodielektrických keramických kompozitných materiálových а štruktúr, doba riešenia: 01.07.2017-30.06.2021, zodpovedný riešiteľ: doc. Ing. Rastislav Dosoudil, PhD.
- 3) Mladý výskumník, projekt získaný v rámci Programu na podporu mladých výskumníkov, názov projektu: Syntéza elektronických kompozitných materiálových štruktúr a analýza ich EM a mikrovlnných absorpčných vlastností, doba riešenia: 20.03.2019-31.12.2019, zodpovedný riešiteľ: Ing. Kornel Lisý.
- VEGA, ev. číslo projektu: 1/0135/20, názov projektu: Keramické a flexibilné kompozitné materiály s riadenou modifikáciou ich elektromagnetických vlastností, doba riešenia: 01.01.2020-31.12.2023, zodpovedný riešiteľ: doc. Ing. Rastislav Dosoudil, PhD.

## Záver

Táto práca rozširuje poznatky štúdia a predstavuje výskum v oblasti vysokofrekvenčných elektromagnetických vlastností elektronických kompozitných materiálových štruktúr. Prináša a zhŕňa aktuálne poznatky z tejto oblasti materiálového výskumu. Práca charakterizuje kompozitné materiály, rozdeľuje ich podľa zloženia a opisuje ich jednotlivé zložky. Následne opisuje dielektrické, magnetické a elektrické vlastnosti kompozitov, uvádza vybrané modely na ich výpočet a veľkú časť venuje oblasti meraniu materiálových parametrov skúmaných štruktúr. Ďalej uvádza experimentálne publikované na domácich výsledky (s prácou súvisiaceho výskumu) a medzinárodných konferenciách, zborníkoch alebo iných publikáciách. Práca rozširuje oblasť skúmania elektromagnetických vlastností materiálov o uhlíkové organické materiály a posúva tým oblasti skúmaných frekvencií do výrazne vyšších hodnôt. V závere prináša možné prínosy a technické aplikácie spojené s výskumom v oblasti materiálových vlastností elektronických kompozitných materiálových štruktúr.

Oblasť, ktorú skúmame je veľmi rozsiahla, ale prináša možnosť napredovať v oblasti elektroniky, elektrotechniky a príbuzných odvetviach priemyslu, a preto ju považujeme za veľmi perspektívnu a potrebnú pre spoločnosť.

Experimenty v tejto práci boli realizované v rámci projektov Vedeckej grantovej agentúry VEGA č. 1/0405/16 a VEGA č. 1/0135/20 (zodpovedný riešiteľ: doc. Ing. Rastislav Dosoudil, PhD.), v rámci projektu Agentúry na podporu vedy a výskumu č. APVV-16-0059 (zodpovedný riešiteľ: doc. Ing. Rastislav Dosoudil, PhD.) a v rámci Programu na podporu mladých výskumníkov (Mladý výskumník), akronym SEKMAV, číslo zákazky 1321,(zodpovedný riešiteľ: Ing. Kornel Lisý).

## Literatúra

- [1] PAL, Rajinder: *Electromagnetic, Mechanical, and Transport Properties of Composite Materials*. Boca Raton: CRC Press, 2014. 442 s. ISBN: 978-1-420-08921-9.
- [2] ASHBY, M. F. a kol.: *Engineering Materials and Processes Desk Reference*. London: Butterworth-Heinemann, 2009. 552 s. ISBN: 978-0-080-87839-3.
- [3] MATĚJKA, Libor MERHARI, Lhadi: Hybrid Nanocomposites for Nanotechnology: Electronic, Optical, Magnetic and Biomedical Applications. London: Springer, 2009. 847 s. ISBN: 978-0-387-72398-3.
- [4] LISÝ, Kornel: Zvýšenie elektromagnetickej odolnosti automobilov. Bakalárska práca (vedúci: doc. Ing. Rastislav Dosoudil, PhD.). FEI STU Bratislava, 2016. 49 s. Ev. č.: FEI-100852-72699.
- [5] DOSOUDIL, Rastislav: Moderné materiály pre elektrotechniku, prednášky a cvičenia z predmetu (osobná komunikácia)
- [6] LISÝ, Kornel: Zníženie elektromagnetických interferencií v elektronických obvodoch IKT systémov. Diplomová práca (vedúci práce: doc. Ing. Rastislav Dosoudil, PhD.). FEI STU Bratislava, 2018. 66 s. Ev. č.: FEI-104356-72699.
- [7] GRADY, B.P.: Carbon Nanotube-Polymer Composites. New Jersey: Wiley, 2011. 352 s. ISBN: 978-1-118-08437-3.
- [8] MARCACCIO, Massimo PAOLUCCI, Francesco: *Making and Exploiting Fullerenes, Graphene, and Carbon Nanotubes*. London: Springer-Verlag, 2014. 270 s. ISBN: 978-3-642-55083-6.
- [9] MORRIS, James E INIEWSKI, Krzysztof: Graphene, Carbon Nanotubes, and Nanostructures: Techniques and Applications. Boca Raton: CRC Press, 2016. 364 s. ISBN: 978-1-4665-6057-4.
- [10] RENDEK, Marek: *Kompozitní materiály používané při výrobě automobilů*. Bakalárska práca (vedúci práce: Ing. Karel Neměc, PhD.). VUT Brno, 2016. 45 s.
- [11] LISÝ, Kornel DOSOUDIL, Rastislav UŠÁKOVÁ, Mariana. UHF noise suppression in circuits of smart electronics using electromagnetic mixture media. In *ELITECH'19 [elektronický zdroj] : 21st Conference of doctoral students, BA, Slovakia. May 29, 2019.* 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2019, CD-ROM, [5] s. ISBN 978-80-227-4915-2.
- [12] LISÝ, Kornel DOSOUDIL, Rastislav UŠÁKOVÁ, Mariana. Measurement and evaluation of dielectric, magnetic and microwave absorbing properties of carbonyl iron loaded polymer composites. In *Measurement 2019 : 12th International conference on measurement. Smolenice, Slovakia, May 27-29, 2019.* Bratislava : Slovak academy of sciences, 2019, S. 240-243. ISBN 978-80-972629-3-8. V databáze: IEEE: 8779863.
- [13] DOSOUDIL, Rastislav LISÝ, Kornel ĎURMAN, Vladimír. Two-port frequency-domain measurement of material parameters using network analysis method. In *Measurement 2019 : 12th International conference on measurement. Smolenice, Slovakia, May 27-29, 2019.* Bratislava : Slovak academy of sciences, 2019, S. 335-338. ISBN 978-80-972629-3-8. V databáze: IEEE: 8779996.
- [14] DOSOUDIL, Rastislav LISÝ, Kornel KRUŽELÁK, Ján. Permeability, permittivity and em-wave absorption properties of polymer composites filled with MnZn ferrite and carbon black. In CSMAG'19 : 17th Czech and Slovak conference on magnetism: Book of abstracts. Košice, Slovakia. June 3-7, 2019. Bratislava : Slovak Physical Society, 2019, S. 108. ISBN 978-80-89855-07-0.
- [15] CHUNG, Deborah D. L.: Composite Materials: Functional Materials for Modern Technologies. London: Springer-Verlag, 2003. 289 s. ISBN: 978-1-4471-3734-4.
- [16] FOLTÍN, Igor: *Potlačenie EMI v telekomunikačných systémoch*. Diplomová práca (vedúci práce: doc. Ing. Rastislav Dosoudil, PhD.) FEI STU Bratislava, 2011. Ev. č.: FEI-5410-28552.
- [17] JOSKO, Ladislav: Hybridné absorbátory pre obvody mobilných komunikačných systémov. Diplomová práca (vedúci práce: doc. Ing. Rastislav Dosoudil, PhD.) FEI STU Bratislava, 2012. 64 s. Ev. č.: FEI- FEI-5410-50215.
- [18] FOLTÍN, Igor: Meranie a hodnotenie absorpčných vlastností materiálov určených pre zamedzenie vzniku vyžarovaných a vedených EM emisií v systémoch bezdrôtovej a mobilnej elektroniky. Bakalárska práca (vedúci: doc. Ing. Rastislav Dosoudil, PhD.) FEI STU Bratislava, 2009. 64 s.
- [19] [online]. [cit. 2021-01-31]. Obrázok flexibilnej (ohybnej) elektroniky. Dostupné na internete: <a href="https://www.thehansindia.com/posts/index/Hyderabad-Tab/2017-06-26/">https://www.thehansindia.com/posts/index/Hyderabad-Tab/2017-06-26/</a> New-design-improves-flexible-wearable-electronics-performance/308654>
- [20] [*online*]. [cit. 2021-01-31]. Obrázok transparentnej (priehľadnej) elektroniky. Dostupné na internete: <a href="https://twitter.com/materialsfutur1/status/887242224689348608">https://twitter.com/materialsfutur1/status/887242224689348608</a>>
- [21] KRUŽELÁK, Ján: Kompozitné materiály s magnetickými plnivami. Dizertačná práca (vedúci: prof. Ing. Ivan Hudec, CSc.) FCHPT STU Bratislava, 2011. Ev. č.: FCHPT-19991-25508.
- [22] POZAR, D. M.: Microwave engineering, 3. vydanie, J. Wiley and Sons, 2005.

- [23] POLJAK, František: Dielektriká izolanty, vyd. ALFA Bratislava, 1983, 176 strán, MDT 621.315.61.
- [24] ŠTOFA, Ján: *Otázky a odpovede z elektrotechnických materiálov*, vydavateľstvo Alfa, Bratislava, 1. vyd., 1979, MDT 621.3.002.3.
- [25] MENTLÍK, Václav: Dielektrické prvky a systémy, BEN, Praha, 2006
- [26] KRUPIČKA, Svatopluk: Fyzika feritů a příbuzných magnetických kysličníků, 1. vyd. Praha: Academia NČSAV, 1969. 596 s.
- [27] CHIKAZUMI, C.: Fizika ferromagnetizma, Mir, Moskva, 1960
- [28] SMIT, J. WIJN, H. P. J.: Ferrite, Philips Technische Bibliothek, Centre Verlag, Eindhoven, 1962
- [29] SVAČINA, Jiří: Elektromagnetická kompatibilita, 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 2001. 156 s. ISBN 978-80-214-1873-8.
- [30] SVAČINA, Jiří: Základy elektromagnetické kompatibility (EMC). Část 3: Způsoby omezování rušení odrušovací prostředky a elektromagnetické stínění. In: *Elektrorevue* [online]: roč. 2, čl. 41 (2000). 07. 04. 2009 [cit. 31. 01. 2021]. Dostupné na internete: <a href="http://www.elektrorevue.cz/clanky/00041/index.html">http://www.elektrorevue</a> [online]: roč. 2, čl. 41 (2000). 07. 04. 2009 [cit. 31. 01. 2021]. Dostupné na internete: <a href="http://www.elektrorevue.cz/clanky/00041/index.html">http://www.elektrorevue</a> [online]: roč. 2, čl. 41 (2000). 07. 04. 2009 [cit. 31. 01. 2021]. Dostupné na internete: <a href="http://www.elektrorevue.cz/clanky/00041/index.html">http://www.elektrorevue</a> [online]: roč. 2, čl. 41 (2000). 07. 04. 2009 [cit. 31. 01. 2021]. Dostupné na internete: <a href="http://www.elektrorevue.cz/clanky/00041/index.html">http://www.elektrorevue</a> [online]: roč. 2, čl. 41 (2000). 07. 04. 2009 [cit. 31. 01. 2021]. Dostupné na internete: <a href="http://www.elektrorevue.cz/clanky/00041/index.html">http://www.elektrorevue.cz/clanky/00041/index.html</a> [SSN 1213-1539.
- [31] OLACH, O. MILOVSKÁ, S.: *Elektrotechnické materiály*, 1. vyd., Vydavateľstvo STU, Bratislava, 2004, 148 s., ISBN 80-227-2011-9.
- [32] LISÝ, Kornel DOSOUDIL, Rastislav UŠÁKOVÁ, Mariana. Design of electromagnetic absorbers and shields for high-frequency applications. In *ELITECH'20 [elektronický zdroj] : 22st Conference of doctoral students. Bratislava, Slovakia. May 27, 2020.* 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2020, CD-ROM, [5] s. ISBN 978-80-227-5001-1.
- [33] LISÝ, Kornel DOSOUDIL, Rastislav KRUŽELÁK, Ján. Rubber composites filled with carbon nanotubes and magnetic ceramics for electromagnetic noise reduction in cars. In *PMA 2020 and SRC 2020, Book of Proceedings*. 1.vyd. Bratislava : FCHPT STU, 2020, S. 151-154. ISBN 978-80-89841-13-4.
- [34] DOSOUDIL, Rastislav LISÝ, Kornel KRUŽELÁK, Ján. Carbon-based composites for electromagnetic shielding purposes. In PMA 2020 and SRC 2020, Book of Proceedings. 1.vyd. Bratislava : FCHPT STU, 2020, S. 137-140. ISBN 978-80-89841-13-4.
- [35] MATOS, Carolina F. ZARBIN, Aldo J. G. GALEMBECK, Fernando. Chapter One Nanostructures and Compatibility in Rubber Nanocomposites Containing Carbon Nanofillers, In *Carbon-Based Nanofillers and Their Rubber Nanocomposites*, Elsevier, 2019, s. 1-26, ISBN 978-0-12-817342-8
- [36] ZHANG, S. a kol.: Chapter 14 Carbon Nanotubes and Their Assemblies: Applications in Electromagnetic Interference Shielding, In *Micro and Nano Technologies, Nanotube Superfiber Materials*, 2.vyd., William Andrew Publishing, 2019, s. 335-357, ISBN 978-0-12-812667-7
- [37] SINGHA, K. a kol.: Recent Advancements in Wearable & Smart Textiles: An Overview, In *Materials Today: Proceedings*, Volume 16, Part 3, 2019, Pages 1518-1523, ISSN 2214-7853
- [38] MO, Jun-Hyun KIM, Ki Chul JANG, Kwang-Suk. Well-dispersed carbon nanotube/polymer composite films and application to electromagnetic interference shielding, In *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Volume 80, 2019, s. 190-196, ISSN 1226-086X
- [39] ARIEF, Injamamul BISWAS, Sourav BOSE, Suryasarathi. Graphene analogues as emerging materials for screening electromagnetic radiations, In *Nano-Structures & Nano-Objects*, Volume 11, 2017, s. 94-101, ISSN 2352-507X
- [40] SABIRA, K. a kol.: On the absorption dominated EMI shielding effects in free standing and flexible films of poly(vinylidene fluoride)/graphene nanocomposite, In *European Polymer Journal*, Volume 99, 2018, s. 437-444, ISSN 0014-3057
- [41] TURCZYN, R. a kol.: Fabrication and application of electrically conducting composites for electromagnetic interference shielding of remotely piloted aircraft systems, In *Composite Structures*, Volume 232, 2020, ISSN 0263-8223
- [42] IQBAL, S. a kol.: Mesoporous strontium ferrite/polythiophene composite: Influence of enwrappment on structural, thermal, and electromagnetic interference shielding, In *Composites Part B: Engineering*, Volume 175, 2019, ISSN 1359-8368
- [43] SCHMITZ, D.P. a kol.: Electromagnetic interference shielding effectiveness of ABS carbon-based composites manufactured via fused deposition modelling, In *Materials Today Communications*, Volume 15, 2018, s. 70-80, ISSN 2352-4928
- [44] RAZZITTE, A.C. FANO, W.G. JACOBO, S.E. Electrical permittivity of Ni and NiZn ferrite–polymer composites, In *Physica B: Condensed Matter*, Volume 354, Issues 1–4, 2004, s. 228-231, ISSN 0921-4526
- [45] KUMAR, D. MOHARANA, A. KUMAR, A. Current trends in spinel based modified polymer composite materials for electromagnetic shielding, In *Materials Today Chemistry*, Volume 17, 2020, ISSN 2468-5194
- [46] POSADA, A. O. G. a kol.: Electromagnetic shielding response of magnetite elastomeric composites: Source and filler content dependence, In *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 9, Issue 5, 2020, s. 10597-10607, ISSN 2238-7854

## **Summary**

This work expands the knowledge of the study and presents research in the field of highfrequency electromagnetic properties of electronic composite material structures. It brings and summarizes current knowledge in this area of material research. The work characterizes composite materials, divides them according to their composition and describes their individual components. Subsequently, it describes the dielectric, magnetic and electrical properties of composites, presents selected models for their calculation and devotes a large part to the measurement of material parameters of the investigated structures. It also presents (work-related) experimental results published at domestic and international conferences, proceedings or other publications. The work expands the field of research of electromagnetic properties of materials by carbon organic materials and thus shifts the areas of investigated frequencies to significantly higher values. Finally, it brings possible benefits and technical applications associated with research in the field of material properties of electronic composite material structures.

The field of our research is greatly extensive, but it provides an opportunity to make progress in electronics, electrical engineering and related industries. Therefore we consider it to be very promising and necessary for whole society.

This work was supported by the Scientific Grant Agency of the Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic under the contracts no. VEGA 1/0405/16 and VEGA 1/0135/20 (responsible solver: doc. Ing. Rastislav Dosoudil, PhD.), by the Slovak Research and Development Agency under the project no. A DVV 16 0050

by the Slovak Research and Development Agency under the project no. APVV-16-0059 (responsible solver: doc. Ing. Rastislav Dosoudil, PhD.)

and by the financial assistance from the STU Grant scheme for Support of Excellent Teams of Young Researchers, no. 1321, acronym SEKMAV (responsible solver: Ing. Kornel Lisý).