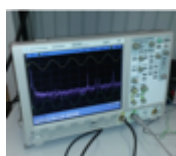


Návrh meracej zostavy pre meranie volt-ampérových charakteristík spojov

Sedlačko Lukáš · Elektrotechnika

15.07.2015



Článok spracúva problematiku elektrických vlastností spájkovaných spojov a spôsobov ich merania. Článok popisuje návrh meracieho pracoviska pre meranie volt-ampérovej charakteristiky spájkovaných a kontaktovaných spojov. V závere sú uvedené vybrané merania volt-ampérovej charakteristiky jednotlivých vzoriek a taktiež FFT spektrum

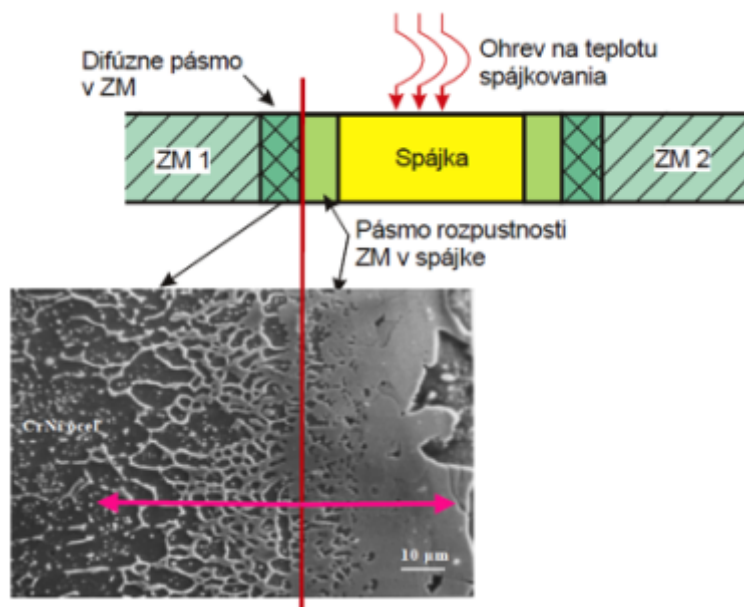
signálu nameraného na vzorke.

Úvod

Vodivé spoje sú neoddeliteľnou súčasťou každého elektronického zariadenia, preto sú na ich kvalitu kladené vysoké požiadavky. Najvyužívanejšou technológiou vodivého spájania je spájkovanie. Medzi základné požiadavky na kvalitu spojov patria vysoká spoľahlivosť, nízky šum, minimálny odpor prepojenia a čo najnižšia nelinearita volt-ampérovej charakteristiky. Všetky tieto parametre vodivých spojov ovplyvňujú kvalitu prenášaného signálu, čo je dôležité najmä pri vysokých frekvenciách. Dôležitá je diagnostika kvality a spoľahlivosti vodivých spojov, ktoré sú súčasťou elektronických zariadení. Spoľahlivosť spájkovaného spoja je ovplyvnená tvorbou medzifázového rozhrania na báze intermetalických zlúčenín na oboch rozhraniach (DPS, súčiastka). Kvalita spojov je ovplyvňovaná premennými vlastnosťami rôznych parametrov. Kvalitu spájkovaného spoja najviac ovplyvňujú starnutie, mechanické namáhanie a teplotné namáhanie [1].

Spájkovaný spoj

Spájkovaný spoj je metalurgický spoj vytvorený spájkovaním za účelom elektromechanického spojenia dvoch alebo viacerých kovových alebo pokovených súčastí [1]. Mikroštruktúra spájkovaného spoja ovplyvňuje všetky jeho vlastnosti. Výsledky akýchkoľvek skúšok spájkovaného spoja odrážajú stav jeho mikroštruktúry [9].

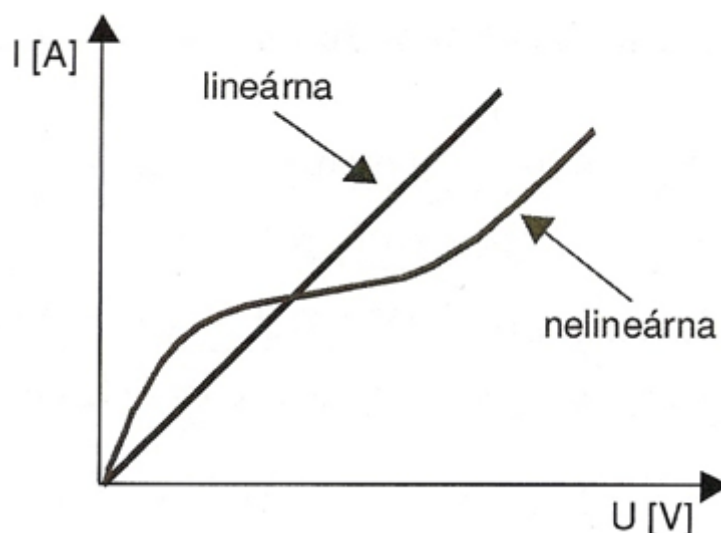


Obr. 1 Mikroštruktúra spájkovaného spoja [10]

Elektrická vodivosť spoja môže byť negatívne ovplyvnená chybami spájkovania (studený spoj, zanesenie tavidlá do spoja, mostíky, kvaple, dutiny, nedostatočne vyplnený spoj, nedostatočný prechod spájky do základného materiálu, trhliny a pod.) a vlastnosťami difúznej oblasti, ktorá má spravidla horšiu elektrickú vodivosť ako použitá spájka [1]. Najčastejší spôsob, ktorým sa posudzujú elektrické vlastnosti spájkovaných spojov, je meranie ich elektrického odporu, nelinearity volt-ampérovej charakteristiky alebo šumu. Všetky tri spôsoby hodnotenia spájkovaných spojov majú svoje opodstatnenie. Konkrétny spôsob posudzovania elektrických vlastností spájkovaných spojov je daný ich aplikáciou [1]. Časť elektrického obvodu pripojená dvoma svorkami, sa nazýva dvojpól. Dvojpólom je napríklad rezistor, kondenzátor, cievka alebo spájkovaný spoj. Ak dvojpólom prechádza elektrický prúd I a na jeho svorkách je elektrické napätie U tak rovnica:

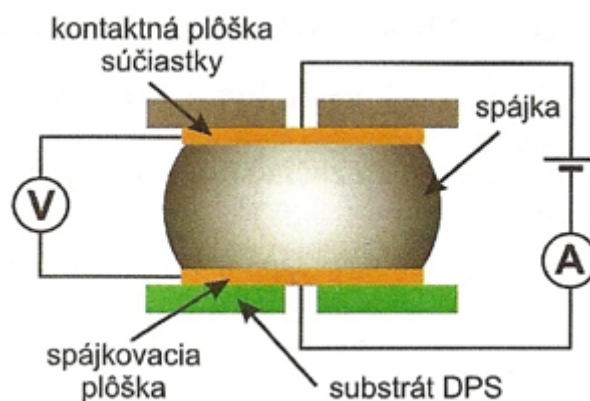
$$I = f(U) \quad (1)$$

vyjadrujúca závislosť prúdu dvojpólom od napätia na jeho svorkách je charakteristická rovnica dvojpólu. Graf tejto závislosti je volt-ampérová charakteristika dvojpólu. Deriváciou volt-ampérovej charakteristiky je možné vypočítať veľkosť elektrického odporu pre dané napätie (prúd). Odpor spájkovaného spoja by mal byť čo najnižší (rádovo na úrovni $10^{-5} \Omega$) a jeho hodnota by mala byť konštantná v celom rozsahu aplikovaných veľkostí pracovných prúdov a napätí.



Obr. 2 Volt-ampérová charakteristika dvojpoľu [1]

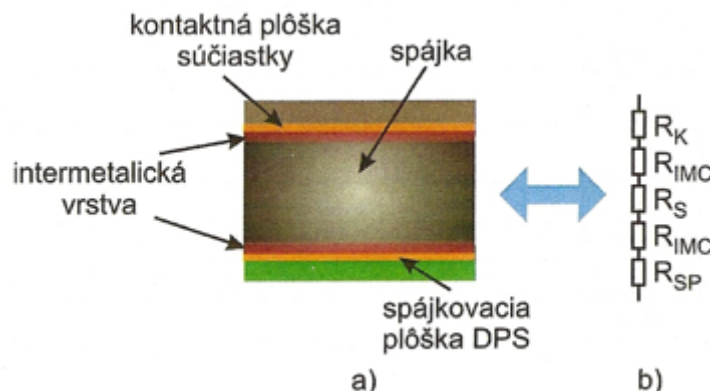
Meranie elektrického odporu spájkovaného spoja je komplikované skutočnosťou, že sa jedná o veľmi malé odpory - rádovo na úrovni $10^{-5} \Omega$. Pri meraní takto malých odporov dochádza k stavu, keď odpor prívodných vodičov je väčší (až 1000 krát) v porovnaní s odporom meraného objektu (spájkovaného spoja). Preto pri meraní odporu dvoma vodičmi (dvojvodičová metóda) dochádza k zásadnej chybe merania, nakoľko meraný odpor v sebe zahŕňa aj odpor prívodných vodičov. Pre odstránenie nevýhod dvojvodičovej metódy merania odporu sa využíva štvorvodičová metóda, ktorej použitím sa pri meraní eliminuje vplyv odporu prívodných vodičov. Jej presnosť rastie s kvalitou použitých meracích prístrojov a najmä s rastúcou veľkosťou vnútorného odporu voltmetra, čím sa prúd tečúci voltmetrom minimalizuje. Princíp merania je na Obr. 3 [1].



Obr. 3 Meranie elektrického odporu spájkovaného spoja štvorbodovou metódou [1]

Meraný spájkovaný spoj je napájaný pomocou dvoch vodičov konštantným prúdom známej hodnoty. Prechádzajúci prúd I vytvára na meranom spoji úbytok napätia U , ktoré sa odmeria voltmetrom. Pretože vnútorný odpor voltmetra je veľmi veľký (rádovo $M\Omega$), nepreteká ním skoro žiaden prúd a vytvára sa len veľmi malý úbytok napätia na jeho meracích vodičoch. Hodnota odporu spájkovaného spoja je dôležitou vlastnosťou spájkovaného spoja. V prípade merania odporu spájkovaného spoja sa nemeria len odpor samotnej spájky, ale celkový odpor spájkovaného spoja. Celkový odpor spájkovaného spoja v sebe zhrňa: odpor spájky (R_s), odpor intermetallickej vrstvy rozhrania spájka/spájkovacia ploška DPS, resp. spájka/kontaktná ploška súčiastky

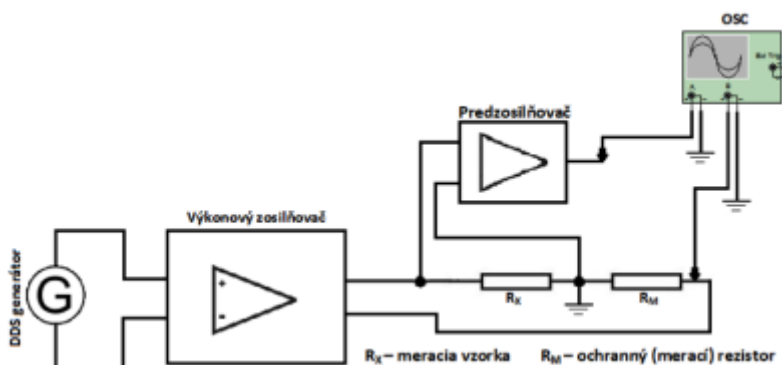
(R_{IMC}), odpor spájkovacej plôšky (R_{SP}), odpor kontaktnej plôšky súčiastky (R_K) a prechodové odpory medzi týmito jednotlivými súčastami spájkovaného spoja (Obr. 4). Celkový odpor spájkovaného spoja je sumou odporov jednotlivých súčastí spoja (plus prechodové odpory) a je možné ho interpretovať ako sériové zapojenie rezistorov. Vplyvom starnutia dochádza k zmene v mikroštruktúre spájkovaného spoja, a teda aj k zmene odporu jednotlivých súčastí spoja [1].



Obr. 4 Elektrický odpor spájkovaného spoja a) zjednodušená štruktúra spájkovaného spoja b) zložky elektrického odporu prispájkovaného spoja [1]

Realizácia meracieho pracoviska pre meranie elektrického odporu spájkovaných spojov

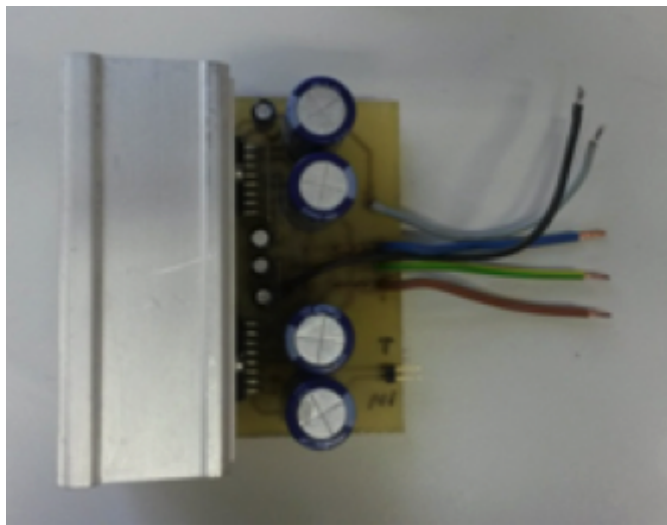
Navrhnuté a realizované zariadenie na meranie nelinearity voltampérovej charakteristiky spájkovaných spojov využíva DDS generátor, ktorý generuje harmonický signál. Tento signál je ďalej zosilnený pomocou výkonového zosilňovača. Na výstup výkonového zosilňovača je pripojená meraná vzorka. Do série s meranou vzorkou je zapojený merací (ochranný) rezistor, ktorý slúži na snímanie pretekajúceho prúdu. Prvý kanál osciloskopu je pripojený na meráciu vzorku a druhý kanál na merací (ochranný) rezistor. V tomto zapojení osciloskop sníma jedným kanálom napätie na vzorke, druhým kanálom napätie na ochrannom rezistore, ktoré je priamo úmerné pretekajúcejmu prúdu. Využitím zobrazenia X-Y je teda možné priamo zobrazit tvar volt-ampérovej charakteristiky. Keďže pri meraní nelinearity volt-ampérovej charakteristiky spájkovaných spojov je meraný odpor veľmi malý (rádovo $10^{-6} \Omega$), teda aj úbytok napätia na tomto spoji je rádovo v μV , bolo potrebné navrhnuť vhodný predzosilňovač. Schéma meracieho pracoviska spolu s predzosilňovačom je na Obr. 5.



Obr. 5 Schéma meracieho pracoviska

Výkonový zosilňovač

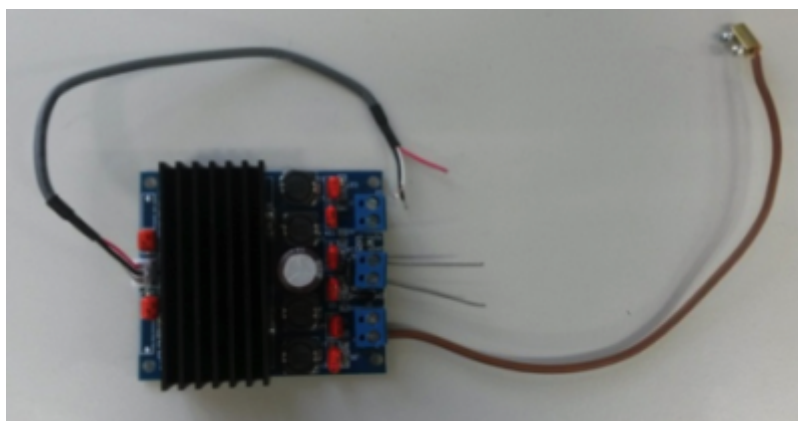
Výkonový zosilňovač slúži na budenie meranej vzorky meracím signálom s požadovanou amplitúdou. Musí zabezpečiť signál dostatočnej kvality a amplitúdy. V priebehu návrhu meracieho pracoviska boli testované dva typy výkonových zosilňovačov. V oboch prípadoch boli vzhľadom na požadovaný prúdový a frekvenčný rozsah, ako aj faktor dostupnosti použité štandardné integrované obvody pre výkonové audio zosilňovače. Verzia s lineárnym koncovým stupňom využívala dvojicu obvodov TDA 7294 v mostíkovom zapojení (obr. 6) odporúčanom výrobcom [8]. Výhodným sa javilo veľmi nízke THD. Pri praktickom použití sa však pri hraničných podmienkach objavovali zákmity (spôsobené pravdepodobne prepínaním výkonových prvkov v štruktúre IO), ktoré znehodnocovali merací signál. Následkom skreslenia meracieho signálu nebolo možné tento obvod využiť pre prúdy väčšie ako 4 A.



Obr. 6 Výkonový zosilňovač TDA 7294

Výkonový zosilňovač TDA 7492

Vzhľadom na uvedené problémy bola testovaná verzia so spínaným koncovým stupňom. Testovaný bol komerčne dostupný audio modul s TDA 7492 (Obr. 7) a TDA 7498. Tieto moduly s tabulkovo vyšším THD poskytovali uspokojujúce výsledky aj pri vyšších prúdoch (až 10 A). Vyššie THD je spôsobené spínacou frekvenciou koncového stupňa (310 kHz), ktorú je však možné odfiltrovať nakoľko sa nachádza mimo skúmaného frekvenčného pásma.



Obr. 7 Výkonový zosilňovač TDA 7492

Merací predzosilňovač

Nakoľko pri meraní elektrických vlastností spájkovaných spojov je meraný odpor veľmi malý, je aj meraný signál rádovo v μV . Pre priame meranie osciloskopom je nutné tento signál zosilniť aspoň na úroveň mV. Pre tento účel bol navrhnutý merací predzosilňovač zložený z troch blokov: z diferenčného zosilňovača, hornopriepustného filtra a zosilňovača s nastaviteľným zosilnením (Obr. 8).



Obr. 8 Blokovaná schéma predzosilňovača

Diferenčný zosilňovač

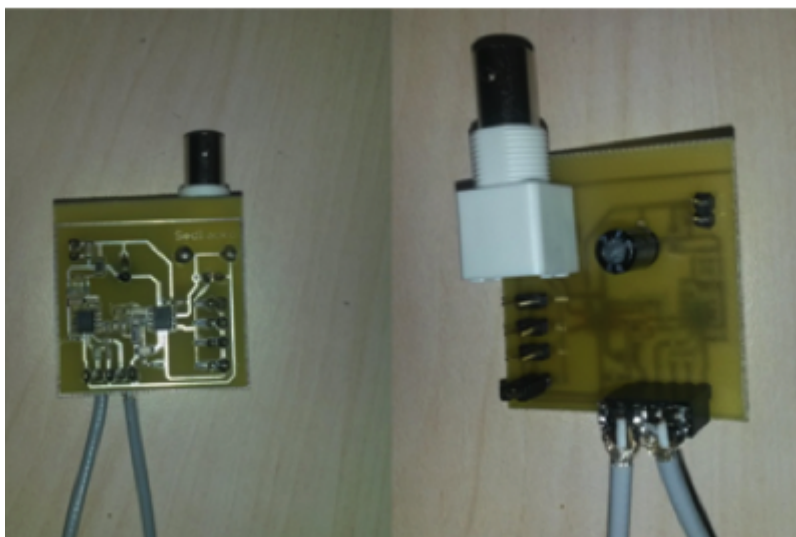
Vstupným blokom predzosilňovača je diferenčný zosilňovač snímajúci napätie na meranej vzorke (odpore). Navrhnutý diferenčný zosilňovač má zosilnenie 10.

Horno-priepustný filter druhého rádu

Ďalším blokom je hornopriepustný filter druhého rádu slúžiaci na odfiltrovanie 50 Hz signálu prenikajúceho z rozvodnej siete. Horno-priepustný filter druhého rádu je navrhnutý s medznou frekvenciou 200 Hz a zosilnením 10.

Zosilňovač s nastaviteľným zosilnením

Posledným blokom je zosilňovač s nastaviteľným zosilnením slúžiaci na úpravu úrovne signálu pre ďalšie spracovanie napr. osciloskopom. Zosilnenie je možné nastaviť v úrovniach 1, 5, 10 a 100. Na Obr. 9 sú fotografie zhotoveného predzosilňovača.

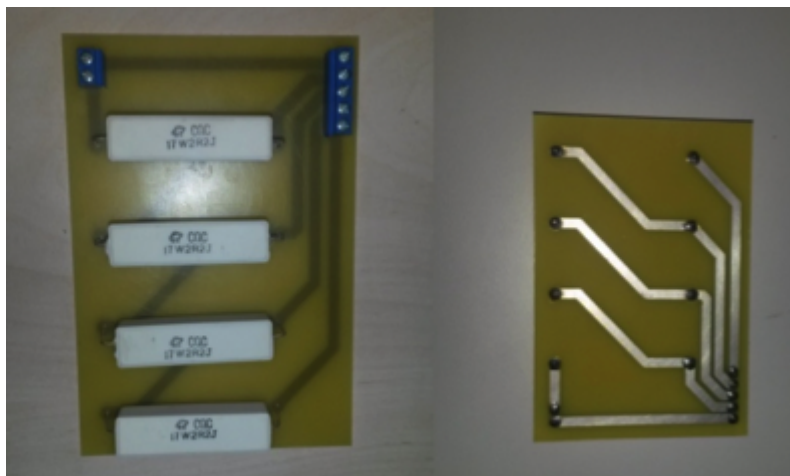


Obr. 9 Realizácia DPS predzosilňovača

Merací (ochranný) rezistor

Merací resp. ochranný rezistor (Obr. 10) je tvorený štyrmi do série zapojenými výkonovými rezistormi, ktoré slúžia ako ochrana výkonového zosilňovača a na snímanie pretekajúceho prúdu. Rezistor je drôtový v keramickom puzdre s odporom

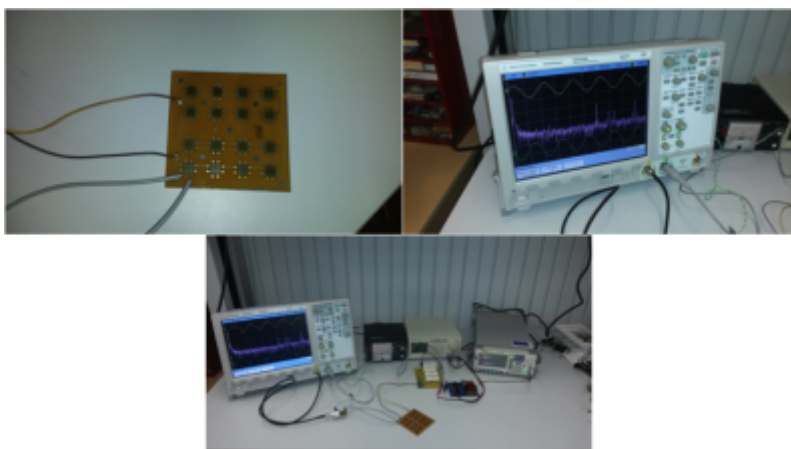
2,2 Ω a výkonom 17 W. Celkový trvalý stratový výkon štyroch do série zapojených takýchto rezistorov je 68 W. Teplotný koeficient použitých rezistorov je 300 ppm/ $^{\circ}\text{C}$, deklarovaná životnosť je 1000 hodín so stabilitou +/- 2%.



Obr. 10 Realizácia ochranného rezistora

Zostavenie meracieho pracoviska

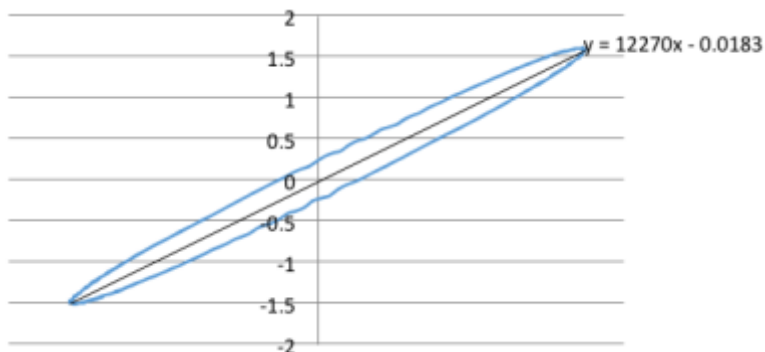
Realizované meracie pracovisko (Obr. 11) obsahuje aj dva napájacie zdroje. Jedným je napájaný výkonový zosilňovač, druhým predzosilňovač. Pre zvýšenie odolnosti voči rušeniu prenikajúcemu z rozvodnej siete je vhodné merací predzosilňovač napájať z batérií.



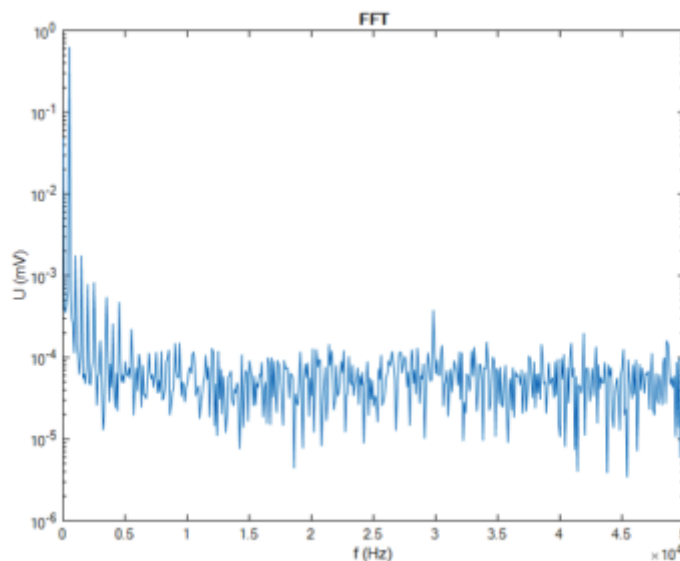
Obr. 11 Zostavené meracie pracovisko

Overovacie merania

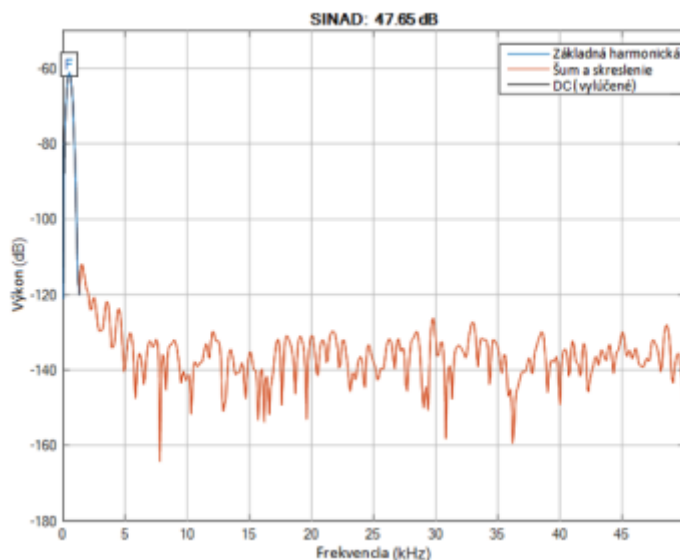
Meracia zostava bola prakticky overená pri meraní elektrického odporu ultrazvukovo kontaktovaných spojov. Použité boli dva typy hrubovrstvových pást na báze striebra (DuPotn 6145 Ag a 6158 Ag), pričom kontaktovaný drôtik (AlSi-1%) mal priemer 25 μm . Pri oboch vzorkách boli kontaktované spoje vytvorené bezprostredne po výpale hrubovrstvových pást. Na Obr. 12 je znázornená volt-ampérová charakteristika meranej vzorky pre pastu 6145 Ag. Na Obr. 13 a Obr. 14 je znázornené FFT spektrum signálu nameraného na tejto vzorke, resp. SINAD (odstup signálu od šumu a skreslenia).



Obr. 12 Volt-ampérová charakteristika meranej vzorky (6145 Ag/ AlSi-1%)



Obr. 13 FFT spektrum signálu nameraného na vzorke (6145 Ag/ AlSi-1%)



Obr. 14 SINAD odstup signálu od šumu a skreslenia (6145 Ag/ AlSi-1%)

Záver

V článku je spracovaná problematika charakterizovania elektrických vlastností spájkovaných a kontaktovaných spojov a návrh komponentov meracej zostavy pre meranie voltampérovej charakteristiky týchto spojov. V priebehu testovania meracej

zostavy sa prejavil problém so zákmitmi lineárneho výkonového zosilňovača, ktorý bolo nutné riešiť výmenou za spínaný modul. Tento má síce tabuľkovo horšie vlastnosti (THD) avšak vnášané skreslenie je na definovanej frekvencii, ktorá je mimo meraný rozsah a teda je možné ju odfiltrovať. Táto filtrácia sa vykonávala číslicovo pri neskoršom spracovaní signálu.

Navrhnutý merací predzosilňovač slúži na zosilnenie vstupného signálu pre jeho ďalšie spracovanie osciloskopom. Súčasťou predzosilňovača je obvod na odfiltrovanie 50 Hz signálu prenikajúceho z rozvodnej siete. Predzosilňovač pozostáva z troch blokov a to diferenčného zosilňovača, hornopriepustného filtra a zosilňovača s nastaviteľným zosilnením. Funkčnosť realizovanej meracej zostavy je demonštrovaná na dvoch vzorkách. Na oboch je nameraná voltampérová charakteristika a spracované FFT spektrum a SINAD signálu nameraného na vzorke.

Zoznam použitej literatúry

1. Pietriková Alena, Ďurišin Juraj, Mach Pavel, Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike, Košice, 2010, ISBN 978-8-553-0447-2 [cit. apríl 2015].
2. Analog Devices, AD9834, 20mW Power, 2.3 V to 5.5 V, 75 MHz, [cit. jún 2014], Datasheet, Dostupné na internete: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9834.pdf>
3. Linus Michaeli, Mikroelektronické obvody kap.9 Výkonové zosilňovače, [cit. apríl 2015], Dostupné na internete: ftp://ftp.kemt.fei.tuke.sk/KEMT332_NAO/_materialy/Ucebica/MO-9.pdf
4. SEIFART, M.: Polovodičové prvky a obvody na spracovanie spojitého signálu, Alfa Bratislava, 1988, [cit. apríl 2015].
5. PUNČOCHÁŘ, J.: Operační zesilovače v elektronice, BEN – Technická literatúra, Praha 1996 [cit. apríl 2015].
6. Alexander Žatkovič, Elektronické obvody, Skreslenie v zosilňovačoch, [cit. apríl 2015], Dostupné na internete: http://alzat.szm.com/Zosil/Zakl_vl/Skresl.htm
7. Analog Devices, AD812, Dual, Current Feedback Low Power Op Amp, Datasheet, [cit. apríl 2015], Dostupné na internete: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD812.pdf>
8. STMicroelectronics, TDA 7294, 100W-100W DMOS AUDIO AMPLIFIER, Datasheet, [cit. apríl 2015], Dostupné na internete: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00000017.pdf>
9. A. Pietriková, J. Ďurišin, Mechanické skúšky spájkovaných spojov, 2008, Košice, [cit. apríl 2015], Dostupné na internete: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/484/r2c4c6.pdf?sequence=1>
10. Roman KOLEŇÁK, Ladislav PAVLOVIČ, ŠTRUKTÚRA PRECHODOVEJ OBLASTI SPÁJKOVANÉHO SPOJA KOVOVÝCH MATERIÁLOV, [cit. apríl 2015], Dostupné na internete: https://www.mtf.stuba.sk/docs//internetovy_casopis/2008/7/kolenak.pdf

Spoluautori článku sú Ing. Pavol Cabúk, PhD. a Ing. Igor Vehec, PhD. Katedra technológií v elektronike, FEI TU v Košiciach, Park Komenského 2, 040 01 Košice.

