



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie

Vliv tepelného zpracování na vlastnosti adhezních lepených spojů

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Doc. Ing. Pavel Mach, CSc.

Jaromír Rohlena

Praha 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Rohlena** Jméno: **Jaromír** Osobní číslo: **435594**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vliv tepelného zpracování na vlastnosti adhezních vodivých spojů

Název bakalářské práce anglicky:

Influence of heat treatment on the properties of adhesive conductive joints

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s principem vodivosti lepených vodivých spojů.
2. Vytvořte vzorky lepených spojů adhezni montáží odporů s nulovou hodnotou (jumper) na testovací desky plošného spoje.
3. Tepelné vytvrzování spojů proveďte podle doporučení výrobce lepidla.
4. Ověřte, jak dodatečné tepelné dotvrzování spojů změní jejich vlastnosti. Podmínky dotvrzování stanoví vedoucí práce.
5. Změřte odpor spojů. Měření provádějte čtyřbodovou a třibodovou metodou.
6. Změřte nelinearitu VA charakteristiky spojů čtyřbodovou metodou.
7. Měření vyhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] R. Aradhana, S. Mohanty, S. K. Nayak, "A review on epoxy-based electrically conductive adhesives", International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 99, pp. 1-18, June 2020.
- [2] H.M. Ren, K. Zhang, Y.M.F. Matthew, X. Fu, R. Sun, C.P. Wong, "Preparation and performance of Ag-coated Cu flakes filled epoxy as electrically conductive adhesives," Journal of Solid-State Lighting, Vol. 1, pp. 1-7, September 2014.
- [3] B.S. Yim, S.H. Lee, Y. Heo, J. Kim, et al., "Reliability properties of solderable conductive adhesives with low-melting-point alloy fillers," Materials Transactions, Vol. 53, No. 12 (2012), pp. 2104-2110, November 2012.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Pavel Mach, CSc. katedra elektrotechnologie FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **06.01.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.01.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

doc. Ing. Pavel Mach, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze dne _____

Podpis autora práce

Poděkování

Především chci tímto poděkovat svému vedoucímu doc. Ing. Pavlu Machovi, CSc. za jeho nezištnou pomoc, podněty a trpělivost při realizaci této práce. Dále bych rád zmínil Ing. Ivanu Beshajovou Pelikánovou, Ph.D. a ocenil její rady k provedení praktické části, včetně poskytnutí prostor laboratoře elektrotechnologie.

Anotace

Tato bakalářská práce uvádí do problematiky elektricky vodivých lepidel. Dále se zabývá změnou elektrických vlastností vodivě lepených spojů v závislosti na jejich dodatečném dotvrzování. Její součástí je porovnání dvou typů elektricky vodivých lepidel v závislosti na materiálu vodivé vrstvy tištěného spoje a metody měření elektrického odporu. V neposlední řadě se věnuje nelinearitě V-A charakteristiky vodivě lepených spojů.

Annotation

This bachelor's thesis takes you into the sphere of electrically conductive adhesives. It also deals with the amendment in the electrical features of adhesive conducted joints depending on their additional curing. It compares two types of electrically conductive adhesives depending on the material being in the conductive layer of the printed circuit board and on the method how to measure an electrical resistance. Last but not least, it deals with the nonlinear distortion of C/V characteristics as far as adhesive conductive joints concerns.

Klíčová slova

elektricky vodivá lepidla, vliv tepelného zpracování adhezních vodivých spojů, metody měření odporu adhezních vodivých spojů, měření nelinearity V-A charakteristiky

Key words

electrically conductive adhesives, influence of heat treatment on adhesive conductive joints, methods of measuring resistance on adhesives conductive joints, measurement of nonlinear distortion of C/V characteristic

Obsah

Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	12
Seznam použitých symbolů a zkratk	13
1 Úvod.....	14
2 Teoretická část	15
2.1 Složky elektricky vodivých lepidel.....	15
2.1.1 Plnidlo	15
2.1.2 Vazební složka	16
2.2 Typy elektricky vodivých lepidel dělené podle typu vodivosti	17
2.2.1 Perkolační teorie	17
2.2.2 Lepidla s izotropním typem vodivosti (ICA).....	18
2.2.3 Lepidla s anizotropním typem vodivosti (ACA)	19
2.3 Sledované vlastnosti.....	19
2.3.1 Elektrický odpor.....	19
2.3.2 Nelinearita V-A charakteristiky	20
3. Praktická část	21
3.1 Posouzení elektrických vlastností lepidla v závislosti na dodatečném žíhání	21
3.1.1 Měření vzorky	21
3.1.2 Použité lepidlo	21
3.1.3 Použité přístroje	22
3.1.4 Metoda měření	22
3.1.5 Dodatečné žíhání.....	23
3.1.6 Zpracování naměřených hodnot.....	23
3.2 Porovnání čtyřbodové a třibodové metody měření odporu, nelinearita V-A charakteristiky vodivých lepených spojů.....	23
3.2.1 Příprava vzorků.....	23
3.2.1.1 Desky plošných spojů	23
3.2.1.2 Rezistory	25
3.2.1.3 Lepidla	25
3.2.1.3.1 ELPOX SC 515.....	25
3.2.1.3.2 ELPOX AX 15S.....	26
3.2.1.4 Nanášení lepidla.....	27

3.2.1.5 Osazení součástek	27
3.2.1.6 Vytvrzení vzorků	28
3.2.2 Čtyřbodová metoda měření odporu	28
3.2.2.1 Použité přístroje	28
3.2.3 Tříbodová metoda měření odporu.....	29
3.2.3.1 Použité přístroje	30
3.2.3.2 Postup měření.....	30
3.2.4 Měření nelinearity V-A charakteristiky	30
3.2.4.1 Použité přístroje	31
3.2.5 Zpracování naměřených hodnot.....	31
4. Výsledky měření	32
4.1 Změna elektrických vlastností lepidla v závislosti na dodatečném žihání	32
4.2 Porovnání čtyřbodové a tříbodové metody měření odporu.....	36
4.3 Měření nelinearity V-A charakteristiky	39
5. Diskuse výsledků	41
6. Závěr	42
Literatura.....	44
Seznam příloh	46

Seznam obrázků

Obrázek 1: Stříbrné šupinky [2].....	15
Obrázek 2: Stříbrná nanovlákná [2].....	15
Obrázek 3: Stříbrné nanokuličky [2].....	15
Obrázek 4: Pozlacené měděné šupinky [2].....	15
Obrázek 5: Částice niklu po vyžihání [4]	16
Obrázek 6: Částice niklu před vyžiháním [4]	16
Obrázek 7: Uhlíkové nanotrubičky [2]	16
Obrázek 8: Grafitové šupinky [5]	16
Obrázek 9: Perkolační křivka [7].....	18
Obrázek 10: Princip vedení proudu u ICA [6].....	18
Obrázek 11: Princip použití ACA [2]	19
Obrázek 12: Struktura elektricky vodivého lepeného spoje [8].....	20
Obrázek 13: Měření vzorek desky	21
Obrázek 14: Specifikace lepidla AX70MN [11]	21
Obrázek 15: Technické parametry lepidla AX70MN [11]	22
Obrázek 16: Miliohmmetr HP 4338B.....	22
Obrázek 17: Měřicí sonda BK Precision TLKB1	22
Obrázek 18: Ilustrace postupu měření	23
Obrázek 20: Osazená deska pro měření tříbodovou metodou v Cu provedení.....	24
Obrázek 19: Osazená deska pro měření čtyřbodovou metodou v Cu provedení.....	24
Obrázek 21: Osazená deska pro měření tříbodovou metodou v Au provedení	24
Obrázek 22: Specifikace lepidla SC 515 [12].....	25
Obrázek 23: Technické parametry lepidla SC 515 [12].....	25
Obrázek 24: Technické parametry lepidla AX 15S [13]	26
Obrázek 25: Specifikace lepidla AX 15S [13].....	26
Obrázek 26: Přípravek na šablonový tisk SPIDÉ SD240 [14]	27
Obrázek 27: Manuální osazovačka SMD součástek SMT manipulátor MO1	27
Obrázek 28: Měřič odporu KUST DC resistance tester MM2030 s připojeným přípravkem pro měření malých odporů	28
Obrázek 29: Schéma měření odporu tříbodovou metodou	29
Obrázek 32: Přípravek pro měření malých odporů.....	30
Obrázek 31: Digitální multimetr HP 34401A.....	30
Obrázek 30: Zdroj stejnosměrného napětí HAMEG Instruments Triple Power Supply HM-7042	30
Obrázek 33: DANBRIDGE CLT20 Component Linearity Test Equipment	31
Obrázek 34: Přípravek s uchyceným vzorkem	31
Obrázek 35: Porovnání aritmetických průměrů a mediánů odporu v závislosti na dodatečném žihání pro lepidlo ECOSOLDER AX 70MN.....	34
Obrázek 36: Porovnání relativních změn aritmetického odporu v závislosti na dodatečném žihání pro lepidlo ECOSOLDER AX 70 MN	35
Obrázek 37: Porovnání směrodatných odchylek odporů v závislosti na dodatečném dotvrzování pro lepidlo ECOSOLDER AX 70MN	36

Obrázek 38: Porovnání aritmetických průměrů a mediánů odporů lepidel SC 515 a AX 15S v závislosti na použité metodě měření	38
Obrázek 39: Porovnání směrodatných odchylek odporů lepidel SC 515 a AX 15S v závislosti na použité metodě měření	39
Obrázek 40: Porovnání aritmetického průměru, mediánu a směrodatné odchylky pro měření nelinearity V-A charakteristiky.....	40

Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled časů a teplot dotvrzování vzorků.....	23
Tabulka 2: Přehled časů a teplot vytvrzení vzorků.....	28
Tabulka 3: Naměřené hodnoty odporu lepidla AX 70MN před dodatečným žíháním.....	32
Tabulka 4: Naměřené hodnoty odporu lepidla AX 70MN po dodatečném žíhání	32
Tabulka 5: Vypočítané hodnoty aritmetických průměrů, mediánů, směrodatných odchylek a relativních změn arit. průměru odporu lepidla ECOSOLDER AX 70MN v závislosti na dodatečném žíhání	33
Tabulka 6: Naměřené hodnoty odporu získané čtyřbodovou metodou měření pro lepidlo SC 515 a měděné provedení desky	36
Tabulka 7: Upravené hodnoty odporu pro čtyřbodovou metodu měření odporu pro lepidlo SC 515 a měděné provedení desky	37
Tabulka 8: Vypočítané hodnoty aritmetických průměrů, mediánů a směrodatných odchylek pro čtyřbodovou metodu měření	37
Tabulka 9: Naměřené hodnoty napětí a proudů získané třibodovou metodou měření odporu pro lepidlo SC 515 a měděné provedení desky	37
Tabulka 10: Vypočtené a upravené hodnoty odporu pro třibodovou metodu měření a lepidlo SC 515 na měděné úpravě desky	37
Tabulka 11: Vypočítané hodnoty aritmetických průměrů, mediánů a směrodatných odchylek pro třibodovou metodu měření.....	38
Tabulka 12: Naměřené hodnoty nelinearity V-A charakteristiky pro lepidlo SC 515 a měděné provedení desky	39
Tabulka 13: Vypočítané hodnoty aritmetických průměrů, mediánů a směrodatných odchylek pro měření nelinearity V-A charakteristiky	40

Seznam použitých symbolů a zkratek

RoHS – Restrictions of Hazardous Substances

Pb – olovo

Sn – cín

Ag – stříbro

Au – zlato

Cu – měď

Ni – nikl

EEZ – Elektrická a Elektrotechnická Zařzení

ECA – Electrically Conductive Adhesives

LCD – Liquid Crystal Display

NCA – Non Conductive Adhesives

ICA – Isotropic Conductive Adhesives

ACA – Anisotropic Conductive Adhesives

TAB – Tape Automatic Bonding

US – Spojené státy americké

R – elektrický odpor

U – elektrické napětí

I – elektrický proud

V-A – voltampérový

SMD – Surface Mounted Device

SMT – Surface Mount Technology

1 Úvod

V minulosti bylo k vytváření vodivých spojů primárně využíváno pájení na bázi Pb-Sn. V souvislosti se zavedením směrnice RoHS začala být snaha hledat nové látky využitelné při výrobě elektrických a elektronických zařízení (EEZ), které by nahradily ty stávající potenciálně nebezpečné pro zdraví a životní prostředí. Komerční využití olovnatých pájek bylo omezeno na minimum a jejich místo zaujaly pájky bezolovnaté (lead-free). Existují však odvětví, kde je kladen zvláště vysoký důraz na dlouhodobou spolehlivost, a proto jsou olovnaté pájky stále využívány, byť v mnohem menším měřítku. Mezi takovými odvětví můžeme zařadit například vojenské či zdravotní aplikace. Dalším prostředkem k vytváření vodivých spojení jsou elektricky vodivá lepidla (ECA – Electrically Conductive Adhesives), která ve specifických případech mohou pájky nahradit.

První zmínka o použití elektricky vodivých lepidel v elektrotechnice pochází z US patentu z roku 1956. Tehdy se použily k připevnění polovodičového krystalu (germanium) k vodivému podkladu. S vývojem LCD displejů v 80. letech 20. století došlo ke značnému rozšíření ECA, např. pro propojení komponentů s jemnou roztečí (fine-pitch) s vysokým obsahem olova.

Výhodou elektricky vodivých lepidel je nízká teplota dotvrzování, a proto je lze použít k montáži komponent citlivých na zvýšenou teplotu. Další oblastí, kde jsou využívána, je např. montáž na skleněný podklad (chip on glass) či folii (chip on foil). Nevýhodou jsou však jejich horší mechanické i elektrické vlastnosti v porovnání s pájenými spoji. Jsou méně odolné vůči klimatickým změnám i mechanickému namáhání a vytvořená spojení mají větší odpor.

V současné době jsou preferovaným řešením pro připojování LCD displejů a montáži teplotně citlivých součástek metodou flip-chip.

2 Teoretická část

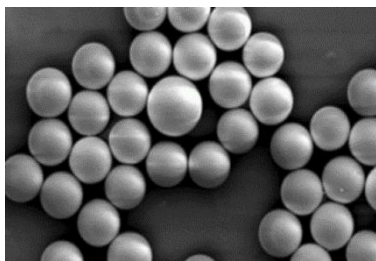
2.1 Složky elektricky vodivých lepidel

Elektricky vodivá lepidla jsou kompozity a obecně se skládají ze dvou komponent: plnidla (filler) a vazební složky (binder).

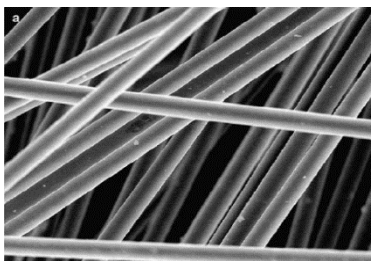
2.1.1 Plnidlo

Plnidlo neboli vodivá složka zajišťuje elektrické vlastnosti lepidla. Je tvořeno vodivými částicemi zpravidla ve formě šupinek (flakes) nebo kuliček (balls). Nejčastěji využívanými materiály jsou stříbro, zlato, měď, nikl a grafit.

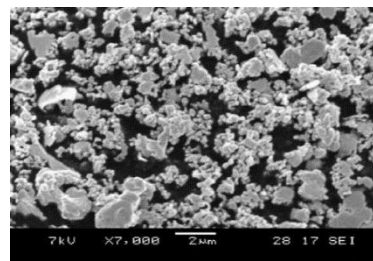
Stříbro je nejrozšířenějším plnidlem, zejména kvůli vysoké elektrické vodivosti a snadné tvarovatelnosti. Nevýhodou Ag je, že za přítomnosti vlhkosti může docházet k migraci iontů od anody ke katodě a růstu dendritů. [1] Ty mohou vytvořit vodivou cestu a zkratovat tak sousední vývody součástky. Tento fenomén je patrný především u komponent s jemnou roztečí.



Obrázek 3: Stříbrné nanokuličky [2]



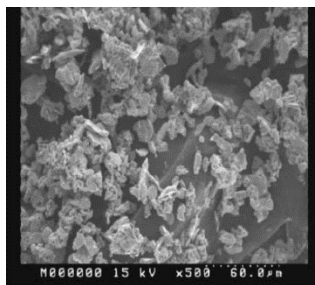
Obrázek 2: Stříbrná nanovláknina [2]



Obrázek 1: Stříbrné šupinky [2]

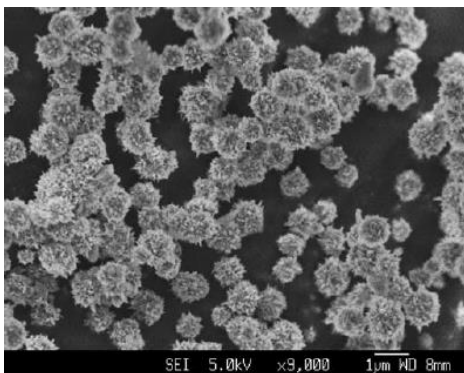
Zlato má v porovnání se stříbrem sice menší elektrickou vodivost, ale je chemicky stálější protože nedochází k povrchové oxidaci. Hlavní nevýhodou je podstatně vyšší cena zlata v porovnání se zmíněnými materiály.

Měď je velmi náchylná k oxidaci při použití ve vlhkém prostředí. Proto je při jejím použití nanášena na povrch částic tenká vrstva Au nebo Ag, která zlepšuje elektrické vlastnosti a chrání Cu před oxidací. Toto plnidlo však nikdy nedosahuje tak dobrých elektrických a tepelných vlastností jako čisté zlato či stříbro. Rozhodujícím faktorem je cena, která je pak výrazně nižší. [3]



Obrázek 4: Pozlacené měděné šupinky [2]

Nikl má v porovnání s mědí nižší elektrickou vodivost a není tolik náchylný k oxidaci. Vyrábí se redukcí soli Ni nebo oxidu za přítomnosti redukční činidla. Vzniklé částice mají tenké jehličky s malou kontaktní plochou, která způsobuje relativně vysokou rezistivitu. Dodatečným vyžiháním můžeme dosáhnout vyhlazení částic a zlepšení elektrických vlastností. [4]

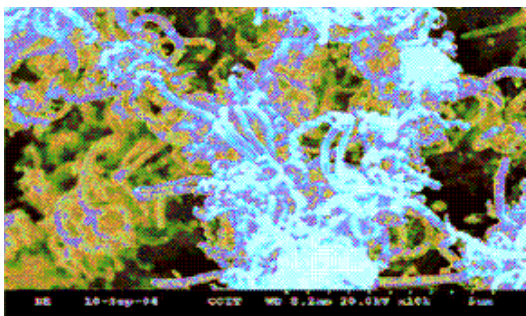


Obrázek 6: Částice niklu před vyžiháním [4]

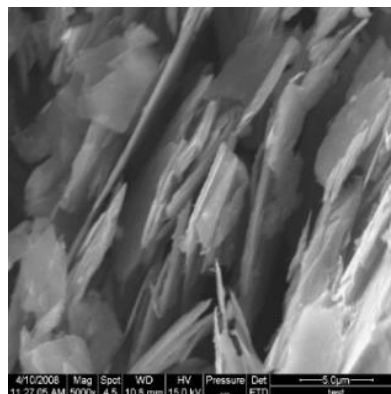


Obrázek 5: Částice niklu po vyžihání [4]

Plnidla na bázi grafitu jsou atraktivní zejména z důvodu nízké ceny. Částice jsou pokovovány Au nebo Ag, podobně jako tomu je u mědi. Nalezneme je ve formě šupinek, kuliček a uhlíkových nanovláken. [3]



Obrázek 7: Uhlíkové nanotrubičky [2]



Obrázek 8: Grafitové šupinky [5]

Někdy se můžeme setkat i s plnidlem tvořeným polymerovými kuličkami opatřených vrstvou zlata či stříbra. Ty dokáží do určité míry absorbovat vnitřní silové pnutí lepidla. [3]

2.1.2 Vazební složka

Vazební složka zajišťuje mechanické vlastnosti lepidla a vytváří matici v níž jsou ukotveny vodivé částice plnidla. Po vytvrzení musí zajistit, fixaci vodivých částic na svém místě, dobrou adhezi ke styčným plochám podkladu montované součástky a v neposlední řadě i ochranu před vnějšími vlivy.

Většina vazebních složek je na bázi reaktoplastů, ale můžeme se v omezení míře setkat i s termoplasty. Nejčastěji se jedná o epoxidové, akrylátové, silikonové nebo polyamidové pryskyřice. Reaktoplasty po vytvrzení vytvářejí pevné spoje, které není již možno uvést zpět do kapalného stavu. Oproti tomu termoplasty lze znovu roztavit např. za účelem provedení výměny součástky, avšak za cenu degradace elektrických vlastností lepidla. [6]

Při výběru vhodného ECA je nutno zohlednit aplikaci, pro kterou bude použito, aby byla zajištěna dlouhodobá životnost lepeného spoje. Akrylátové pryskyřice jsou vhodné pro teploty do 100 °C, epoxidové do 200 °C a polyamidové pro teploty přesahující 300 °C. Použití lepidla s nevhodnou vazební složkou bude mít za následek předčasné stárnutí spoje a degradaci elektrických vlastností. [6]

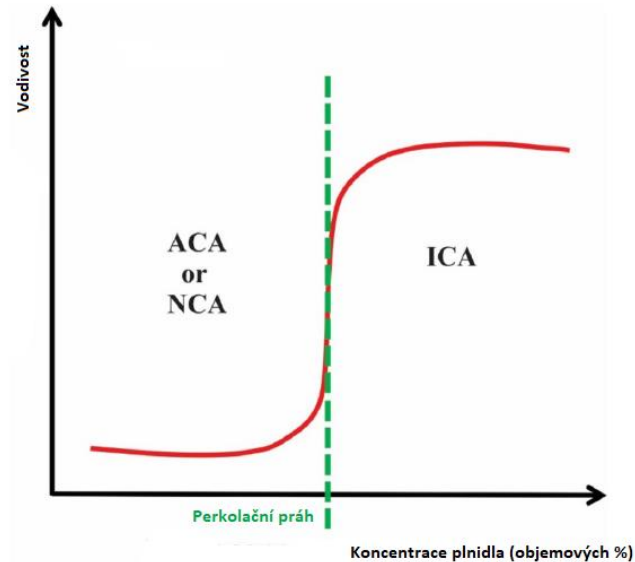
Elektricky vodivá lepidla se vyrábí jako jednosložková nebo dvousložková. Jednosložková ECA je potřeba vytvrdit při vyšší teplotě (100 – 200 °C) po dobu jednotek až desítek minut dle pokynů výrobce. Dvousložková ECA obsahují navíc tvrdidlo a lze je vytvrdit i při pokojové teplotě. Doba potřebná k vytvrzení je pak podstatně delší (většinou 24 hodin), a proto se provádí vytvrzení téměř vždy při zvýšené teplotě.

2.2 Typy elektricky vodivých lepidel dělené podle typu vodivosti

Elektricky vodivá lepidla (ECA) se dělí podle typu vodivosti na dvě skupiny: Izotropní (ICA – Isotropic Conductive Adhesives) a Anizotropní (ACA – Anisotropic Conductive Adhesives). Vlastnosti těchto lepidel budou popsány Perkolační teorií.

2.2.1 Perkolační teorie

Elektrické vlastnosti kompozitních materiálů jsou popsány tzv. perkolační teorií. Ta tvrdí, že přidáním dostatečného množství vodivého plnidla do polymerní izolační matrice vznikne z elektricky nevodivého polymeru vodivý kompozit. Koncentrace vodivé složky, při které kompozit přechází z elektrického izolantu na vodič, se nazývá perkolační práh. V bodě perkolačního prahu prudce narůstá vodivost, při dalším zvyšování koncentrace je však dodatečný nárůst vodivosti zanedbatelný. Závislost objemových procent plnidla na vodivosti se nazývá perkolační křivka.

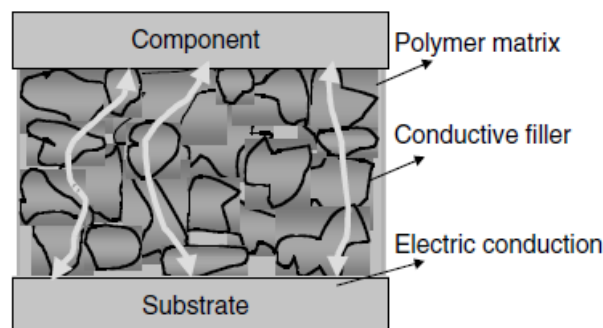


Obrázek 9: Perkolační křivka [7]

Je nutné podotknout, že koncept perkolační teorie je ve skutečnosti značně komplexnější. Vzhledem k rozsahu této práce bude dané zdůvodnění postačující.

2.2.2 Lepidla s izotropním typem vodivosti (ICA)

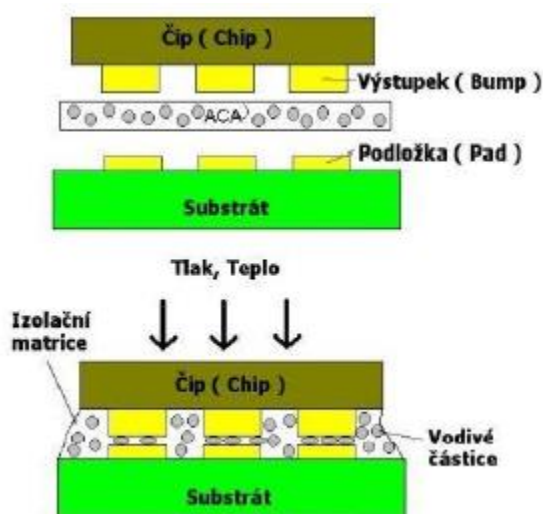
Izotropní elektricky vodivá lepidla se vyznačují přibližně stejnou elektrickou vodivostí ve všech směrech. Jako plnidlo se nejčastěji používají šupinky stříbra v množství 60 – 80 hmotnostních % lepidla. Velikost těchto šupinek je zpravidla do 15 μm . Díky poměrně vysokému obsahu vodivé složky se vedení proudu uskutečňuje přímým kontaktem elektricky vodivých částic a také tunelováním přes tenkou izolační vrstvu polymeru. Vytvrzení lepidla hraje zásadní roli ve výsledných elektrických vlastnostech spoje. Vysušením vlhkosti dojde ke smrštění polymerní matrice a tím k přiblížení vodivých částic plnidla blíže k sobě a ke vzniku lepšího fyzického kontaktu mezi nimi. Tento typ lepidel nachází využití jako náhrada pájek při instalaci součástek pomocí SMT. [2] [6]



Obrázek 10: Princip vedení proudu u ICA [6]

2.2.3 Lepidla s anizotropním typem vodivosti (ACA)

Anizotropní elektricky vodivá lepidla mají výrazně vyšší elektrickou vodivost v jednom daném směru (nejčastěji osy Z). Tato skutečnost vychází z využití jiného typu plnidla, kterým jsou kuličky o poloměru v řádu jednotek μm . Ty jsou při montáži za přítomnosti tepla stlačeny mezi vývod součástky a plošku na desce substrátu. Kuličky se zdeformují a vytvoří vodivý spoj mezi oběma plochami. Obvyklý obsah vodivé složky je v případě lepidel s anizotropní vodivostí 3 – 15 hmotnostních %. ACA se používá pro montáž Flip-Chip a TAB. [2] [6]



Obrázek 11: Princip použití ACA [2]

2.3 Sledované vlastnosti

2.3.1 Elektrický odpor

Celkový odpor lepeného spoje, měřený mezi vývodem součástky a ploškou na desce, se skládá z několika dílčích odporů: R_L - odpor mezi vývodem součástky a lepidlem, R_A - vlastní odpor lepidla, R_P - lepidlem a kontaktní plochou na desce plošného spoje. [8]

Na vyjmenovaných dílčích odporech se podílejí různou mírou 4 původci.

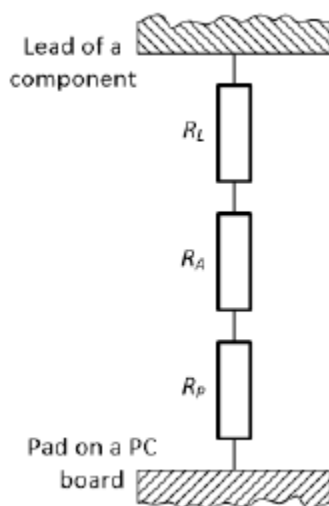
Zprvé je to vlastní elektrický odpor vodivých částic plnidla. Použitými materiály jsou kovy s vysokou vodivostí. Díky tomu je tato složka odporu velmi malá a lze ji zanedbat. [8]

Zadruhé je to tzv. úžinový odpor, který je způsoben tím, že kontaktní plocha vodivé částice je podstatně menší než její průřez. Tento typ odporu se však uplatňuje pouze v případech lepidel s anizotropním typem vodivosti, kterými se tato práce zabývá. [8]

Zatřetí je to tunelový odpor, který vzniká přenosem náboje přes potenciálovou bariéru mezi dvěma vodivými částicemi. Takovou bariérou může být např. oxid, nečistoty nebo dielektrikum (v našem případě polymer). Tento typ odporu bude v případě lepidla s izotropním typem vodivosti převažovat. [8]

Úžinový a tunelový odpor společně tvoří vlastní odpor lepidla R_A .

Poslední typ odporu může vznikat mezi kontaktní plochou a vodivými částicemi lepidla za přítomnosti vlhkosti. Je způsoben stykem dvou kovů s rozdílným elektrochemickým potenciálem, což vede k vytvoření galvanického článku. Redoxní chemická reakce mezi kovy zapříčiní vznik vrstvy oxidu, který se projeví zvýšením odporu. [9]



Obrázek 12: Struktura elektricky vodivého lepeného spoje [8]

2.3.2 Nelinearita V-A charakteristiky

Nelinearita volt-ampérové charakteristiky elektricky vodivých lepených spojů je dána především parametry tunelového přechodu mezi vodivými částicemi lepidla. Velikost tunelového odporu závisí zejména na tloušťce potenciálové bariéry. [10]

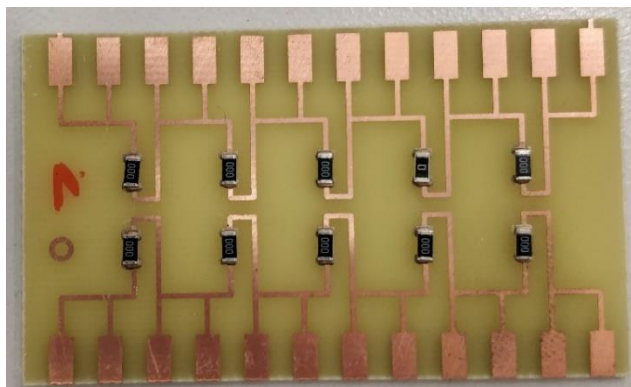
Touto metodou lze tedy zjišťovat změny, které probíhají uvnitř elektricky vodivého lepidla při jeho stárnutí či podrobování klimatické a mechanické zátěži. Nelinearita V-A charakteristiky je tedy kvalitativní parametr podobně jako elektrický odpor nebo šum elektricky vodivého kontaktu. Pro vysokofrekvenční nebo velmi vysokofrekvenční aplikace může nelinearita hrát významnou roli, protože deformuje signál a tím zavádí do přenosu vyšší harmonické. Což může mít za následek snížení kvality přenášeného signálu.

3. Praktická část

3.1 Posouzení elektrických vlastností lepidla v závislosti na dodatečném žihání

3.1.1 Měřené vzorky

Námi měřené vzorky nám byly poskytnuty vedoucím práce již v hotovém stavu. Jedná se tištěné spoje na kompozitu FR4 s měděnými kontakty a přilepenými nulovými odpory SMD o rozměru pouzdra 1206 s katalogovou hodnotou 16 mΩ. Celkem bylo měřeno 11 vzorků desek plošných spojů. Pro každý měřený vzorek dostáváme 20 hodnot odporů lepeného spoje viz část 3.1.4. Metoda měření.



Obrázek 13: Měřený vzorek desky

3.1.2 Použité lepidlo

Pro instalaci nulových odporů bylo použito izotropní jednosložkové lepidlo AMEPOX ECO SOLDER AX70MN. Vodivou složkou jsou šupinky stříbra, které tvoří 70 ± 1 hmotnostních % lepidla. Vazební složkou je epoxy-fenolová pryskyřice. Vzorky vytvrzeny při 180 °C po dobu 8 minut, dle pokynů výrobce.

Number of components	One
Consistency	Floable paste
Color	Bright silver
Percentage of silver (inside ready paste)	70 ± 1%
Specific gravity	2.1 – 2.4 g/cm ³
Viscosity	530 000 – 560 000 cps (*)
Drying time before curing process	Not necessary
Recommended curing schedule with air-circulated oven	180°C – (6 - 10) min. 200°C – (3 - 4) min.
Recommended curing schedule with heating tunnel	200°C in peak – 3 min. total time inside tunnel

Obrázek 14: Specifikace lepidla AX70MN [11]

Electrical resistivity	$(1.0 - 2.5) \times E(-6) \Omega m$
Pencil hardness	9H pencil hardness (one day after curing)
Range of service for continuous temperature	$(-55)^{\circ}C - (+200)^{\circ}C$
Max. operating temperature	300°C for ab 1.5 h.

Obrázek 15: Technické parametry lepidla AX70MN [11]

3.1.3 Použité přístroje

K měření odporu byl použit miliohmmetr HP 4338B a měřicí sonda BK Precision TLKB1. Sonda měla vývody provedené ve formě kleští, kde jedna z čelistí byla proudový vývod a druhá napětový vývod.



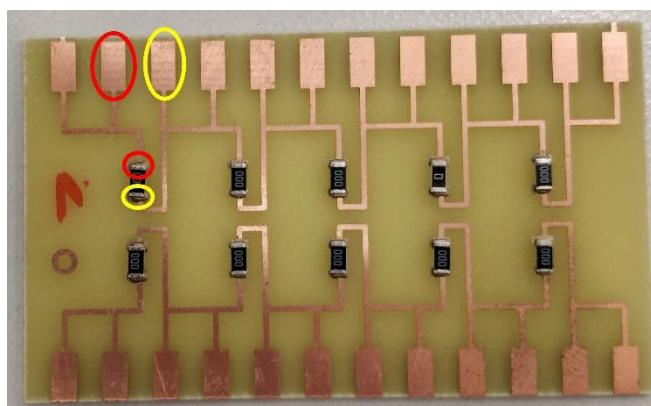
Obrázek 17: Měřicí sonda BK Precision TLKB1



Obrázek 16: Miliohmmetr HP 4338B

3.1.4 Metoda měření

Určení odporu jednoho lepeného spoje bylo provedeno následovně: Jedny z kleští byly přiloženy na vývod součástky a druhé na připojovací vývod na desce (označeno červeně), po ustálení byla odečtena hodnota z měřicího přístroje. Pro druhý lepený spoj nulového odporu bylo postupováno obdobně (označeno žlutě). Použitím tohoto postupu se eliminovalo měření vlastní hodnoty nulového odporu. Nejprve byly zvolené desky proměřeny v původním stavu, poté byly podrobeny dodatečnému žíhání a následně proměřeny znovu.



Obrázek 18: Ilustrace postupu měření

3.1.5 Dodatečné žíhání

Teplota a doba dodatečného dotvrzování desek s nalepenými odpory byly shrnuty v následující tabulce:

Teplota (°C)	100				130				160			
Doba dotvrzování (min)	10	20	40	60	10	20	40	60	10	20	40	

Tabulka 1: Přehled časů a teplot dotvrzování vzorků

3.1.6 Zpracování naměřených hodnot

S naměřenými soubory hodnot každé desky byla provedena nejjednodušší varianta matematického vyrovnání. Tím se rozumí odstranění největší a nejmenší hodnoty odporu ze souboru. Pro jednotlivé desky byl pak ze zbývajících hodnot dopočten aritmetický uřezaný průměr, uřezaný medián a uřezaná směrodatná odchylka (dále jen aritmetický průměr, medián a směrodatná odchylka). Nakonec byly vypočteny procentuální relativní změny všech tří výše zmíněných statistických veličin. Takto zpracované hodnoty byly vyneseny do grafů, které posloužily k interpretaci výsledků a závěrečnému zhodnocení.

3.2 Porovnání čtyřbodové a třibodové metody měření odporu, nelinearita V-A charakteristiky vodivých lepených spojů

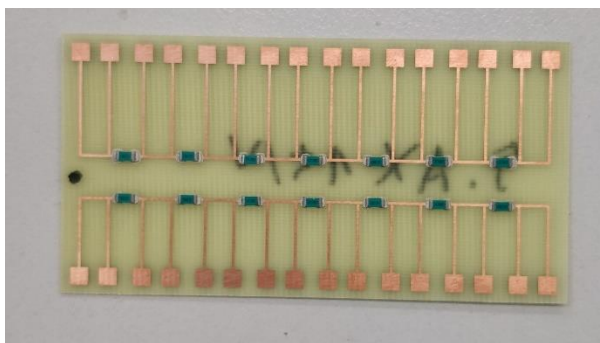
3.2.1 Příprava vzorků

3.2.1.1 Desky plošných spojů

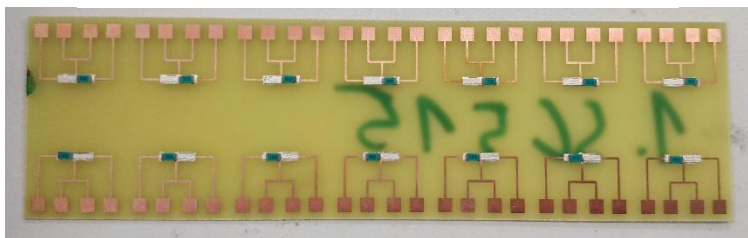
Desky byly vyrobeny z kompozitu FR4 s měděnými a zlatými kontakty ve dvou rozloženích. Pro čtyřbodovou metodu měření v měděném provedení a pro třibodovou metodu ve zlatém a měděném vyhotovení. Návrh desek byl realizován v programu KiCAD a jejich rozložení bylo uzpůsobeno pro použití se stávajícími měřícími přípravky v laboratoři elektrotechnologie.

Pro čtyřbodovou metodu měření bylo zhotoveno 10 vzorků desek v Cu provedení. Pro každý vzorek dostáváme 14 naměřených hodnot elektrického odporu.

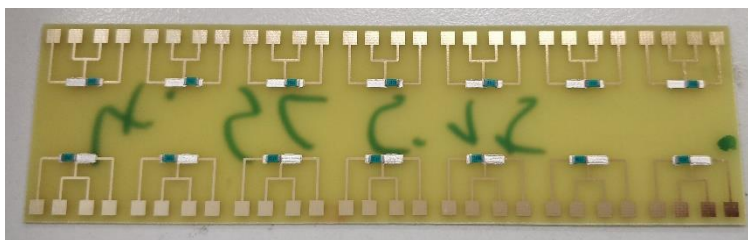
V případě desek s rozložením pro třibodovou metodu měření bylo připraveno 10 kusů vzorků v měděném provedení a 10 kusů ve zlatém vyhotovení. Měřením každé desky tištěného spoje dostaneme 14 hodnot napětí a proudů, které budou později využity k dopočtení výsledného R příslušného elektricky vodivého lepeného spoje. Dostaneme tedy 14 hodnot elektrického odporu pro každý vzorek.



Obrázek 20: Osazená deska pro měření čtyřbodovou metodou v Cu provedení



Obrázek 19: Osazená deska pro měření třibodovou metodou v Cu provedení



Obrázek 21: Osazená deska pro měření třibodovou metodou v Au provedení

3.2.1.2 Rezistory

Pro tuto část práce byly vybrány nulové rezistory 0R0 (jumper) typu CDF-K od výrobce microtech GmbH o velikosti pouzdra 1206 vhodné pro vodivě lepené spoje. Výrobce neudává skutečnou hodnotu odporu, proto musela být zjištěna experimentálně. Tato hodnota činila 16 mΩ (viz příloha 5).

3.2.1.3 Lepidla

K vytvoření vodivých lepených spojů byla použita dvě izotropní elektricky vodivá lepidla. Jednosložkové ELPOX SC 515 a dvousložkové ELPOX AX 15S.

3.2.1.3.1 ELPOX SC 515

ELPOX SC 515 je jednosložkové izotropní elektricky vodivé lepidlo, kde plnidlo tvoří stříbrné šupinky o koncentraci 66 ± 2 hmotnostních %. Vazební složkou je epoxidová pryskyřice. Lze jej vytvrdit jak v horkovzdušné peci s cirkulací vzduchu, tak v infračervené tunelové peci. Výrobce udává hodnotu odporu po vytvrzení je 0,006 – 0,03 mΩm. Je dodáváno ve formě hladké pasty stříbrné barvy.

Number of components	One
Consistency	Soft, smooth paste
Color	Bright silver
Percentage of fillers	$66 \pm 2\%$
Viscosity*	130 000 - 140 000 cps (1 rpm) 45 000 - 55 000 cps (5 rpm) 25 000 - 35 000 cps (10 rpm)
Thixotropy index (1/10)	4.7
Recommended curing schedule with air-circulated oven	150°C – 120 min. 180°C – 15 min. 200°C – 5 min.
Curing with IR tunnel oven	Ramp: 20° - 120°C – 2.5 min. Ramp: 120° - 180°C – 5.0 min. Ramp: 180° - 20°C – 3.5 min.
Shelf life	12 months (when storage at 15°C – unopened. Do not refrigerate).

Obrázek 22: Specifikace lepidla SC 515 [12]

Specific gravity	2.6 – 2.7 g/cm ³
Thermal conductivity	3.0 – 3.2 W/mK
Electrical resistivity after curing	0.006 – 0.03 m Ωm
Glass transition temperature (Tg)	90°C (TMS Method)
Max. operating temperature	Continuous - 150°C Intermittent - 190 - 260°C
Lap shear strength (Al-Al)	1.4 – 1.7 kG/mm ²
Weight loss	0.4% up to 190°C

(*) - Typical value for number of tests.

Obrázek 23: Technické parametry lepidla SC 515 [12]

3.2.1.3.2 ELPOX AX 15S

ELPOX AX 15S je dvousložkové izotropní elektricky vodivé lepidlo. Plnidlem jsou stejně jako v předchozím případě stříbrné šupinky avšak o koncentraci 60 ± 1 hmotnostních %. Vazební složku tvoří epoxidová pryskyřice. Je dodávána ve formě stříbrné pasty ve dvou nádobách. První obsahuje samotné lepidlo a druhá vytvrzovadlo, které musí být smíchány v poměru 1:1. Za zmínku stojí fakt, že teplota vytvrzování ovlivňuje výslednou velikost odporu lepené vrstvy. Při vytvrzování v pokojové teplotě 20 °C po 24 hodin je udávaná hodnota odporu 0,001 – 0,0012 Ωcm. Pokud vytvrzení provedeme při teplotě 150 °C po dobu 15 min je katalogová hodnota odporu o řád nižší a to 0,00017 – 0,00018 Ωcm.

Number of components	Two.
Mixing ratio A : B (by weight)	1 : 1
Consistency after mixing A+B	Viscosity paste, 100% solids.
Viscosity "A" (*)	25 000 - 28 000 mPa s (cps)
Viscosity "B" (*)	120 000 - 140 000 mPa s (cps)
Viscosity "A+B" (*)	28 000 - 30 000 mPa s (cps)
Thixotrophy Index "A+B" (1/10)	4.2 - 5.0
Color	Dark silver.
Percentage of silver	60 ± 1%
Recommended curing schedule	20 C - 24 hours 60 C - 120 min. 80 C - 100 min. 120 C - 30 min. 150 C - 15 min.
Pot life	1.5 hour @ 25 C.
Storage	6 month with closed container @ 25 C.

Obrázek 25: Specifikace lepidla AX 15S [13]

Specific gravity "A"	2.45 – 2.65 g/ccm
Specific gravity "B"	1.55 – 1.65 g/ccm
Specific gravity "A+B"	1.95 – 2.50 g/ccm
Thermal conductivity	3.0 - 3.5 W/mK
Glass transition temp. (Tg)	78 C (TMS method).
Hardness (6H pencil)	Passed
Resistivity after curing (20 C – 24 h)	0.001– 0.0012 Ωcm
(60 C – 120 min)	0.0008 – 0.0009 Ωcm
(150 C – 15 min)	0.00017 – 0.00018 Ωcm
Connection flexibility (**)	Min. Ø = 4 cm diameter – Passed

(*) – Typical value for number of tests.

(**) – Test: Min. 10 moves on Ø diameter roller.

Obrázek 24: Technické parametry lepidla AX 15S [13]

3.2.1.4 Nanášení lepidla

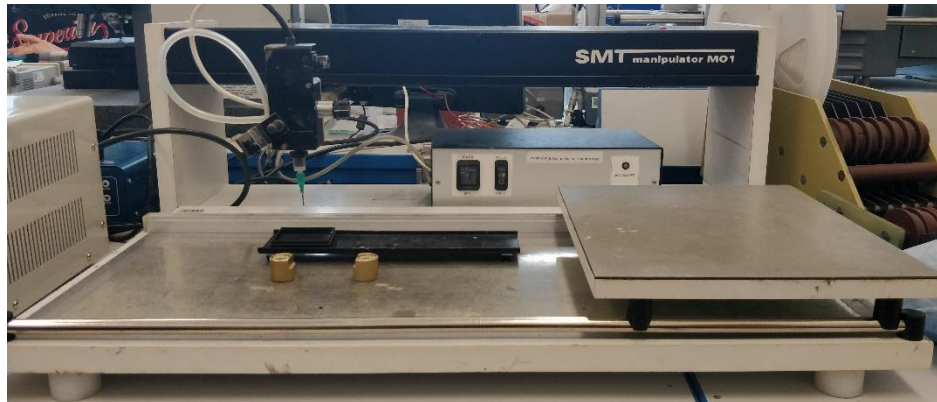
Lepidlo bylo nanášeno na desky pomocí přípravku na šablonový tisk SPIDÉ SD240 a silikonové stěrky. Šablony pro tisk byly vyrobeny z nerezové oceli o tloušťce 0,2 mm.



Obrázek 26: Přípravek na šablonový tisk SPIDÉ SD240 [14]

3.2.1.5 Osazení součástek

Montáž SMD rezistorů byla provedena pomocí manuální osazovačky SMT manipulátor MO1.



Obrázek 27: Manuální osazovačka SMD součástek SMT manipulátor MO1

3.2.1.6 Vytvrzení vzorků

Vytvrzení vzorků probíhalo v horkovzdušné cirkulační peci dle pokynů výrobce viz. tabulka 2.

Lepidlo	Teplota (°C)	Doba vytvrzení (min)
ELPOX SC 515	180	15
ELPOX AX 15S	150	15

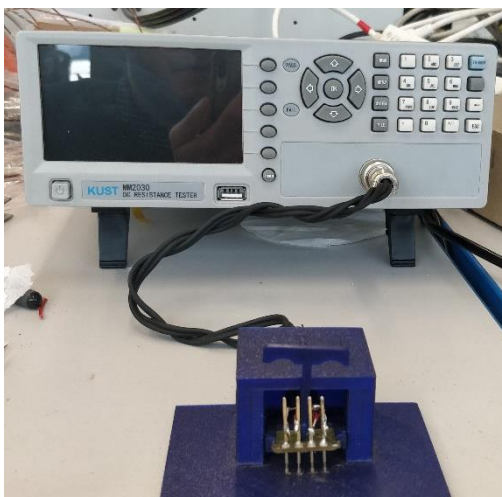
Tabulka 2: Přehled časů a teplot vytvrzení vzorků

3.2.2 Čtyřbodová metoda měření odporu

Tato metoda spočívá v použití čtyř bezpotenciálových měřících hrotů, které jsou od sebe rozmístěny ve stejně velkých vzdálenostech a nachází se v jedné ose. Na vnější hroty je přiveden stejnosměrný proud a na vnitřních je měřena hodnota napětí. Jedná se přímou metodu měření. Výhodou této metody je, že se eliminuje příspěvek odporů přívodních kontaktů a přívodních vodičů. Vnitřní hroty jsou připojeny k voltmetru s velkým vnitřním odporem, a proto přes ně bude protékat jen velmi malý proud, tedy zmíněné odpory se neuplatní. Jako nevýhodu lze spatřovat fakt, že výsledná změřená hodnota zahrnuje odpor dvou vrstev lepidla na připojovacích ploškách, a i odpor součástky samotné.

3.2.2.1 Použité přístroje

Přípravek pro měření malých odporů byl poskytnut katedrou elektrotechnologie. Je navržen přímo pro dané rozložení námi zkoušených desek. Měření odporu bylo provedeno pomocí přístroje KUST DC resistance tester MM2030.

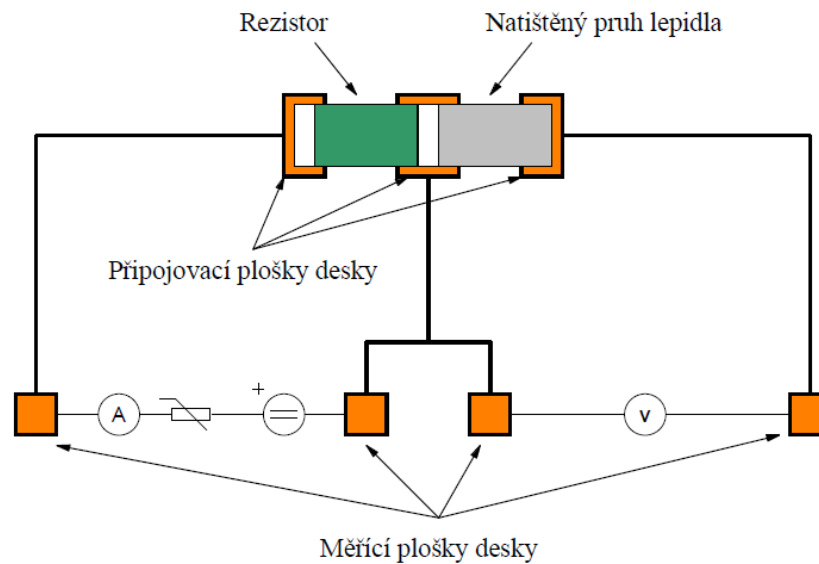


Obrázek 28: Měřič odporu KUST DC resistance tester MM2030 s připojeným přípravkem pro měření malých odporů

3.2.3 Třibodová metoda měření odporu

Třibodová metoda měření odporu je metodou nepřímou. Měřený vzorek je napájen ze zdroje stejnosměrného napětí a obvodem protéká proud. Velikost tohoto proudu je možno nastavit posuvným reostatem, který sloužil také jako ochrana před zkratem. Voltmetrem je pak měřen úbytek napětí na adhezním spoji a jeho odpor je získán výpočtem pomocí Ohmova zákona. Výhodou je, že dopočtená hodnota pak zohledňuje pouze odpor elektricky vodivého lepidla a nezahrnuje vlastní odpor nalepené součástky.

Princip měření je zřejmý z následujícího schématu:



Obrázek 29: Schéma měření odporu třibodovou metodou

3.2.3.1 Použité přístroje

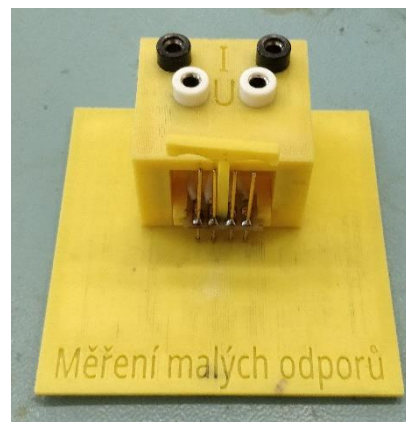
Pro napájení měřícího obvodu byl použit zdroj stejnosměrného napětí HAMEG Instruments Triple Power Supply HM – 7042. Měření napětí a proudu probíhalo dvěma multimetry: HP 34401A. Samotný měřící vzorek byl upevněn do přípravku pro měření malých odporů, který poskytla katedra elektrotechnologie.



Obrázek 32: Zdroj stejnosměrného napětí HAMEG Instruments Triple Power Supply HM-7042



Obrázek 31: Digitální multimetr HP 34401A



Obrázek 30: Přípravek pro měření malých odporů

3.2.3.2 Postup měření

Na napájecím zdroji bylo nastaveno napětí 0,5 V a měřený vzorek byl uchycen do přípravku. Po 15 vteřinách protékání proudu obvodem byla odečtena hodnota napětí a proudu z měřících přístrojů.

3.2.4 Měření nelinearity V-A charakteristiky

Jak bylo již výše popsáno míra nelinearity V-A charakteristiky vypovídá o změnách elektrických vlastností uvnitř vodivého lepeného spoje. U izotropních elektricky vodivých lepidel pak závisí především na parametrech tunelového přechodu mezi vodivými částicemi plnidla. Touto

metodou je možné sledovat tloušťku izolační bariéry přes kterou musí elektrony procházet. Při napájení měřeného vzorku sinusovým harmonickým proudem dochází ke zkreslení, které se projeví vznikem třetí harmonické napětí na vzorku. Analýzou této harmonické tak můžeme tyto změny odhalit. Pro napájení bylo použito proudu o frekvenci 10 kHz, který vytvářel na měřeném vzorku napětí základní harmonické o velikosti 30 mV.

3.2.4.1 Použité přístroje

K měření nelinearity byl použit měřicí přístroj DANBRIDGE CLT20 Component Linearity Test Equipment. Vzorky byly uchyceny do již zmíněného přípravku pro měření malých odporů.



Obrázek 33: DANBRIDGE CLT20 Component Linearity Test Equipment



Obrázek 34: Přípravek s uchyceným vzorkem

3.2.5 Zpracování naměřených hodnot

Se získané hodnoty odporů a nelinearit V-A charakteristiky byly matematicky vyrovnány. V případě čtyřbodové metody bylo třeba od naměřené hodnoty odporu odečíst vlastní odpor rezistoru (16 mΩ) a výsledek podělit dvěma, protože každý rezistor má dva lepené kontakty. Konečná velikost odporu pak odpovídá jednomu lepenému spoji. Pro každý vzorek desky tištěného spoje byl opět vypočten aritmetický průměr, medián a směrodatná odchylka.

4. Výsledky měření

4.1 Změna elektrických vlastností lepidla v závislosti na dodatečném žíhání

Tabulka 3 uvádí příklad naměřených hodnot odporu vzorku č.1 s použitím lepidla AX 70MN před dodatečným žíháním a tabulka 4 po dodatečném žíhání. Vzhledem k metodě měření připadají na jeden rezistor 2 naměřené hodnoty R. Červenou barvou je označeny nejmenší a největší hodnoty, které byly odstraněny ze souboru a písmeno X značí vadný spoj. Pro všechna měření byla dodržena stejná orientace hodnot odporu v tabulce vzhledem k orientaci vzorku. Veškerá naměřená data před dotvrzováním jsou uvedena v příloze 1 a po dotvrzování v příloze 2.

Vzorek č. 1 pro lepidlo AX 70MN									
Naměřené hodnoty R (Ω)									
0,01827	0,06614	0,1306	0,2581	0,1587	0,2952	0,05802	0,2258	0,1015	0,2039
0,1916	0,2437	0,2217	0,2701	0,1364	0,1445	0,4054	0,2598	0,1997	4,109

Tabulka 3: Naměřené hodnoty odporu lepidla AX 70MN před dodatečným žíháním

Vzorek č. 1 pro lepidlo AX 70MN při 100 °C / 10 min									
Naměřené hodnoty R (Ω)									
0,07719	0,1338	0,1883	0,2004	0,1338	0,2835	0,1325	0,2175	0,1564	0,2543
0,2392	0,2744	X	X	0,3104	0,2145	0,4602	0,3154	0,2293	3,142

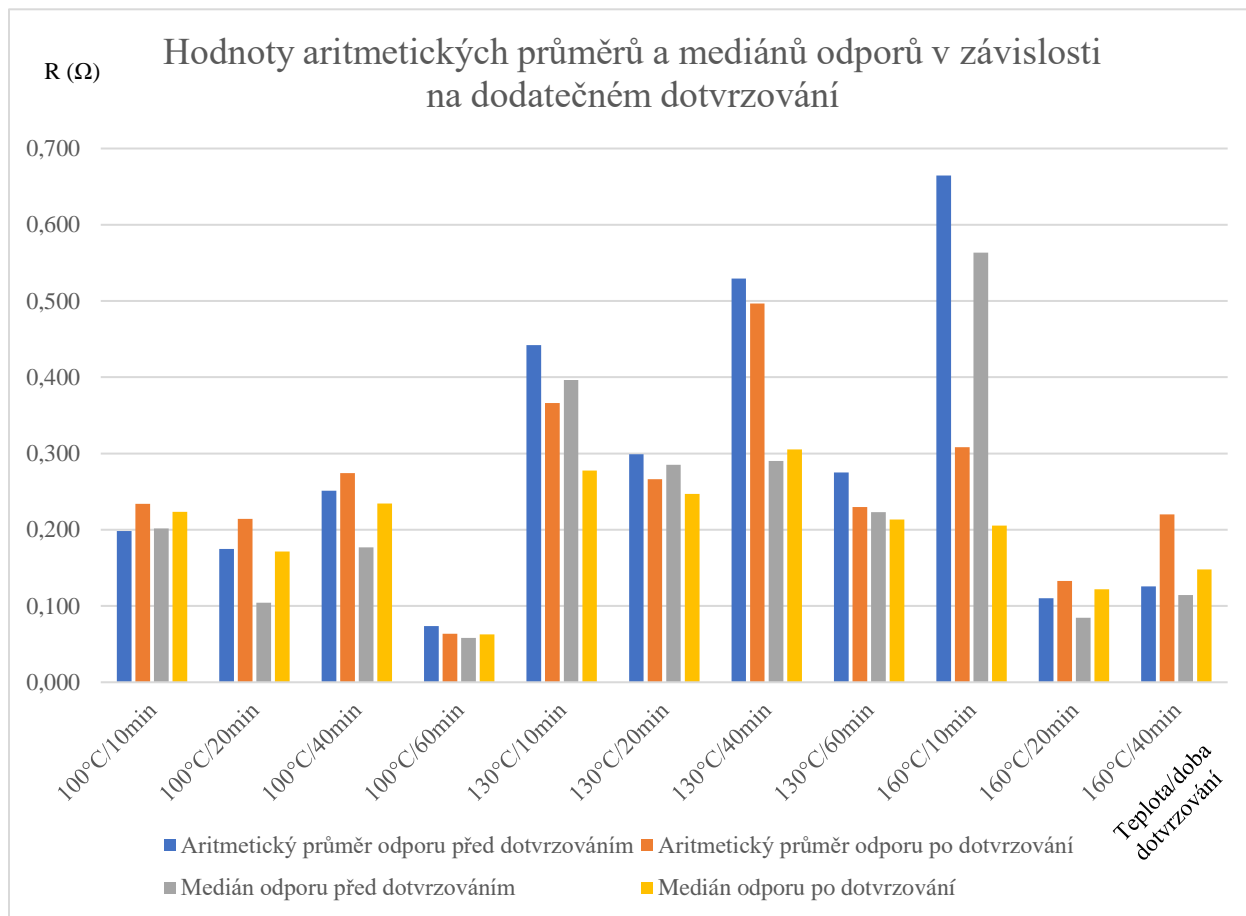
Tabulka 4: Naměřené hodnoty odporu lepidla AX 70MN po dodatečném žíhání

V Tabulce 5 jsou uvedeny zpracované statistické veličiny získané měřením pro jednotlivé desky. **Jedna hodnota statistické veličiny v tomto případě odpovídá 18ti naměřeným hodnotám odporu z tabulky 4.** Získané hodnoty byly vyneseny do grafů (Obrázek 35 – 37) tak, aby byla zřejmá změna ke které došlo po dodatečném dotvrzování.

Lepidlo AX 70MN v závislosti na dodatečném žihání při měření odporu dvoubodovou metodou								
Číslo vzorku	Teplota / doba dotvrzování	Před dotvrzováním			Po dotvrzování			Relativní změna arit. průměru (%)
		Aritmetický průměr (Ω)	Medián (Ω)	Směrodatná odchylka (Ω)	Aritmetický průměr (Ω)	Medián (Ω)	Směrodatná odchylka (Ω)	
1	100 °C / 10 min	0,198	0,202	0,084	0,234	0,223	0,0823	-17.6
2	100 °C / 20 min	0,175	0,104	0,146	0,214	0,172	0,140	-22.5
3	100 °C / 40 min	0,251	0,177	0,158	0,274	0,234	0,128	-9.30
4	100 °C / 60 min	0,074	0,058	0,0394	0,064	0,063	0,0164	13.7
5	130 °C / 10 min	0,442	0,396	0,324	0,366	0,278	0,447	17.1
6	130 °C / 20 min	0,299	0,285	0,150	0,266	0,247	0,135	10.9
7	130 °C / 40 min	0,530	0,290	0,702	0,497	0,306	0,536	6.18
8	130 °C / 60 min	0,275	0,223	0,147	0,230	0,213	0,145	16.5
9	160 °C / 10 min	0,665	0,564	0,329	0,308	0,205	0,256	53.6
10	160 °C / 20 min	0,110	0,085	0,0687	0,133	0,122	0,0507	-20.4
11	160 °C / 40 min	0,126	0,115	0,0614	0,220	0,148	0,171	-74.8

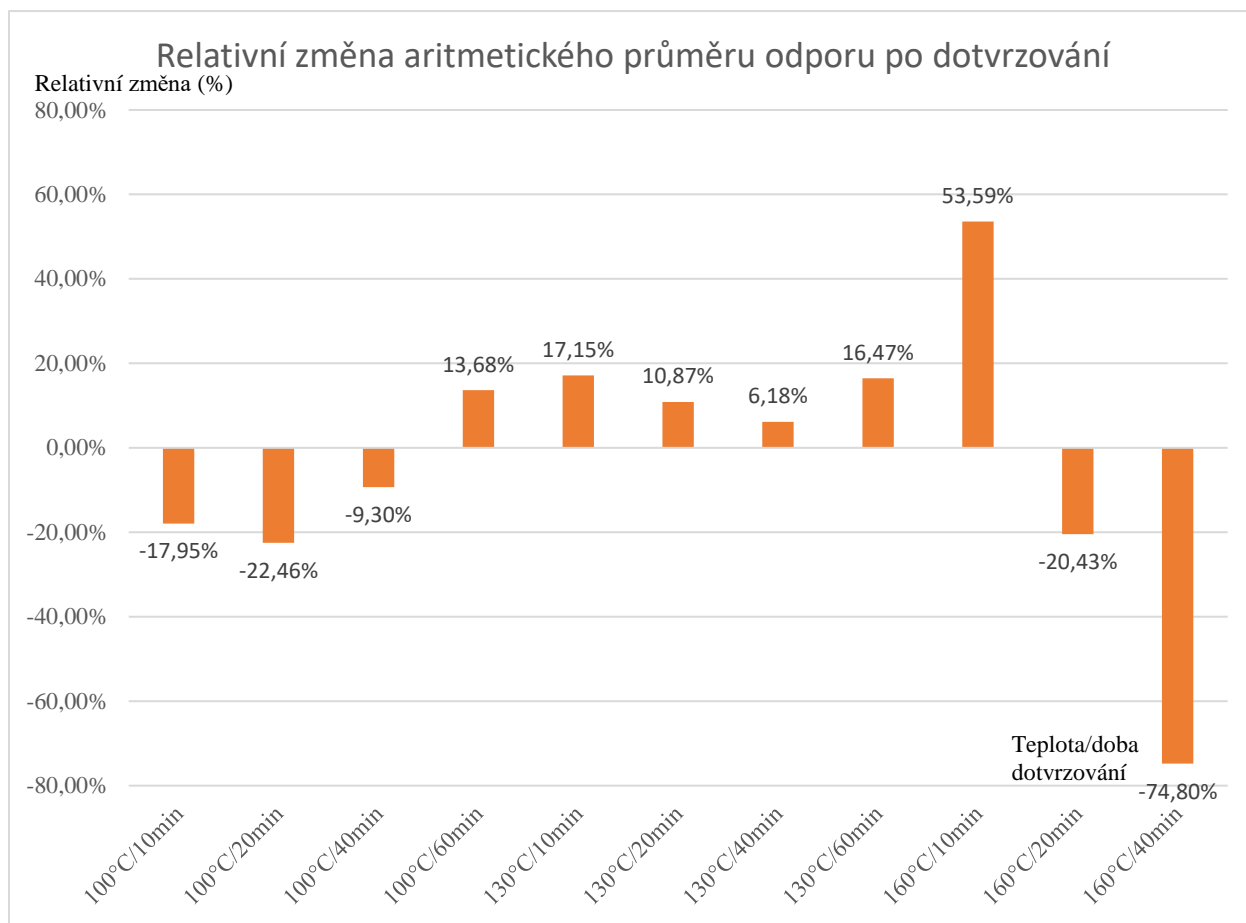
Tabulka 5: Vypočítané hodnoty aritmetických průměrů, mediánů, směrodatných odchylek a relativních změn arit. průměru odporu lepidla ECOSOLDER AX 70MN v závislosti na dodatečném žihání

Na Obrázku 35 můžeme vidět, že po žihání vzorků při teplotě 100 °C po dobu od 10 do 40 minut došlo k nárůstu odporu lepených spojů. Mírné zlepšení je možné pozorovat až po 60 minutách dotvrzování. Při teplotě dotvrzování 130 °C je patrné zlepšení elektrických vlastností lepidla pro všechny délky žihání. Nejmarkantnějšího poklesu v odporu elektricky vodivého lepidla bylo dosaženo pro žihání při teplotě 160 °C po dobu 10 minut.

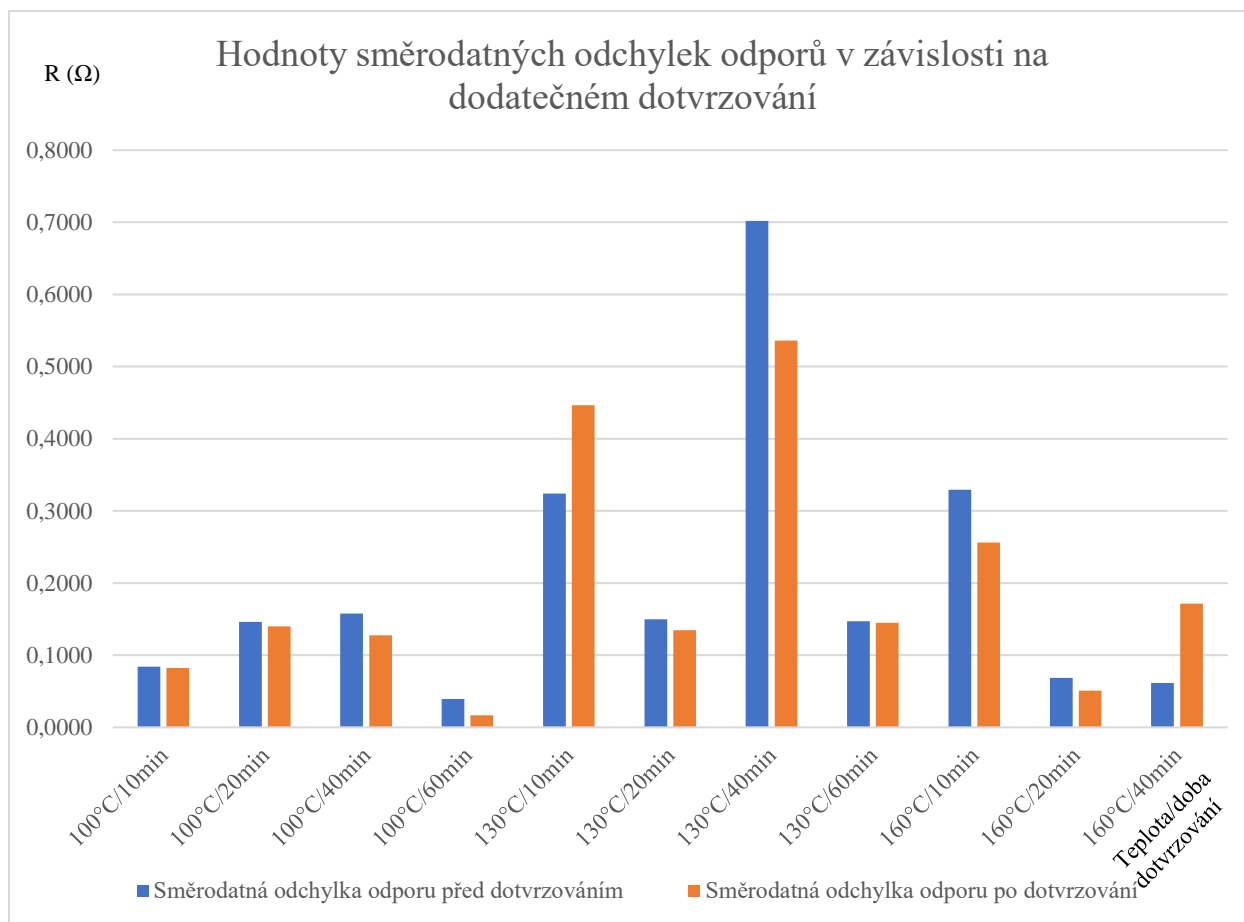


Obrázek 35: Porovnání aritmetických průměrů a mediánů odporu v závislosti na dodatečném žihání pro lepidlo ECOSOLDER AX 70MN

Obrázek 36 zobrazuje relativní procentuální změnu aritmetického průměru odporu vodivě lepených spojů. Názorně tedy názorně ilustruje výsledky popsané v přechozím odstavci.



Obrázek 36: Porovnání relativních změn aritmetického odporu v závislosti na dodatečném žihání pro lepidlo ECOSOLDER AX 70 MN



Obrázek 37: Porovnání směrodatných odchylek odporů v závislosti na dodatečném dotvrzování pro lepidlo ECOSOLDER AX 70MN

4.2 Porovnání čtyřbodové a tříbodové metody měření odporu

Tabulka 6 uvádí příklad naměřených hodnot odporu pro čtyřbodovou metodu měření. Naměřené hodnoty pro všechny vzorky jsou obsaženy v příloze 3.

Vzorek č. 1 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení						
Naměřené hodnoty R (mΩ)						
80,06	78,51	73,45	79,26	75,03	69,03	73,34
80,57	82,39	89,56	88,1	77,36	80,3	73,2

Tabulka 6: Naměřené hodnoty odporu získané čtyřbodovou metodou měření pro lepidlo SC 515 a měděné provedení desky

V tabulce 7 je možné vidět příklad již upravených hodnot pro čtyřbodovou metodu měření odporu. Od každé z naměřených hodnot v tabulce 6 byla odečtena vlastní hodnota odporu rezistoru (16 mΩ) a výsledek byl vydělen dvěma, protože pomocí čtyřbodové metody byly měřeny zároveň oba lepené spoje jedné instalované součástky. Výsledná hodnota pak odpovídá jednomu lepenému spoji. Červenou barvou je označena nejmenší a největší hodnota, která byla ze souboru odstraněna v rámci matematického vyrovnání. Umístění hodnot v tabulce odpovídá

orientaci měřené desky. Všechny upravené hodnoty odporu pro čtyřbodovou metodu měření viz příloha 4.

Vzorek č. 1 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení						
Vypočítané hodnoty R (mΩ)						
32,03	31,26	28,73	31,63	29,52	26,52	28,67
32,29	33,20	36,78	36,05	30,68	32,15	28,60

Tabulka 7: Upravené hodnoty odporu pro čtyřbodovou metodu měření odporu pro lepidlo SC 515 a měděné provedení desky

Tabulka 8 shrnuje vypočítané statistické veličiny získané měřením odporu elektricky vodivých lepidel pomocí čtyřbodové metody. **Jedna uvedená hodnota v tabulce reprezentuje 60 naměřených hodnot odporu lepených spojů.**

Měření odporu čtyřbodovou metodou				
Lepidlo	Provedení desky	Aritmetický průměr (mΩ)	Medián (mΩ)	Směrodatná odchylka (mΩ)
SC 515	Měď	32,37	32,15	2,542
AX 15S		37,33	37,11	4,903

Tabulka 8: Vypočítané hodnoty aritmetických průměrů, mediánů a směrodatných odchylek pro čtyřbodovou metodu měření

Příklad naměřených hodnot napětí a proudů pro třibodovou metodu měření je uveden v tabulce 9. Veškerá naměřená data pro tuto metodu obsahuje příloha 6.

Vzorek č. 1 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení							
U (mV)	1,43	1,29	1,14	1,27	2,23	1,26	2,13
I (mA)	71,03	63,83	62,57	67,83	65,27	67,03	62,57
U (mV)	10,44	1,68	1,71	2,26	3,68	1,64	2,41
I (mA)	57,28	61,31	63,93	64,83	53,63	42,18	69,59

Tabulka 9: Naměřené hodnoty napětí a proudů získané třibodovou metodou měření odporu pro lepidlo SC 515 a měděné provedení desky

V tabulce 10 je uveden příklad vypočítaných hodnot odporu pro třibodovou metodu měření. Ty byly dopočteny pomocí Ohmova zákona. Zároveň bylo u každého vzorku provedeno matematické vyrovnání (označeno červeně). Všechny hodnoty odporu pro třibodovou metodu měření jsou uvedeny v příloze 7.

Vzorek č. 1 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení							
R (mΩ)	20,08	20,23	18,20	18,71	34,13	18,80	34,09
	182,3	27,45	26,68	34,91	68,64	38,83	34,66

Tabulka 10: Vypočtené a upravené hodnoty odporu pro třibodovou metodu měření a lepidlo SC 515 na měděné úpravě desky

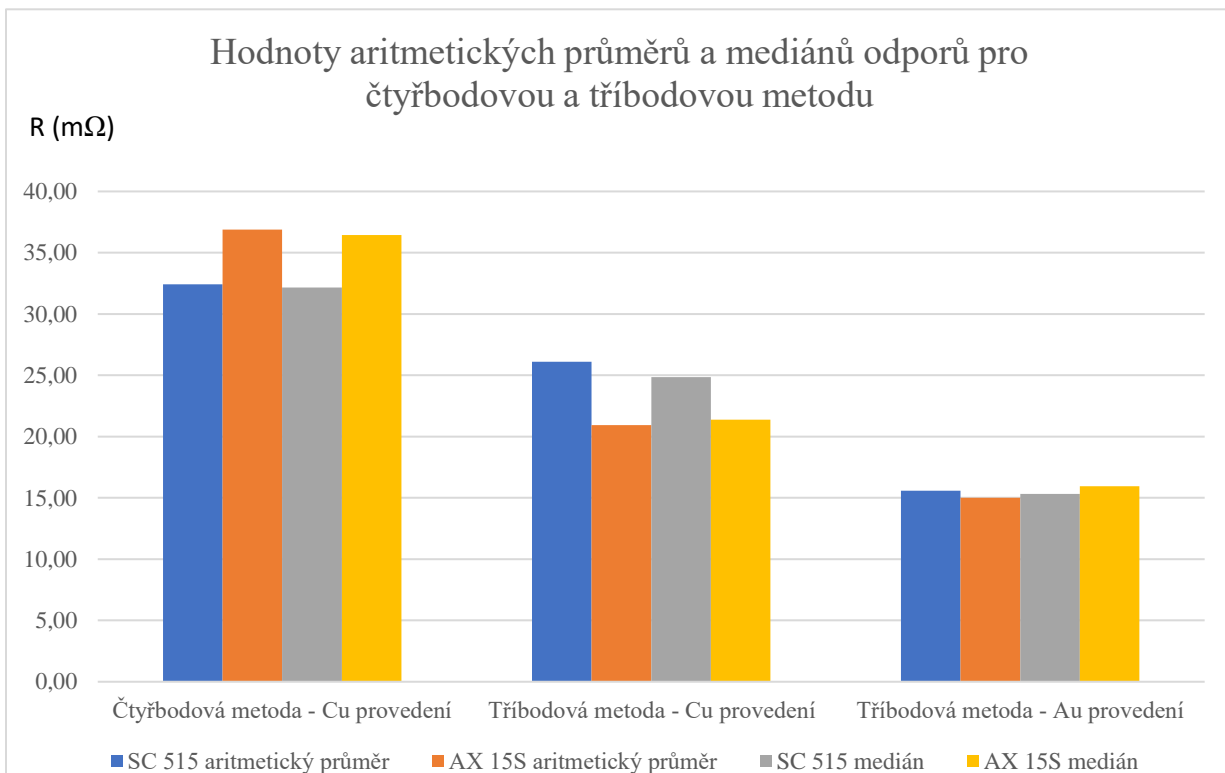
Tabulka 11 sumarizuje vypočítané statistické veličiny získané měřením odporu elektricky vodivých lepidel pomocí třibodové metody. **Jedna uvedená hodnota v tabulce reprezentuje 60 vypočtených hodnot odporu lepených spojů.**

Měření odporu třibodovou metodou				
Lepidlo	Provedení desky	Aritmetický průměr (mΩ)	Medián (mΩ)	Směrodatná odchylka (mΩ)
SC 515	Měď	26,10	24,85	7,402
	Zlato	15,58	15,33	2,450
AX 15S	Měď	20,95	21,37	2,501
	Zlato	15,02	15,94	2,149

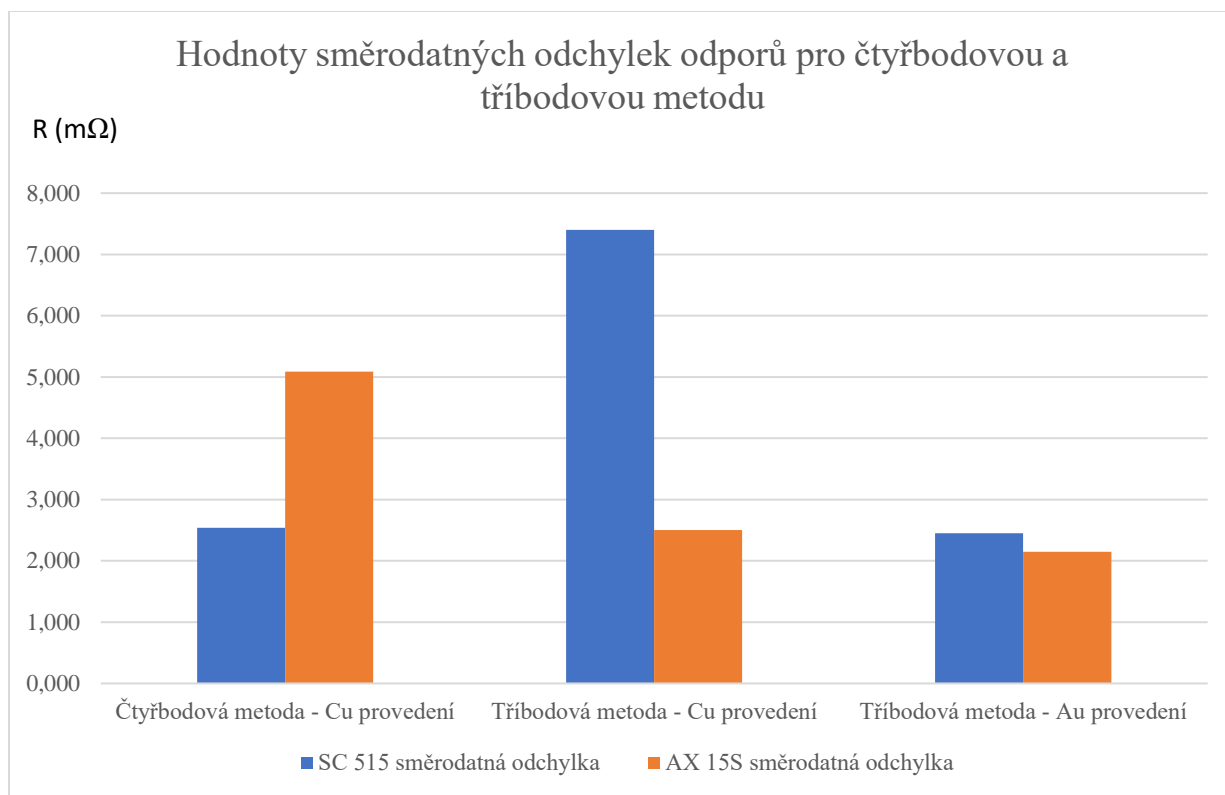
Tabulka 11: Vypočítané hodnoty aritmetických průměrů, mediánů a směrodatných odchylek pro třibodovou metodu měření

Na Obrázcích 38 – 39 je vyneseno grafické znázornění údajů z tabulek 8 a 11.

Na Obrázku 38 můžeme vidět grafické srovnání aritmetických průměrů a mediánů pro dvě různá elektricky vodivá lepidla v závislosti na provedení desky a použité metodě měření. V případě čtyřbodové metody vyšel aritmetický průměr odporu jednosložkového lepidla SC 515 přibližně o 12,1 % nižší než u dvousložkového lepidla AS 15S. Pro třibodovou metodu vyšel aritmetický průměr R lepidla SC 515 40,3 % nižší u zlatého provedení v porovnání s měděným. U lepidla AX 15S je možná pozorovat stejný trend změny aritmetického odporu lepené vrstvy, změna v tomto případě činila 28,3 %. Nejvýraznější změnu je možné pozorovat při srovnání obou metod měření.



Obrázek 38: Porovnání aritmetických průměrů a mediánů odporů lepidel SC 515 a AX 15S v závislosti na použité metodě měření



Obrázek 39: Porovnání směrodatných odchylek odporů lepidel SC 515 a AX 15S v závislosti na použité metodě měření

4.3 Měření nelinearity V-A charakteristiky

V tabulce 12 je uveden příklad naměřených hodnot nelinearity V-A charakteristiky vodivě lepených spojů. Červeně jsou označeny hodnoty souboru, které byla odstraněny v rámci matematického vyrovnání. Veškeré naměřené hodnoty měření nelinearity voltampérové charakteristiky zahrnuje příloha 8.

Vzorek č. 1 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení						
Naměřené hodnoty U (μV)						
0,285	0,198	0,152	0,212	0,320	0,215	0,023
0,042	0,022	0,149	0,153	0,019	0,023	0,166

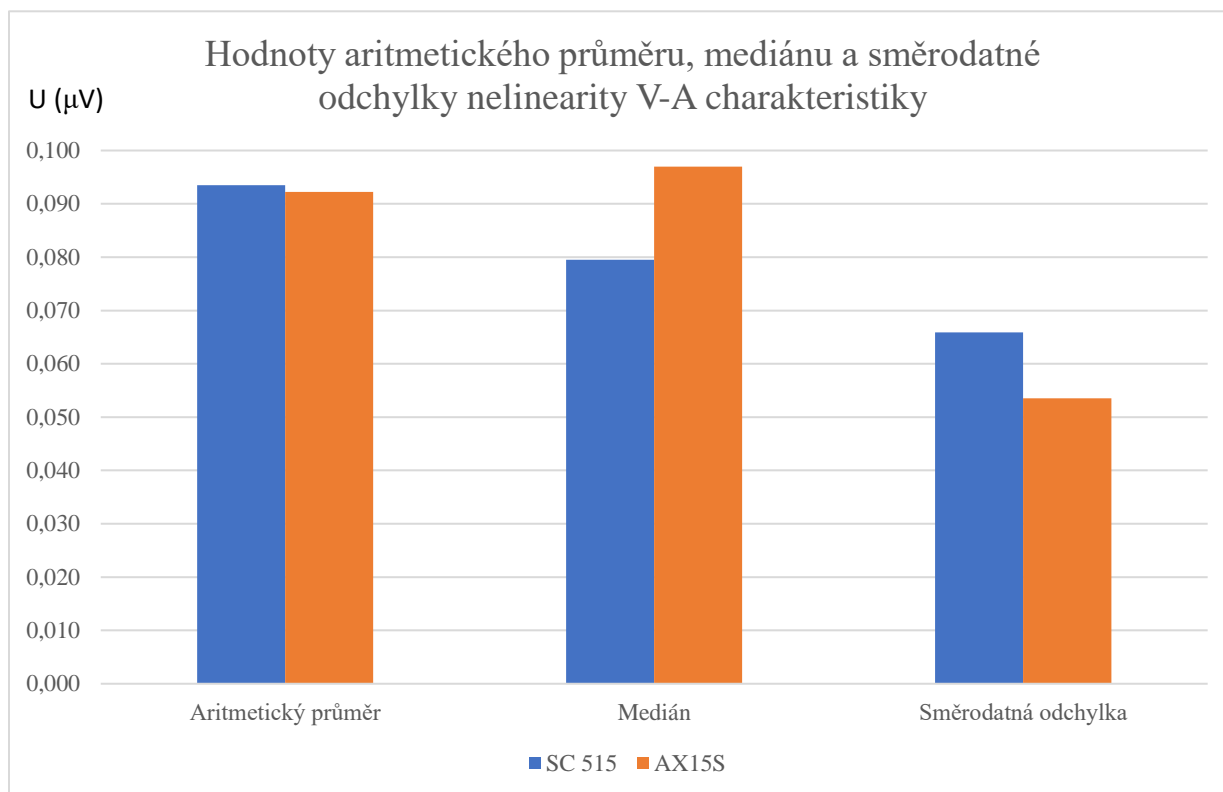
Tabulka 12: Naměřené hodnoty nelinearity V-A charakteristiky pro lepidlo SC 515 a měděné provedení desky

Hodnoty vypočítaných statistických veličin obdržených měřením nelinearity V-A charakteristiky jsou uvedeny v tabulce 13. **Jedna hodnota v této tabulce představuje 60 naměřených hodnot nelinearity V-A charakteristiky.**

Měření nelinearity V-A charakteristiky				
Lepidlo	Provedení desky	Aritmetický průměr (μV)	Medián (μV)	Směrodatná odchylka (μV)
SC 515	Měď	0,093	0,080	0,066
AX 15S		0,092	0,097	0,054

Tabulka 13: Vypočítané hodnoty aritmetických průměrů, mediánů a směrodatných odchylek pro měření nelinearity V-A charakteristiky

Na obrázku 40 lze pozorovat, že velikost nelinearity V-A charakteristiky přibližně stejná pro jednosložkové lepidlo SC 515 i dvousložkové lepidlo AX 15S. Hodnoty nelinearity V-A charakteristiky v případě obou elektricky vodivých lepidel nepřesáhly 0,1 μV.



Obrázek 40: Porovnání aritmetického průměru, mediánu a směrodatné odchylky pro měření nelinearity V-A charakteristiky

5. Diskuse výsledků

Posouzení elektrických vlastností lepidla v závislosti na dodatečném žíhání

Pro popsání výsledných změn odporu adhezních spojů po dodatečném dotvrzování by zvolen obrázek 36, protože se jeví být nejvíce přesvědčivý.

V počátečních dotvrzování (interval 10–20 min) při teplotě 100 °C je možné pozorovat, že odpor lepených spojů nejprve roste. Tuto skutečnost lze vysvětlit faktem, že při vysoušení ředidla dochází k vzniku chemických sloučenin (pravděpodobně oxidů Ag), které vytvářejí nevodivé vrstvy mezi částicemi stříbrného plnidla a tím zvyšují velikost tunelovací bariéry (roste tedy i tunelový odpor). Po překonání hranice 40 minut začíná odpor klesat, protože dochází ke smršťování polymerní matrice vazební složky a vodivé elementy stříbra se začínají přibližovat blíže k sobě, tedy nastává zpětné snížení tloušťky tunelovací bariéry. Velikost odporu je však pořád vyšší než před dotvrzováním. V čase 60 min dochází k znatelnému snížení odporu lepených spojů, a to konkrétně o 13,68 % (viz tabulka 5) oproti jeho hodnotě před dodatečným žíháním.

Výsledky dotvrzování při teplotě 130 °C můžeme popsat podobným principem jako v přechodím případě. Tedy postupné klesání odporu vodivého spoje se zpomaluje s narůstajícím časem, což je způsobeno vznikem nevodivých chemických sloučenin při současném zmenšování tloušťky nevodivé bariéry mezi vodivými částicemi lepidla (interval 10 – 40 min). Působí proti sobě zmíněné dva procesy, které mají opačný účinek na velikost odporu lepené vrstvy. A konečný pokles smrštěním matrice pojiva v čase 60 minut.

Při dodatečném žíhání při teplotě 160 °C lze pozorovat, výrazné snížení odporu adhezních vodivých spojů v čase 10 min, a to o 53,59 % (viz tabulka 5). Následný strmý nárůst odporu je způsoben nenávratnou degradací spoje vlivem tvorby karbidů stříbra, které zabraňují vedení elektrického proudu.

Je nutné podotknout, že metoda měření pomocí klešťového přípravku nebyla příliš přesná, co se týče velikosti elektrického odporu, protože se prakticky jednalo o dvoubodovou metodu měření. Vzorčky poskytnuté vedoucím práce měly menší vzdálenost mezi měřicími ploškami, a proto je nebylo možné uchytit do přípravku pro měření malých odporů. Výsledky však ilustrují procentuální změny jednotlivých veličin, které přinesly příslušnou vypovídací hodnotu.

Měření odporu lepených vodivých spojů čtyřbodovou a třibodovou metodou

Na obrázku 38 – 39 můžeme vidět grafické znázornění výsledků měření odporu vodivých lepených spojů pro čtyřbodovou a třibodovou metodu měření.

Výsledky měření odporu **čtyřbodovou metodou** se neshodují s předpokládaným očekáváním. Hodnota aritmetického průměru odporu lepených spojů pro jednosložkové lepidlo SC 515 vyšla přibližně o 12,1 % nižší než hodnota dvousložkového lepidla AX 15S. Dle katalogových listů výrobce je však měrný elektrický odpor lepidla SC 515 (0,006 – 0,03 Ω m) vyšší než u lepidla AX 15S (0,0017 – 0,0018 Ω m). Nabízí se několik možných vysvětlení, které mohly různou mírou přispět k tomuto výsledku. Prvním je, že samotná chyba metody měření. Čtyřbodová metoda byla obecně méně přesná, protože měříme odpor dvou vrstev lepidla, a i vlastní odpor

součástky, která má určitou výrobní toleranci. Druhým z původců mohl být nedostatečně přesný poměr smíchání obou složek dvousložkového lepidla AX 15S, což mohlo ovlivnit jeho výsledné elektrické vlastnosti po vytvrzení.

Hodnoty získané měřením odporu **tříbodovou metodou** v závislosti na materiálu vyhotovení tištěného spoje ukazují, že desky s měděnou povrchovou úpravou mají vyšší aritmetickou hodnotu odporu, než vzorky se zlatou úpravou. Ačkoli má měď menší měrný elektrický odpor než zlato, je chemicky méně stálá a na vzduchu dochází k její oxidaci. Vrstva oxidu na povrchu způsobuje vyšší hodnotu elektrického odporu. Tuto skutečnost potvrzuje obrázek 38. Aritmetická hodnota odporu u desek se zlatým povrchem pro lepidlo SC 515 byla 15,58 mΩ a u měděného provedení desek 26,10 mΩ. Hodnoty se tedy liší o 40,3 %. U lepidla AX 15S je pozorovatelný stejný trend. Tedy aritmetický průměr odporu vzorků se zlatou úpravou činil 15,02 mΩ a pro měděnou úpravu 20,95 mΩ. V případě zlata je tedy odpor menší o 28,3 %. Odpor jednosložkového lepidla SC 515 byl vyšší než u dvousložkového lepidla AX 15S, což odpovídá technickým listům výrobce.

Při porovnání obou metod můžeme vyvodit, že tříbodová metoda je jednoznačně přesnější, protože měříme pouze vlastní odpor pruhu lepidla a nikoli odpor instalované součástky společně s dvěma vrstvami lepidla. Proto není zatížena tak značnou chybou metody.

Měření nelinearity V-A charakteristiky vodivých lepených spojů

Průměrná hodnota nelinearity V-A charakteristiky vyšla v případě jednosložkového lepidla SC 515 0,093 μV a u dvousložkového lepidla AX 15S činila 0,092 μV. Tyto hodnoty jsou přibližně stejné a jsou srovnatelné s velikostí nelinearity u tlustovrstvých plastových odporů.

6. Závěr

Cílem práce bylo nastínit čtenáři charakteristické rysy elektricky vodivých lepidel, posoudit jak dodatečné dotvrzování ovlivní elektrické vlastnosti adhezních elektricky vodivých spojů, porovnat dvě metody měření odporu tohoto typu spojů a změřit nelinearitu V-A charakteristiky.

Teoretická část práce uvádí to problematiky elektricky vodivých lepidel. Popisuje jejich rozdělení z hlediska typu vodivosti, nejčastěji používané materiály pro vodivou a vazební složku a základní principy jejich vedení elektrického proudu. Dále se zabývá sledovanými vlastnostmi lepených spojů v rozsahu této práce.

Praktická část je rozdělena na tři dílčí pasáže. První je cílena na sledování elektrických vlastností lepidla v závislosti na dodatečném žíhání. Druhá se věnuje měření odporu elektricky vodivých lepidel pomocí čtyřbodové a tříbodové metody. Třetí část se zabývá měřením nelinearity V-A charakteristiky vodivě lepených spojů.

Pro realizaci této práce byla použita tři izotropní elektricky vodivá lepidla od výrobce Amepox Microelectronics LTD. Jedno dvousložkové lepidlo ELPOX AX 15N a dvě jednosložková lepidla ELPOX SC 515 a ECOSOLDER AX 70MN. Desky plošných spojů pro měření čtyřbodovou metodou byly vyhotoveny v měděném provedení a desky pro měření tříbodovou metodou ve zlaté i měděné povrchové úpravě.

Pro každou z metod měření odporu byl použit příslušný měřicí přípravek a s ním kompatibilní měřicí přístroj. Proto bylo nutné využít více různých měřících přístrojů.

Výsledky ukázaly, že dodatečné dotvrzování adhezních elektricky vodivých spojů zlepšuje jejich elektrické vlastnosti, ale jen do určité meze, kdy začíná docházet k degradaci spoje a k opětovnému zhoršení těchto vlastností. Je možné konstatovat, že uvnitř lepidla probíhají během dotvrzování dva dominantní pochody, které mají opačný účinek na velikost odporu lepené vrstvy.

Ačkoli čtyřbodová metoda měření odporu nepřinesla očekávaný výsledek, neměla zásadní vliv na výsledný výstup potřebný k porovnání obou metod měření. Srovnáme-li čtyřbodovou a tříbodovou metodu měření odporu elektricky vodivého lepeného spoje, dospějeme k závěru, že druhá ze zmíněných metod je přesnější. Taktéž se potvrdila známá skutečnost, že materiál vodivé vrstvy tištěného spoje ovlivňuje výslednou velikost odporu adhezního vodivého spoje.

Nelinearita V-A charakteristiky dosáhla velmi podobných hodnot, i když byla použita jedno- (SC 515) a dvousložková (AX 15S) lepidla. Je zřejmé, že u použitých lepidel neměla jejich skladba citelný vliv na výslednou velikost nelinearity V-A charakteristiky.

Všechny požadované cíle této práce byly tedy splněny.

Literatura

- [1] YILI a C.P. WONG, Silver migration control in electrically conductive adhesives, *Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis, 2006, HDP'06*, 2: IEEE, 2006, 2006, **1998**(21), 206-212, ISBN 1-4244-0488-6, Dostupné z: doi:10.1109/HDP.2006.1707594
- [2] MACH, Pavel, Modifikovaná elektricky vodivá lepidla, *Electroscope* [online], Plzeň, 2009, **2009**(2), 1-4 [cit. 2022-11-12], ISSN 1802-4564, Dostupné z: http://147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2009/cislo2_2009_Diagnostika/r3c2c7.pdf
- [3] ARADHANA, Ruchi, Smita MOHANTY a Sanjay Kumar NAYAK. A review on epoxy-based electrically conductive adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives* [online]. 2020, **99**, 1-18 [cit. 2022-11-16]. ISSN 01437496. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijadhadh.2020.102596
- [4] GOH, C.F., H. YU, S.S. YONG, S.G. MHAISALKAR, F.Y.C. BOEY a P.S. TEO, The effect of annealing on the morphologies and conductivities of sub-micrometer sized nickel particles used for electrically conductive adhesive, *Thin Solid Films*, 2006, **504**(1-2), 416-420, ISSN 0040-6090, Dostupné z: doi:10.1016/j.tsf.2005.09.122
- [5] LIN, Wei, Xiangrong XI a Chaosheng YU, Research of silver plating nano-graphite filled conductive adhesive, *Synthetic Metals*, 2009, **159**(7-8), 619-624, ISSN 0379-6779, Dostupné z: doi:10.1016/j.synthmet.2008.12.003
- [6] LAU, John H., C. P. WONG, Ning-Cheng LEE a Ricky S.W. LEE, *Electronics manufacturing: with lead-free, halogen-free, and conductive-adhesive materials*, 2003, New York, NY: McGraw-Hill, 2003, ISBN 978-007-1386-241.
- [7] DERAKHSHANKHAH, Hossein, Rahim MOHAMMAD-REZAEI, Bakhshali MASSOUMI, Mojtaba ABBASIAN, Aram REZAEI, Hadi SAMADIAN a Mehdi JAYMAND, Conducting polymer-based electrically conductive adhesive materials: design, fabrication, properties, and applications, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* [online], 2020, **31**(14), 10947-10961 [cit. 2022-11-13], ISSN 0957-4522, Dostupné z: doi:10.1007/s10854-020-03712-0
- [8] MACH, Pavel a Seba BARTO, Resistance and Nonlinearity of Current-Voltage Characteristic of Conductive Adhesive Joints with Isotropic Conductivity: Tunnel Theory, *Electroscope* [online], Plzeň, 2018, 26, 11, 2018, **2018**(1), 1-5 [cit. 2022-11-12], ISSN 1802-4564, Dostupné z: http://147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2018/Cislo1_2018/r12c1c8.pdf
- [9] DAOQIANG LU, Q.K. TONG a C.P. WONG, Mechanisms underlying the unstable contact resistance of conductive adhesives, *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing* [online], 1999, **22**(3), 228-232 [cit. 2022-11-13], ISSN 1558-0822, Dostupné z: doi:10.1109/6104.795858
- [10] BARTO, Seba a Pavel MACH, Nonlinear distortion of C/V characteristic — Useful tool for diagnostics of electrically conductive adhesives: Theoretical background, measuring equipment, selected applications, *2016 Conference on Diagnostics in Electrical Engineering*

- (*Diagnostika*) [online], Plzeň: IEEE, 2016, 2016, **2016**(1), 1-4 [cit, 2022-11-13], ISBN 978-1-5090-6178-5, Dostupné z: doi:10.1109/DIAGNOSTIKA.2016.7736501
- [11] Amepox Microelectronics, Ltd, [online katalogový list], E-S AX 70MN Adhesive, 2006, [cit 2022-11-12], Dostupné z: http://www.amepox-mc.com/files/E-S_AX70MN.pdf
- [12] Amepox Microelectronics, Ltd, [online katalogový list], ELPOX SC 515 Adhesive, 2006, [cit 2022-11-12], Dostupné z: <https://amepox-mc.pl/wp-content/uploads/2020/12/ELPOXSC515.pdf>
- [13] Amepox Microelectronics, Ltd, [online katalogový list], ELPOX AX 15S Adhesive, 2006, [cit 2022-11-12], Dostupné z: <https://amepox-mc.pl/wp-content/uploads/2020/12/ELPOXSC515.pdf>
- [14] Stencil printer SPIDÉ SD240 [online], [cit, 2022-11-13], Dostupné z: <https://spide-smt.nl/portfolio-item/sd240/>
- [15] SUHIR, Ephraim, Yung-Cheng LEE a C, P, WONG, Micro- and opto-electronic materials and structures: physics, mechanics, design, reliability, packaging, New York: Springer, 2007, ISBN 978-0387279749.

Seznam příloh

Příloha 1: Naměřené hodnoty odporů před dodatečným dotvrzováním	47
Příloha 2: Naměřené hodnoty odporů po dodatečném dotvrzování	48
Příloha 3: Naměřené odporu získané čtyřbodovou metodou měření	50
Příloha 4: Upravené hodnoty odporu získané čtyřbodovou metodou měření	51
Příloha 5: Měření odporu rezistoru 0R0 typu CDF-K	52
Příloha 6: Naměřené hodnoty napětí a proudů získané třibodovou metodou měření	53
Příloha 7: Vypočtené hodnoty odporu získané třibodovou metodou měření.....	56
Příloha 8: Naměřené hodnoty nelinearity V-A charakteristiky	58

Příloha 1: Naměřené hodnoty odporů před dodatečným dotvrzováním

Umístění hodnot v tabulce odpovídá orientaci měřené desky. Červenou barvou jsou značeny hodnoty, které byly odstraněny při matematickém vyrovnání. Písmeno X značí vadný spoj.

Vzorek č. 1 pro lepidlo AX 70MN									
Naměřené hodnoty R (Ω)									
0,01827	0,06614	0,1306	0,2581	0,1587	0,2952	0,05802	0,2258	0,1015	0,2039
0,1916	0,2437	0,2217	0,2701	0,1364	0,1445	0,4054	0,2598	0,1997	4,109

Vzorek č. 2 pro lepidlo AX 70MN									
Naměřené hodnoty R (Ω)									
0,510	0,4439	0,1753	0,1771	0,1076	0,4821	0,07081	0,06435	0,05465	0,0975
0,1013	0,2209	0,1334	0,06179	0,2343	0,0853	0,7594	0,03385	0,06385	0,06502

Vzorek č. 3 pro lepidlo AX 70MN									
Naměřené hodnoty R (Ω)									
0,5321	0,460	0,1432	0,1558	1,0251	0,2224	0,1145	0,3448	0,06762	0,1413
0,1233	0,1321	0,4360	0,1485	0,5232	0,03728	0,4429	0,05039	0,1983	0,2826

Vzorek č. 4 pro lepidlo AX 70MN									
Naměřené hodnoty R (Ω)									
0,1233	0,06334	0,086	0,06097	0,04861	0,04441	0,05518	0,04727	0,1249	0,05062
0,03631	0,04462	0,03492	0,05387	0,08875	0,08902	0,1977	0,06847	53,85	0,045

Vzorek č. 5 pro lepidlo AX 70MN									
Naměřené hodnoty R (Ω)									
0,4223	0,09037	1,356	0,4005	0,5521	0,0854	0,8770	3,764	0,3551	0,3370
0,5646	0,1265	0,0473	0,1506	0,3922	0,06555	0,2638	0,6389	0,8536	0,4285

Vzorek č. 6 pro lepidlo AX 70MN									
Naměřené hodnoty R (Ω)									
0,4375	0,1476	0,3081	0,5256	0,2230	0,3054	0,2077	0,3777	0,08219	0,6640
0,1825	0,1869	0,3027	0,1450	0,2675	0,05056	0,4172	0,1499	0,7106	0,4509

Vzorek č. 7 pro lepidlo AX 70MN									
Naměřené hodnoty R (Ω)									
0,3390	0,3287	0,1524	2,915	0,2936	0,5455	0,1086	0,2397	0,1358	0,170
0,1246	1,88	0,3787	0,2028	0,2297	0,1215	5,942	0,3771	0,8122	0,2873

Vzorek č. 8 pro lepidlo AX 70MN									
Naměřené hodnoty R (Ω)									
0,5012	0,2276	0,2060	0,8952	0,09936	0,06662	0,09018	0,1934	0,1284	0,1718
X	X	0,4546	0,3242	0,2186	0,1887	0,3762	0,2359	0,6179	0,3689

Vzorek č. 9 pro lepidlo AX 70MN									
Naměřené hodnoty R (Ω)									
0,55525	0,55525	0,26525	0,26525	0,24875	0,24875	0,12025	0,12025	0,28375	0,28375
0,20175	0,20175	0,63275	0,63275	0,88775	0,88775	0,29275	0,29275	0,10875	0,10875

Vzorek č. 10 pro lepidlo AX 70MN									
Naměřené hodnoty R (Ω)									
0,162	0,085	0,0849	0,0671	0,159	0,106	0,0663	0,0791	0,0441	0,0416
X	X	0,288	0,0847	0,0253	0,475	0,123	0,0522	0,245	0,0746

Vzorek č. 11 pro lepidlo AX 70MN									
Naměřené hodnoty R (Ω)									
0,0722	0,279	0,0748	0,0385	0,0721	0,128	0,116	0,113	0,135	0,0798
0,0466	0,0613	0,343	0,167	0,218	0,227	0,127	0,108	0,155	0,0864

Příloha 2: Naměřené hodnoty odporů po dodatečném dotvrzování

Vzorek č. 1 pro lepidlo AX 70MN při 100 °C / 10 min									
Naměřené hodnoty R (Ω)									
0,07719	0,1338	0,1883	0,2004	0,1338	0,2835	0,1325	0,2175	0,1564	0,2543
0,2392	0,2744	X	X	0,3104	0,2145	0,4602	0,3154	0,2293	3,142

Vzorek č. 2 pro lepidlo AX 70MN při 100 °C / 20 min									
Naměřené hodnoty R (Ω)									
0,3782	0,2496	0,1561	0,2284	0,1197	0,7031	0,1586	0,07686	0,1441	0,3782
0,1158	0,1866	0,2353	0,1108	0,1847	0,1323	0,8646	0,08637	0,2382	0,1158

Vzorek č. 3 pro lepidlo AX 70MN při 100 °C / 40 min									
Naměřené hodnoty R (Ω)									
0,6672	0,2984	0,1636	0,2069	0,4537	0,271	0,2095	0,2852	0,1152	0,2045
0,1624	0,1464	0,2097	0,1772	1,0693	0,3013	0,1652	0,4109	0,2592	0,3468

Vzorek č. 4 pro lepidlo AX 70MN při 100 °C / 60 min									
Naměřené hodnoty R (Ω)									
0,1365	0,0565	0,04937	0,05645	0,07629	0,06467	0,04862	0,06216	0,08089	0,04151
0,06336	0,04206	0,04803	0,07589	0,04713	0,08176	0,10378	0,08058	0,06756	0,03989

Vzorek č. 5 pro lepidlo AX 70MN při 130 °C / 10 min									
Naměřené hodnoty R (Ω)									
0,3891	0,10234	2,095	0,4312	0,6646	0,05668	0,3527	0,3038	0,4615	0,2518
0,4444	0,1359	0,04317	0,06958	0,3649	0,05229	0,1381	0,1705	2,073	0,1321

Vzorek č. 6 pro lepidlo AX 70MN při 130 °C / 20 min									
Naměřené hodnoty R (Ω)									
0,4658	0,1363	0,4013	0,06607	0,2695	0,2785	0,1759	0,3765	0,09666	0,5025
0,1742	0,1867	0,3117	0,1314	0,2245	0,06386	0,4583	0,1416	1,506	0,3992

Vzorek č. 7 pro lepidlo AX 70MN při 130 °C / 40 min									
Naměřené hodnoty R (Ω)									
0,1207	0,3254	0,1282	2,257	0,3675	0,5937	0,2034	0,2835	0,2142	0,3289
0,1444	1,588	0,4156	0,2857	0,2769	0,1432	3,169	0,4623	0,6845	0,2423

Vzorek č. 8 pro lepidlo AX 70MN při 130 °C / 60 min									
Naměřené hodnoty R (Ω)									
0,3301	0,2291	0,3861	1,411	0,09586	0,09867	0,07584	0,03229	0,1297	0,2022
X	X	0,2246	0,6227	0,1468	0,3102	0,1533	0,3483	0,2919	0,02477

Vzorek č. 9 pro lepidlo AX 70MN při 160 °C / 10 min									
Naměřené hodnoty R (Ω)									
0,4046	1,0945	0,2456	0,5062	0,1452	0,3872	0,1287	0,1961	0,069	0,04004
0,1674	0,04614	0,9197	0,4482	0,8251	0,09545	0,5945	0,1189	0,2145	0,02684

Vzorek č. 10 pro lepidlo AX 70MN při 160 °C / 20 min									
Naměřené hodnoty R (Ω)									
0,1183	0,1147	0,1614	0,06181	0,1703	0,1281	0,09767	0,1554	0,09141	0,05385
X	X	0,3647	0,09956	0,1668	0,10132	0,1481	0,09235	0,2901	0,1254

Vzorek č. 11 pro lepidlo AX 70MN při 160 °C / 40 min									
Naměřené hodnoty R (Ω)									
0,1217	0,3366	0,1456	0,1503	0,1078	0,4291	0,05457	0,1139	0,1231	0,08175
X	X	0,1224	0,05915	0,7561	4,796	0,2992	0,2972	0,2252	0,1521

Příloha 3: Naměřené odporu získané čtyřbodovou metodou měření

Umístění hodnot v tabulce odpovídá orientaci měřené desky.

Vzorek č. 1 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení						
Naměřené hodnoty R (mΩ)						
80,06	78,51	73,45	79,26	75,03	69,03	73,34
80,57	82,39	89,56	88,10	77,36	80,30	73,20

Vzorek č. 2 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení						
Naměřené hodnoty R (mΩ)						
81,69	78,65	88,11	105,98	80,38	82,95	91,76
78,37	74,41	82,65	75,11	78,84	26,09	82,86

Vzorek č. 3 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení						
Naměřené hodnoty R (mΩ)						
75,48	92,30	78,46	81,75	86,06	76,41	80,56
87,6	87,54	97,92	87,12	47,09	78,37	84,35

Vzorek č. 4 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení						
Naměřené hodnoty R (mΩ)						
83,88	88,03	77,45	109,44	82,19	74,15	53,55
81,54	78,46	72,72	76,56	72,33	83,31	76,58

Vzorek č. 5 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení						
Naměřené hodnoty R (mΩ)						
87,53	76,92	85,35	91,57	79,76	80,36	78,85
69,43	87,01	75,84	80,74	99,33	88,47	78,19

Vzorek č. 1 pro lepidlo AX 15S a měděné provedení						
Naměřené hodnoty R (mΩ)						
75,42	89,26	90,04	74,86	133,67	83,07	83,68
92,81	76,09	80,62	79,21	79,85	86,41	77,59

Vzorek č. 2 pro lepidlo AX 15S a měděné provedení						
Naměřené hodnoty R (mΩ)						
100,96	91,81	87,57	93,21	88,09	90,41	99,46
85,61	77,81	92,02	83,15	82,22	100,32	108,25

Vzorek č. 3 pro lepidlo AX 15S a měděné provedení						
Naměřené hodnoty R (mΩ)						
107,09	149,98	85,87	95,44	84,39	112,8	113,04
92,39	92,45	104,49	96,77	93,50	121,25	101,78

Vzorek č. 4 pro lepidlo AX 15S a měděné provedení						
Naměřené hodnoty R (mΩ)						
116,77	104,11	95,55	77,46	90,92	90,87	92,95
82,83	84,56	82,34	90,92	85,28	92,49	101,82

Vzorek č. 5 pro lepidlo AX 15S a měděné provedení						
Naměřené hodnoty R (mΩ)						
241,7	88,56	78,40	86,88	83,13	81,28	77,14
74,62	69,59	74,06	83,39	100,08	71,28	87,19

Příloha 4: Upravené hodnoty odporu získané čtyřbodovou metodou měření

Od naměřených hodnot byl odečten vlastní odpor součástky (16 mΩ) a výsledná hodnota byla vydělena dvěma. Dostaneme tak průměrnou hodnotu odporu jednoho lepeného spoje.

Vzorek č. 1 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení						
Vypočítané hodnoty R (mΩ)						
32,03	31,26	28,73	31,63	29,52	26,52	28,67
32,29	33,20	36,78	36,05	30,68	32,15	28,60

Vzorek č. 2 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení						
Vypočítané hodnoty R (mΩ)						
32,85	31,33	36,06	44,99	32,19	33,48	37,88
31,19	29,21	33,33	29,56	31,42	5,046	33,43

Vzorek č. 3 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení						
Vypočítané hodnoty R (mΩ)						
29,74	38,15	31,23	32,88	35,03	30,21	32,28
35,80	35,77	40,96	35,56	15,55	31,19	34,18

Vzorek č. 4 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení						
Vypočítané hodnoty R (mΩ)						
33,94	36,02	30,73	46,72	33,10	29,08	18,78
32,77	31,23	28,36	30,28	28,17	33,66	30,29

Vzorek č. 5 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení						
Vypočítané hodnoty R (mΩ)						
35,77	30,46	34,68	37,79	31,88	32,18	31,43
26,72	35,51	29,92	32,37	41,67	36,24	31,10

Vzorek č. 1 pro lepidlo AX 15S a měděné provedení						
Vypočítané hodnoty R (mΩ)						
29,71	36,63	37,02	29,43	58,84	33,54	33,84
38,41	30,05	32,31	31,61	31,93	35,21	30,80

Vzorek č. 2 pro lepidlo AX 15S a měděné provedení						
Vypočítané hodnoty R (mΩ)						
42,48	37,91	35,79	38,61	36,05	37,21	41,73
34,81	30,91	38,01	33,58	33,11	42,16	46,13

Vzorek č. 3 pro lepidlo AX 15S a měděné provedení						
Vypočítané hodnoty R (mΩ)						
45,55	66,99	34,94	39,72	34,20	48,40	48,52
38,20	38,23	44,25	40,39	38,75	52,63	42,89

Vzorek č. 4 pro lepidlo AX 15S a měděné provedení						
Vypočítané hodnoty R (mΩ)						
50,39	44,06	39,78	30,73	37,46	37,44	38,48
33,42	34,28	33,17	37,46	34,64	38,25	42,91

Vzorek č. 5 pro lepidlo AX 15S a měděné provedení						
Vypočítané hodnoty R (mΩ)						
112,85	36,28	31,20	35,44	33,57	32,64	30,57
29,31	26,80	29,03	33,70	42,04	27,64	35,60

Příloha 5: Měření odporu rezistoru 0R0 typu CDF-K

Měření odporu rezistoru 0R0 typu CDF - K												
Naměřená hodnota R (mΩ)	16	18	14	16	14	13	20	16	14	19	Aritmetický průměr R (mΩ)	16

Příloha 6: Naměřené hodnoty napětí a proudů získané třibodovou metodou měření

Vzorek č. 1 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení							
U (mV)	1,43	1,29	1,14	1,27	2,23	1,26	2,13
I (mA)	71,03	63,83	62,57	67,83	65,27	67,03	62,57
U (mV)	10,44	1,68	1,71	2,26	3,68	1,64	2,41
I (mA)	57,28	61,31	63,93	64,83	53,63	42,18	69,59

Vzorek č. 2 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení							
U (mV)	11,75	2,25	1,91	1,66	2,56	1,78	1,95
I (mA)	76,92	75,24	76,89	68,57	64,86	74,20	78,48
U (mV)	1,48	1,40	1,63	1,40	1,97	1,34	1,46
I (mA)	67,27	71,51	65,99	68,16	66,31	70,78	73,39

Vzorek č. 3 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení							
U (mV)	1,39	1,34	1,35	1,76	1,84	1,81	1,22
I (mA)	67,21	65,67	60,87	72,24	68,37	69,47	61,66
U (mV)	1,51	1,78	1,27	1,62	1,81	3,00	1,63
I (mA)	52,31	65,74	51,94	57,40	61,31	69,69	62,76

Vzorek č. 4 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení							
U (mV)	1,77	1,20	1,49	2,12	1,52	1,64	2,30
I (mA)	69,71	53,69	63,58	62,58	54,61	68,46	67,7
U (mV)	1,16	1,22	1,77	1,46	1,52	1,87	0,83
I (mA)	59,27	67,63	68,75	52,97	69,38	67,79	43,34

Vzorek č. 5 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení							
U (mV)	1,21	1,93	1,50	0,72	1,14	1,44	1,42
I (mA)	60,58	66,96	66,88	38,09	59,33	71,38	72,78
U (mV)	1,38	1,99	1,94	1,54	1,73	1,84	1,70
I (mA)	56,02	52,02	69,77	63,78	68,60	72,58	68,07

Vzorek č. 1 pro lepidlo SC 515 a zlaté provedení							
U (mV)	0,896	0,909	0,914	0,959	0,968	0,927	0,837
I (mA)	74,38	74,86	73,13	75,06	75,08	75,28	68,47
U (mV)	1,20	1,18	1,25	1,05	1,22	1,20	0,968
I (mA)	74,93	75,68	74,36	59,20	71,20	74,74	59,8

Vzorek č. 2 pro lepidlo SC 515 a zlaté provedení							
U (mV)	0,761	1,22	1,39	1,43	1,25	1,04	1,19
I (mA)	49,68	75,12	74,74	74,3	74,61	66,05	74,59
U (mV)	0,923	0,909	1,07	1,13	0,680	0,932	0,653
I (mA)	75,12	71,11	74,19	75,09	50,38	74,75	54,37

Vzorek č. 3 pro lepidlo SC 515 a zlaté provedení							
U (mV)	1,17	1,16	1,23	1,26	1,24	1,02	0,981
I (mA)	75,02	74,15	74,83	75,02	75,14	64,21	59,76
U (mV)	0,770	0,810	0,914	0,819	0,698	0,815	0,842
I (mA)	65,60	67,50	75,34	66,66	55,96	70,61	57,21

Vzorek č. 4 pro lepidlo SC 515 a zlaté provedení							
U (mV)	1,09	1,11	1,13	1,14	1,15	0,932	1,06
I (mA)	74,76	74,85	74,17	74,63	75,08	63,07	72,14
U (mV)	1,45	1,45	1,45	1,19	1,42	1,48	1,39
I (mA)	74,32	73,77	73,14	59,38	72,56	74,97	70,42

Vzorek č. 5 pro lepidlo SC 515 a zlaté provedení							
U (mV)	1,43	1,43	1,50	1,43	1,18	1,12	1,20
I (mA)	75,13	74,75	75,33	75,2	57,35	59,96	61,52
U (mV)	1,06	1,02	1,13	1,08	1,04	1,03	0,909
I (mA)	75,08	72,39	74,80	72,01	68,65	69,40	66,30

Vzorek č. 1 pro lepidlo AX 15S a měděné provedení							
U (mV)	1,67	1,44	1,53	1,27	1,41	1,48	1,58
I (mA)	68,9	64,93	67,58	55,31	62,16	60,98	65,54
U (mV)	1,12	1,19	0,788	1,03	1,11	1,26	1,28
I (mA)	60,74	67,62	45,67	56,66	67,64	67,82	68,51

Vzorek č. 2 pro lepidlo AX 15S a měděné provedení							
U (mV)	1,08	1,48	1,51	1,50	1,58	1,38	1,26
I (mA)	45,21	65,7	67,06	63,33	67,30	59,03	50,20
U (mV)	1,28	1,22	1,21	1,22	1,23	1,25	1,27
I (mA)	67,82	66,11	67,44	66,54	67,54	67,82	65,62

Vzorek č. 3 pro lepidlo AX 15S a měděné provedení							
U (mV)	1,57	1,49	1,58	1,55	1,58	1,36	1,12
I (mA)	66,27	65,81	68,64	66,45	67,85	57,76	45,48
U (mV)	1,22	1,20	1,22	1,20	1,24	1,22	0,882
I (mA)	67,20	66,20	66,65	63,51	67,11	65,71	46,59

Vzorek č. 4 pro lepidlo AX 15S a měděné provedení							
U (mV)	1,25	1,23	1,18	1,20	1,06	0,977	1,16
I (mA)	66,69	65,91	64,62	66,96	56,71	56,68	63,11
U (mV)	1,63	1,35	1,58	1,52	1,54	1,50	1,61
I (mA)	68,07	57,25	66,15	67,15	67,48	65,90	67,84

Vzorek č. 5 pro lepidlo AX 15S a měděné provedení							
U (mV)	1,40	1,28	1,27	1,19	1,17	1,14	1,26
I (mA)	68,51	68,15	68,19	66,62	64,41	62,16	67,28
U (mV)	1,73	1,58	1,58	1,71	1,49	1,54	1,53
I (mA)	67,71	64,14	65,45	63,50	63,44	66,98	66,91

Vzorek č. 1 pro lepidlo AX 15S a zlaté provedení							
U (mV)	1,19	1,23	1,00	1,20	1,15	0,797	0,729
I (mA)	68,76	70,43	59,29	71,83	64,23	48,64	43,32
U (mV)	0,941	0,869	0,887	0,680	0,887	0,869	X
I (mA)	71,27	67,15	71,64	56,30	70,53	70,91	X

Vzorek č. 2 pro lepidlo AX 15S a zlaté provedení							
U (mV)	0,756	0,819	0,896	0,932	0,954	0,657	0,819
I (mA)	62,00	67,69	70,74	70,32	70,78	50,40	62,73
U (mV)	1,14	1,05	1,19	1,12	0,887	1,18	1,01
I (mA)	69,82	64,79	71,02	68,87	53,35	70,88	57,62

Vzorek č. 3 pro lepidlo AX 15S a zlaté provedení							
U (mV)	0,806	0,545	0,819	0,504	0,914	0,734	0,581
I (mA)	63,78	44,98	64,33	40,90	71,67	57,20	44,21
U (mV)	1,02	0,954	0,887	1,19	0,788	1,21	1,06
I (mA)	61,15	58,10	52,30	66,90	44,00	68,70	61,05

Vzorek č. 4 pro lepidlo AX 15S a zlaté provedení							
U (mV)	1,41	1,20	0,963	1,99	0,891	0,680	1,16
I (mA)	71,56	70,34	56,88	52,46	52,48	41,22	70,23
U (mV)	0,806	0,932	0,846	0,914	0,909	0,815	0,873
I (mA)	60,59	70,95	64,85	71,02	68,65	66,17	71,38

Vzorek č. 5 pro lepidlo AX 15S a zlaté provedení							
U (mV)	1,22	0,662	1,29	1,17	0,774	1,24	0,950
I (mA)	65,91	39,45	70,43	61,80	46,09	70,22	59,57
U (mV)	0,905	0,905	1,00	0,752	0,914	0,752	0,842
I (mA)	71,41	70,15	70,52	51,42	69,58	60,61	70,09

Příloha 7: Vypočtené hodnoty odporu získané tříbodovou metodou měření

Odpor lepených spojů byl vypočítán pomocí Ohmova zákona.

Vzorek č. 1 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení							
R (mΩ)	20,08	20,23	18,20	18,71	34,13	18,80	34,09
	182,3	27,45	26,68	34,91	68,64	38,83	34,66

Vzorek č. 2 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení							
R (mΩ)	152,7	29,90	24,81	24,15	39,48	24,02	24,89
	22,01	19,51	24,75	20,60	29,72	18,88	19,87

Vzorek č. 3 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení							
R (mΩ)	20,69	20,35	22,18	24,42	26,92	26,04	19,78
	28,82	27,04	24,52	28,14	29,51	43,00	26,03

Vzorek č. 4 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení							
R (mΩ)	25,43	22,29	23,36	33,94	27,77	23,99	34,03
	19,51	17,97	25,79	27,53	21,92	27,61	19,21

Vzorek č. 5 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení							
R (mΩ)	19,91	28,76	22,41	18,78	19,27	20,17	19,54
	24,66	38,32	27,86	24,20	25,19	25,36	24,99

Vzorek č. 1 pro lepidlo SC 515 a zlaté provedení							
R (mΩ)	12,04	12,14	12,49	12,77	12,89	12,31	12,22
	15,97	15,64	16,76	17,71	17,06	16,08	16,18

Vzorek č. 2 pro lepidlo SC 515 a zlaté provedení							
R (mΩ)	15,31	16,17	18,60	19,20	16,71	15,81	15,93
	12,28	12,78	14,38	14,98	13,49	12,46	12,00

Vzorek č. 3 pro lepidlo SC 515 a zlaté provedení							
R (mΩ)	15,54	15,66	16,42	16,80	16,53	15,91	16,42
	11,73	12,00	12,13	12,29	12,46	11,54	14,71

Vzorek č. 4 pro lepidlo SC 515 a zlaté provedení							
R (mΩ)	14,57	14,79	15,29	15,26	15,34	14,77	14,66
	19,56	19,70	19,81	20,08	19,54	19,69	19,68

Vzorek č. 5 pro lepidlo SC 515 a zlaté provedení							
R (mΩ)	19,05	19,08	19,95	18,97	20,56	18,69	19,53
	14,14	14,11	15,04	14,94	15,21	14,78	13,71

Vzorek č. 1 pro lepidlo AX 15N a měděné provedení							
R (mΩ)	24,23	22,25	22,64	22,94	22,66	24,20	24,17
	18,45	17,64	17,24	18,19	16,43	18,64	18,65

Vzorek č. 2 pro lepidlo AX 15N a měděné provedení							
R (mΩ)	23,99	22,47	22,48	23,66	23,54	23,40	25,19
	18,91	18,51	17,88	18,33	18,26	18,45	19,34

Vzorek č. 3 pro lepidlo AX 15N a měděné provedení							
R (mΩ)	23,70	22,70	22,95	23,36	23,35	23,61	24,54
	18,15	18,08	18,30	18,92	18,44	18,63	18,93

Vzorek č. 4 pro lepidlo AX 15N a měděné provedení							
R (mΩ)	18,69	18,64	18,31	17,94	18,65	17,23	18,40
	24,00	23,58	23,81	22,65	22,87	22,74	23,68

Vzorek č. 5 pro lepidlo AX 15N a měděné provedení							
R (mΩ)	20,49	18,82	18,61	17,83	18,16	18,39	18,73
	25,59	24,63	24,13	26,86	23,41	22,98	22,80

Vzorek č. 1 pro lepidlo AX 15N a zlaté provedení							
R (mΩ)	17,34	17,44	16,93	16,73	17,87	16,38	16,83
	13,20	12,93	12,37	12,07	12,57	12,25	X

Vzorek č. 2 pro lepidlo AX 15N a zlaté provedení							
R (mΩ)	12,19	12,10	12,66	13,25	13,48	13,04	13,06
	16,37	16,18	16,73	16,20	16,62	16,70	17,57

Vzorek č. 3 pro lepidlo AX 15N a zlaté provedení							
R (mΩ)	12,63	12,11	12,73	12,32	12,75	12,82	13,13
	16,70	16,42	16,95	17,76	17,90	17,62	17,32

Vzorek č. 4 pro lepidlo AX 15N a zlaté provedení							
R (mΩ)	19,68	17,02	16,93	38,00	16,98	16,48	16,47
	13,29	13,13	13,05	12,86	13,24	12,31	12,23

Vzorek č. 5 pro lepidlo AX 15N a zlaté provedení							
R (mΩ)	18,50	16,77	18,34	19,00	16,79	17,69	15,94
	12,67	12,89	14,23	14,61	13,13	12,40	12,01

Příloha 8: Naměřené hodnoty nelinearity V-A charakteristiky

Červenou barvou jsou značeny hodnoty, které byly odstraněny při matematickém vyrovnání.

Vzorek č. 1 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení						
Naměřené hodnoty U (μV)						
0,285	0,198	0,152	0,212	0,320	0,215	0,023
0,042	0,022	0,149	0,153	0,019	0,023	0,166

Vzorek č. 2 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení						
Naměřené hodnoty U (μV)						
0,031	0,043	0,368	0,229	0,132	0,096	0,103
0,026	0,105	0,029	0,031	0,023	0,169	0,035

Vzorek č. 3 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení						
Naměřené hodnoty U (μV)						
0,112	0,063	0,078	0,023	0,026	0,018	0,119
0,276	0,032	0,078	0,081	0,123	0,024	0,083

Vzorek č. 4 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení						
Naměřené hodnoty U (μV)						
0,164	0,025	0,137	0,178	0,184	0,161	0,167
0,022	0,037	0,170	0,043	0,203	0,119	0,084

Vzorek č. 5 pro lepidlo SC 515 a měděné provedení						
Naměřené hodnoty U (μV)						
0,073	0,046	0,054	0,029	0,153	0,078	0,029
0,024	0,030	0,115	0,023	0,025	0,103	0,019

Vzorek č. 1 pro lepidlo AX 15S a měděné provedení						
Naměřené hodnoty U (μV)						
0,184	0,097	0,173	0,025	0,198	0,144	0,049
0,029	0,030	0,097	0,046	0,021	0,246	0,023

Vzorek č. 2 pro lepidlo AX 15S a měděné provedení						
Naměřené hodnoty U (μV)						
0,149	0,028	0,046	0,024	0,019	0,137	0,025
0,019	0,017	0,055	0,149	0,025	0,049	0,185

Vzorek č. 3 pro lepidlo AX 15S a měděné provedení						
Naměřené hodnoty U (μV)						
0,105	0,024	0,099	0,065	0,207	0,046	0,058
0,039	0,061	0,076	0,118	0,156	0,103	0,024

Vzorek č. 4 pro lepidlo AX 15S a měděné provedení						
Naměřené hodnoty U (μV)						
0,026	0,148	0,127	0,159	0,134	0,130	0,027
0,117	0,033	0,229	0,143	0,195	0,025	0,124

Vzorek č. 5 pro lepidlo AX 15S a měděné provedení						
Naměřené hodnoty U (μV)						
0,128	0,151	0,136	0,092	0,063	0,117	0,098
0,132	0,059	0,181	0,156	0,088	0,034	0,196

