

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie

Modelování klimatických změn spojů realizovaných vodivými lepidly

Modelling of climatic changes of joints formed using conductive adhesives

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Technologické systémy

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

Bc. Robert Lacina

Praha 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lacina** Jméno: **Robert** Osobní číslo: **420262**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Technologické systémy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Modelování klimatických změn spojů realizovaných vodivými lepidly

Název diplomové práce anglicky:

Modelling of climatic changes of joints formed using conductive adhesives

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s základními typy a vlastnostmi vodivých lepidel s izotropní vodivostí.
2. Připravte testovací vzorky ze zadaných typů lepidel.
3. Změřte odpor a nelinearitu VA charakteristiky adhezivních spojů.
4. Proveďte klimatické stárnutí adhezivních spojů dle pokynů vedoucího práce.
5. Vyhodnoťte změny odporu spojů a jejich nelinearity v důsledku stárnutí.
6. Výsledky zpracujte pomocí faktorových experimentů typu 2ⁿ.
7. Ověřte přesnost získaných modelů.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Yi Li, Daniel Wu, C. P. Wong: ?Electrical Conductive Adhesives with Nanotechnologies?. Springer Science + Business Media. N.Y. 2010, pp. 166-176
[2] M. J. Yim, K W. Paik, ?Review of Electrically Conductive Adhesive Technologies for Electronic Packaging,? Electronic Material Letters, Vol. 2, No. 3., 2006, pp. 183-194
[3] K. D. Kim, D. D. L. Chung, ?Effect of Heating on Electrical Resistivity of Conductive Adhesive and Soldered Joint,? Journal of Electronic Materials, Vol 31, No. 9, 2002, pp. 933-939

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **24.01.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Pavlu Machovi, CSc. za odborné vedení při zpracování mé diplomové práce. Dále bych rád poděkoval paní Ing. Ivaně Beshajové Pelikánové, Ph.D. za pomoc při realizaci. Také bych rád poděkoval svému blízkému okolí za podporu při tvorbě.

Abstrakt

Práce se zabývá problematikou vlastností elektricky vodivých lepidel při klimatickém namáhání. Teoretická část popisuje typy, složení a praktické využití elektricky vodivých lepidel. V další části je uvedena metodika pro měření a testování základních elektrických parametrů, odporu a nelinearity VA charakteristiky. Hodnoty těchto parametrů jsou studovány v závislosti na druhu klimatického stárnutí a typu úpravy připojovacích plošek. Experimentální část popisuje tvorbu zkušebních vzorků, stárnutí vzorků v různých typech klimatických podmínek a následné měření elektrických vlastností vzorků. Na základě naměřených hodnot jsou vypočteny matematické modely pro odpor a nelinearitu VA charakteristiky adhezních spojů vytvořených ze čtyř typů adheziv na dvou různých typech povrchů a stárnutí za různých klimatických podmínek pomocí faktorových experimentů 2³. Bylo zjištěno, že největší změny elektrických parametrů spojů způsobuje klimatické namáhání 80 °C/ 80% RH.

Klíčová slova

elektricky vodivá lepidla, klimatické stárnutí, odpor adhezních spojů, nelinearita VA charakteristiky adhezních spojů, faktorové experimenty

Abstract

The Thesis deals with properties of conductive adhesive joints under climatic stress. Theoretical section of the thesis describes types, composition and practical using of conductive adhesives. In the next section is presented the methodology for measuring the basic electrical parameters of adhesive joints, the resistance and nonlinearity of the VA characteristic. Values of these parameters are studied in dependence on the type of climatic loading and on the type of surface finish of pads. Experimental section describes formation of test samples, ageing samples in different types of climatic conditions and subsequently measurement of electrical properties of the samples. On the basis of the measured values mathematical models for the resistance and nonlinearity of adhesive joints formed from 4 types of adhesives on the 2 different types of surfaces and aged for different climatic conditions are calculated using factorial experiments 2³. It was found that the highest changes of the electrical parameters of the joints are caused by climatic load 80 °C/80 % RH.

Key words

Conductive adhesives, climatic ageing, resistance of adhesive joints, nonlinearity of VA characteristic of adhesive joints, factorial experiments.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	8
Seznam tabulek	9
Seznam obrázků	11
Úvod.....	13
Cíle práce	14
1. Teoretická část	15
1.1. Složení vodivých lepidel	15
1.1.1. Vazební složka	15
1.1.2. Vodivá složka.....	16
1.2. Druhy lepidel.....	17
1.2.1. Perkolační teorie.....	17
1.2.2. Izotropně vodivá lepidla.....	18
1.2.3. Anizotropně vodivá lepidla	18
1.3. Vlastnosti lepidel.....	19
1.3.1. Elektrické vlastnosti.....	19
1.3.1.1. Elektrický odpor.....	19
1.3.1.2. Nelinearita VA charakteristiky.....	20
1.4. Metody zkoušení	21
1.4.1. Klimatické stárnutí.....	21
1.4.2. Mechanické namáhání.....	22
1.5. Faktorové experimenty.....	23
1.5.1. Faktorový experiment 2^3	24
1.5.2. Výpočet odhadu vlivu faktorů a jejich interakce.....	25
1.5.3. Určení statistické významnosti faktorů a jejich interakcí	25
1.5.4. Konstrukce matematického modelu na základě faktorových experimentů	27
2. Experimentální část.....	31
2.1. Příprava experimentu	31

2.1.1.	Výroba DPS	31
2.1.2.	Nulové rezistory	32
2.1.3.	Použitá lepidla	32
2.1.3.1.	Loctite 3888	32
2.1.3.2.	Permacol 2369/2.....	33
2.1.3.3.	ELPOX AX 15S	33
2.1.3.4.	ELPOX SC 70MN.....	33
2.1.4.	Osazení DPS.....	34
2.2.	Měření elektrických veličin.....	34
2.2.1.	Čtyřvodičová metoda	34
2.2.2.	Použité přístroje	35
2.3.	Průběh klimatického stárnutí.....	36
2.4.	Naměřené hodnoty	36
2.4.1.	Naměřené hodnoty odporů spojů	37
2.4.2.	Naměřené hodnoty nelinearity	46
2.5.	Matematický model na základě naměřených hodnot	54
2.5.1.	Stanovení modelů.....	59
2.5.2.	Ověření přesnosti modelů	63
2.6.	Diskuse výsledků	65
3.	Závěr	67
	Seznam použité literatury.....	69
	Seznam příloh	70

Seznam použitých značek a symbolů

N – celkový počet experimentů

r – počet opakování experimentů

d – počet sloupců

$R_{1,\dots,8}$ – sloupcový součet

$Z_{A,\dots,ABC}$ – odhad vlivu faktorů a jejich interakcí

m – odhad střední hodnoty

S_0 – součet čtverců odchylek mezi naměřenými daty a celkovou střední hodnotou

S_r – reziduální součet čtverců odchylek

$S_{A,\dots,ABC}$ – složky součtu čtverců odchylek charakterizující vliv úrovní technologické faktory a jejich interakce

$F_{A,\dots,ABC}$ – testové charakteristiky F pro technologické faktory a jejich interakce

ν – počet stupňů volnosti

F_α – kritická hodnota F rozdělení

α – hladina významnosti

$X_{1,\dots,3}$ – teoretická transformovaná bezrozměrná veličina faktoru

Y – teoretická hodnota sledovaného parametru jakosti

β_i – teoretické koeficienty matematického modelu

b_i – nejlepší odhady teoretického koeficientu β_i

S – celkový součet čtverců odchylek

$x_{1,\dots,3}$ – nejlepší odhad $X_{1,\dots,3}$

\bar{y}_i – aritmetický průměr i -tého sloupce schématu experimentu

S_s – součet čtverců odchylek naměřených hodnot a modelu

\bar{F} – testová charakteristika modelu

A, B, C – technologické faktory

Seznam tabulek

Tab. 1: Parametry klimatického namáhání.....	36
Tab. 2: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky odporů pro ELPOX AX 15S 168 hodin	37
Tab. 3: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky odporů pro ELPOX AX 15S 400 hodin	37
Tab. 4: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky odporů pro ELPOX SC 70MN 168 hodin.....	38
Tab. 5: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky odporů pro ELPOX SC 70MN 400 hodin.....	38
Tab. 6: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky odporů pro Loctite 3888 168 hodin.....	39
Tab. 7: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky odporů pro Loctite 3888 400 hodin.....	39
Tab. 8: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky odporů pro Permacol 2369/2 168 hodin.....	40
Tab. 9: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky odporů pro Permacol 2369/2 400 hodin.....	40
Tab. 10: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky nelinearity VA charakteristiky pro ELPOX AX 15S 168 hodin.....	46
Tab. 11: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky nelinearity VA charakteristiky pro ELPOX AX 15S 400 hodin.....	46
Tab. 12: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky nelinearity VA charakteristiky pro ELPOX SC 70MN 168 hodin.....	47
Tab. 13: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky nelinearity VA charakteristiky pro ELPOX SC 70MN 400 hodin.....	47
Tab. 14: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky nelinearity VA charakteristiky pro Loctite 3888 168 hodin	48
Tab. 15: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky nelinearity VA charakteristiky pro Loctite 3888 400 hodin	48

Tab. 16: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky nelinearity VA charakteristiky pro Permacol 2369/2 168 hodin	49
Tab. 17: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky nelinearity VA charakteristiky pro Permacol 2369/2 400 hodin.....	49
Tab. 18: Soupis faktorů a jejich mezních hodnot.....	54
Tab. 19: Plán faktorových experimentů 2^3	55
Tab. 20: Vypočtené hodnoty odhadů vlivů a složek součtů čtverců odchylek	56
Tab. 21: Tabulka rozdílů naměřených hodnot od průměrné hodnoty sloupce.....	56
Tab. 22: Porovnání testové charakteristiky F.....	57
Tab. 23: Vypočtené koeficienty	57
Tab. 24: Výstupy modelu pro jednotlivé kombinace	58
Tab. 25: Rozdíly naměřených hodnot od modelu	58
Tab. 26: porovnání teoretických a naměřených hodnot a jejich relativní odchylka.....	64

Seznam obrázků

Obr. 1: a) Stříbrné nanovlákná b) Stříbrné šupinky	16
Obr. 2: Pozlacené Cu částice.....	16
Obr. 3: Uhlíkové nanotrubičky	17
Obr. 4: Perkolační křivka	18
Obr. 5: Struktura izotropně vodivého lepidla.....	18
Obr. 6: Struktura anizotropně vodivého lepidla	19
Obr. 7: Složky odporu vodivých lepidel	20
Obr. 8: Lineární a nelineární VA charakteristika odporu.....	20
Obr. 9: Struktura výrobního procesu.....	23
Obr. 10: Plán faktorových experimentů 2^2	24
Obr. 11: Plán faktorových experimentů 2^3	24
Obr. 12: Deska plošného spoje.....	31
Obr. 13: Loctite 3888.....	32
Obr. 14: Permacol 2369/2	33
Obr. 15: EXLPOX AX 15S.....	33
Obr. 16: a) Ruční manipulátor b) Zařízení na sítotisk.....	34
Obr. 17: Osazená DPS a) pozlacené plošky b) měděné plošky.....	34
Obr. 18: Schéma zapojení čtyřvodičové metody	35
Obr. 19: Agilent 4263B.....	35
Obr. 20: CLT (Component linearity test) type 01	35
Obr. 21: Porovnání mediánů odporů ELPOX AX 15S 168 hodin	41
Obr. 22: Porovnání mediánů odporů ELPOX AX 15S 400 hodin	42
Obr. 23: Porovnání mediánů odporů ELPOX SC 70MN 168 hodin.....	42
Obr. 24: Porovnání mediánů odporů ELPOX SC 70MN 400 hodin.....	43
Obr. 25: Porovnání mediánů odporů Loctite 3888 168 hodin.....	44
Obr. 26: Porovnání mediánů odporů Loctite 3888 400 hodin.....	44

Obr. 27: Porovnání mediánů odporů Permacol 2369/2 168 hodin.....	45
Obr. 28: Porovnání mediánů odporů Permacol 2369/2 400 hodin.....	45
Obr. 29: Porovnání mediánů nelinearity VA charakteristiky ELPOX AX 15S 168 hodin.....	50
Obr. 30: Porovnání mediánů nelinearity VA charakteristiky ELPOX AX 15S 400 hodin.....	51
Obr. 31: Porovnání mediánů nelinearity VA charakteristiky ELPOX SC 70MN 168 hodin.....	51
Obr. 32: Porovnání mediánů nelinearity VA charakteristiky ELPOX SC 70MN 400 hodin.....	52
Obr. 33: Porovnání mediánů nelinearity VA charakteristiky Loctite 3888 168 hodin	52
Obr. 34: Porovnání mediánů nelinearity VA charakteristiky Loctite 3888 400 hodin	53
Obr. 35: Porovnání mediánů nelinearity VA charakteristiky Permacol 2369/2 168 hodin.....	53
Obr. 36: Porovnání mediánů nelinearity VA charakteristiky Permacol 2369/2 168 hodin.....	54
Obr. 37: Porovnání průměrů odporů ELPOX AX 15S 168 hodin	123
Obr. 38: Porovnání průměrů odporů ELPOX AX 15S 400 hodin	123
Obr. 39: Porovnání průměrů odporů ELPOX SC 70MN 168 hodin.....	124
Obr. 40: Porovnání průměrů odporů ELPOX SC 70MN 400 hodin.....	124
Obr. 41: Porovnání průměrů odporů Loctite 3888 168 hodin.....	125
Obr. 42: Porovnání průměrů odporů Loctite 3888 400 hodin.....	125
Obr. 43: Porovnání průměrů odporů Permacol 2369/2 168 hodin.....	126
Obr. 44: Porovnání průměrů odporů Permacol 2369/2 400 hodin.....	126
Obr. 45: Porovnání průměrů nelinearity VA charakteristiky ELPOX AX 15S 168 hodin	127
Obr. 46: Porovnání průměrů nelinearity VA charakteristiky ELPOX AX 15S 400 hodin	127
Obr. 47: Porovnání průměrů nelinearity VA charakteristiky ELPOX SC 70MN 168 hodin....	128
Obr. 48: Porovnání průměrů nelinearity VA charakteristiky ELPOX SC 70MN 400 hodin....	128
Obr. 49: Porovnání průměrů nelinearity VA charakteristiky Loctite 3888 168 hodin.....	129
Obr. 50: Porovnání průměrů nelinearity VA charakteristiky Loctite 3888 400 hodin.....	129
Obr. 51: Porovnání průměrů nelinearity VA charakteristiky Permacol 2369/2 168 hodin.....	130
Obr. 52: Porovnání průměrů nelinearity VA charakteristiky Permacol 2369/2 400 hodin.....	130

Úvod

V souvislosti s požadavky směrnice RoHS jsou omezovány vyjmenované nebezpečné látky používané při výrobě elektrických a elektronických zařízení (EEZ). A to přináší zvýšenou potřebu používání substitučních materiálů při vytváření elektricky vodivých spojů. Mezi tyto materiály patří bezolovnaté pájky a elektricky vodivá lepidla. Protože vodivý spoj je místem, kde dochází k největším ztrátám v elektrického obvodu, jsou na tato místa kladeny velké nároky. Zlepšení vlastností elektrických spojů je vývojovým cílem většiny výrobců EEZ. A proto jsou spoje testovány pomocí zátěžových testů klimatických a mechanických.

Klasické pájky byly nahrazeny bezolovnatými pájkami. Ve specifických případech mohou být použita elektricky vodivá lepidla například u součástek citlivých na teplo nebo při potřebě kontaktování čipu na sklo nebo folii. Díky vyšší ceně a horším elektrickým vlastnostem je při použití elektricky vodivých lepidel potřeba věnovat pozornost jejich chování v závislosti na okolních podmínkách. Znalost chování různých typů elektricky vodivých lepidel může pomoci dosáhnout finančních i materiálových úspor. Tyto znalosti mohou být využity při výrobě spojů určených pro extrémní klimatické podmínky.

Cíle práce

1. Seznámit se obecně s elektricky vodivými lepidly a jejich vlastnostmi, druhy klimatického namáhání a principem faktorových experimentů.
2. Připravit si vhodné desky plošných spojů pro adhezní montáž odporů s nulovou hodnotou pomocí vodivých lepidel Loctite 3888, Permacol 2369/2, ELPOX AX 15S a ELPOX SC 70MN. Desky musí umožnit čtyřvodičové měření odporů a nelinearity VA charakteristiky adhezních spojů.
3. Provést adhezní montáž nulových odporů a tím vytvořit adhezní spoje pro testování.
4. Změřit odpor a nelinearitu VA charakteristiky adhezních spojů.
5. Provést klimatické stárnutí adhezních spojů ve čtyřech typech klimatického namáhání.
6. Změřit odpor a nelinearitu VA charakteristiky po klimatickém namáhání.
7. Vytvořit matematický model pro výpočet odporů a nelinearity VA charakteristiky v závislosti na klimatickém stárnutí.
8. Ověřit přesnost získaných matematických modelů a zhodnotit výsledky.

1. Teoretická část

K realizování elektricky vodivých spojů se v dnešní době, po zavedení směrnice RoHS, nejčastěji používají bezolovnaté pájky. U aplikací, kde se bezolovnaté pájky nedají použít, se používají elektricky vodivá lepidla. Tyto aplikace jsou například aplikace, kde by přivedené teplo potřebné pro správné spojení pomocí bezolovnaté pájky mohlo poškodit kontaktovanou součástku nebo při kontaktování součástek s malou roztečí kontaktu. Elektricky vodivá lepidla se dále používají například u technologií COG (Chip on Glass) nebo COF (Chip on Foil). Tyto technologie se velmi často používají pro kontaktování LCD displejů. Další vhodné aplikace elektricky vodivých lepidel jsou při kontaktování tepelných folií, při montáži některých integrovaných obvodů nebo také při rychlé opravě vodivých spojů.

Elektricky vodivá lepidla mají oproti bezolovnatým pájkám řadu nevýhod. Mezi nejvýznamnější patří jejich elektrická vodivost, která je až o tři řády nižší. Dalšími nevýhodami je vysoká cena lepidel, horší mechanické a elektrické vlastnosti. Obecně lze říct, že vlastnosti lepených spojů jsou horší než vlastnosti pájených spojů.

1.1. Složení vodivých lepidel

Elektricky vodivá lepidla jsou kompozitním materiálem a obecně se skládají ze dvou složek: vazební (binder) a vodivé (filler) složky.

1.1.1. Vazební složka

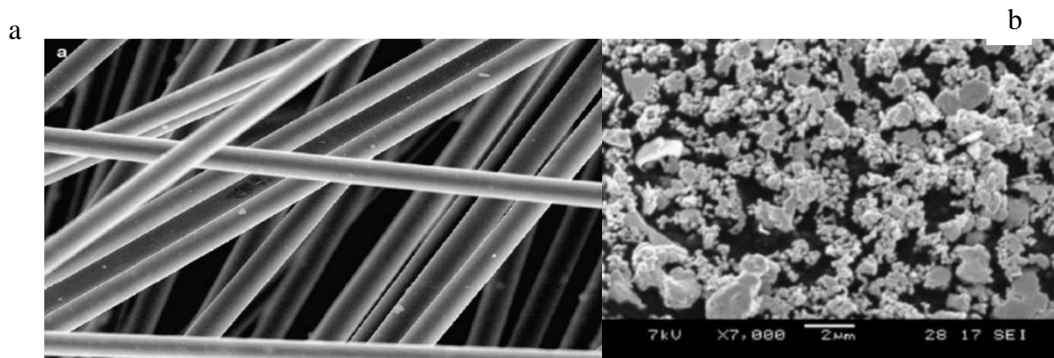
Vazební složka neboli pojivo tvoří základ každého lepidla a tvoří asi 80 % objemu lepidla. Její funkce je vytvářet izolační matici, ve které jsou umístěny vodivé částice. Dále zajišťuje mechanické vlastnosti lepidla jako je pevnost, houževnatost, adheze. Po vytvrzení má udržet vodivé částice na stále stejném místě a zamezit tím jejich pohybu, který by negativně ovlivnil vlastnosti spoje. Vazební složky lze rozdělit do dvou skupin na jednosložkovou a dvousložkovou. Jednosložková lepidla se vytvrzují obvykle v rozmezí teplot 100°C–150°C. Dvousložková lepidla obsahují navíc tvrdidlo a lze je vytvrdit i při pokojové teplotě.

Většinou se používají reaktoplastické pryskyřice. Nejčastěji se používá epoxidové pryskyřice. Výhoda těchto pryskyřic je v jejich tvrdosti, tepelné odolnosti a adhezi. Nevýhoda je v jejich křehkosti a malé odolnosti vůči navlhání, to způsobuje zvyšování rezistivity a celkově zhoršení mechanických vlastností. Křehkost se dá snížit pomocí zvolením vhodného plniva. Mezi další nevýhody patří nemožnost opětovného rozpuštění vazební složky například zahřátím. Můžeme se setkat také s vazební složkou tvořenou silikonovou, akrylátovou a polyimidovou pryskyřicí.

Dále se lze setkat také s lepidly používajícími jako pojivo termoplasty. Termoplasty mají výhodu, že je lze dodáním tepelné energie opět rozpustit za účelem provedení oprav. Hlavní nevýhodou je jejich základní charakteristika, kdy při dodání tepelné energie ztrácí mechanickou pevnost, což může vést k nespolehlivosti systému. Další nevýhodou termoplastů je degradace adheze při vyšších teplotách a přítomnost rozpouštědel, které se při zahřátí vypařují a vznikají tak dutinky.

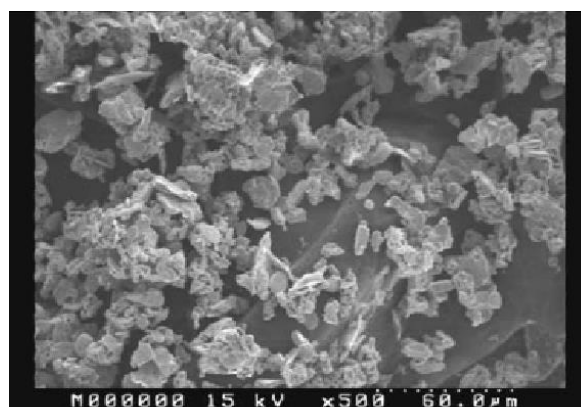
1.1.2. Vodivá složka

Vodivá složka neboli plnivo zajišťuje elektrické vlastnosti spoje především vodivost. Její funkce spočívá ve vytvoření vodivých cest ve vazební složce. Je tvořena vodivými částicemi, které jsou ze stříbra, zlata, niklu, palladia nebo grafitu. Dále se používají například postříbené polymerové a měděné částice. Pro použití v lepidlech se nejčastěji používá stříbro. Výhody stříbra je jeho velká elektrická a tepelná vodivost. Další výhodou je jeho snadné zpracování do požadovaných tvarů a velikostí. Hlavní nevýhodou je, že při vhodných podmínkách za přítomnosti vlhkosti může docházet k migraci iontů stříbra a následnému vzniku můstků. Tento jev může vést až ke zkratu.



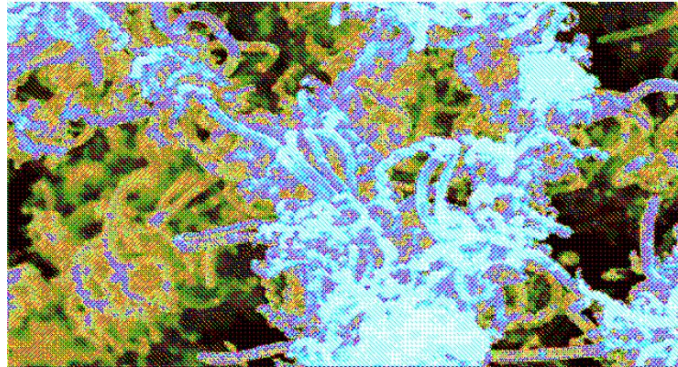
Obr. 1: a) Stříbrné nanovlákna b) Stříbrné šupinky

Dále se používá měď, která má dobré elektrické a tepelné vlastnosti, avšak ve vlhkém a horkém prostředí je náchylná k oxidaci. Pokud se na měděné částice nanese tenká vrstva stříbra nebo zlata zlepší se její vlastnosti, ale nikdy nebudou dosahovat vlastností samotného stříbra.



Obr. 2: Pozlacené Cu částice

Další vhodnou alternativou je nikl. Oproti mědi má lepší chemické a tepelné vlastnosti a není tolik náchylný k oxidaci. Ve srovnání se stříbrem je podstatně levnější ale jeho vodivostní vlastnosti jsou asi o čtvrtinu horší. Vyrábí se pomocí například chemické metody redukce solí kovů nebo oxidů redukčním činidlem. Výsledný tvar částic jsou jehličky, tento tvar má nevýhodu, že mají malou kontaktní plochu. Zlepšení se dá dosáhnout pomocí žíhání.



Obr. 3: Uhlíkové nanotrubičky

Grafit je další vhodnou alternativou. Tento materiál má nižší vodivost, která bývá zvyšována nanosením stříbrné vrstvy stejně jako u mědi. Nejčastější tvar jsou kuličky, ale můžeme se setkat i s uhlíkovými nanovláknky nebo nanotrubicemi.

Díky technologii pokovení se můžeme setkat i s použitím nevodivých materiálů jakými jsou čedičová nebo bazaltová vlákna z pravidla pokovená stříbrem.

1.2. Druhy lepidel

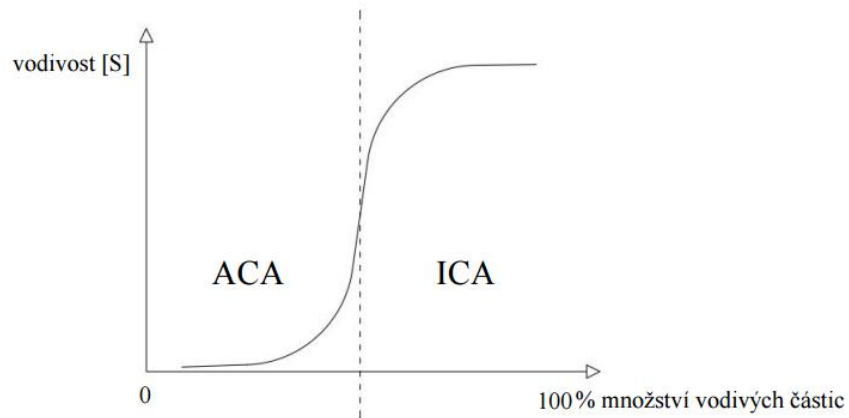
Podle typu vodivosti můžeme elektricky vodivá lepidla rozdělit na dva typy a to na izotropní (ICA – Isotropic Conductive Adhesives) a anizotropní (ACA – Anisotropic Conductive Adhesives). Tyto lepidla mají rozdílné vlastnosti, které jsou způsobeny tzv. perkolační teorií.

1.2.1. Perkolační teorie

Za normálních okolností je většina polymerů nevodivá. Pokud začneme polymer plnit elektricky vodivými částicemi, materiál se za začátku bude chovat jako bychom do něj nic nepřidávali a stále se bude chovat jako izolant. Ovšem pokud překročíme určitou koncentraci vodivých částic v objemu polymeru, začne vodivost prudce stoupat. Tato koncentrace se nazývá perkolační práh a znamená to, že se vytvoří řetězec, ve kterém jsou vodivé částice v přímém kontaktu a vytvoří vodivou cestu přes celý objem materiálu. Po překonání perkolačního prahu dochází pouze k mírnému nárůstu vodivosti a další zvyšování koncentrace vodivých částic nemá smysl.

Závislost elektrické vodivosti, popřípadě odporu na koncentraci plniva v matici nazýváme perkolační křivkou. Tato křivka udává zásadní informaci o vodivosti kompozitního materiálu. U

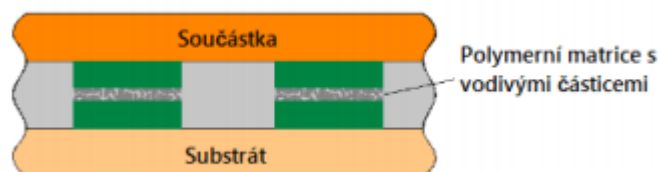
většiny materiálů má perkolační křivka esovitý tvar. Perkolační mez se nachází v inflexním bodě této křivky a můžeme zde odečíst kritickou koncentraci.



Obr. 4: Perkolační křivka

1.2.2. Izotropně vodivá lepidla

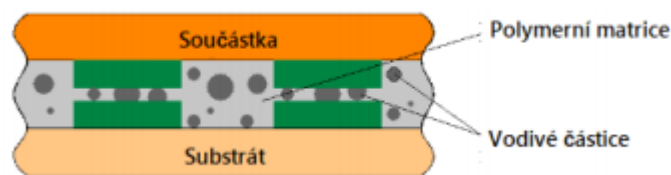
U izotropně vodivých lepidel (ICA - Isotropic Conductive Adhesives) se jako tvar plniva z pravidla používají šupinky o rozměrech do 15 μm a tvoří 60% až 80% hmotnosti lepidla. Takto vysoká koncentrace způsobuje, že se vodivé částice dotýkají a vytváří tak vodivou síť. To má za následek, že ICA jsou vodivé nezávisle na směru, tzn. vodivost ve všech směrech je stejná. Izotropně vodivá lepidla se využívají pro adhezní montáž elektronických součástek nejčastěji. Pro montáž integrovaných obvodů s malou roztečí vývodů je nutné použít anizotropních vodivých lepidel, aby nevznikaly zkratové můstky mezi sousedními vývody.



Obr. 5: Struktura izotropně vodivého lepidla

1.2.3. Anizotropně vodivá lepidla

Anizotropně vodivá lepidla (ACA – Anisotropic Conductive Adhesives) mají oproti ICA podstatně menší koncentraci vodivých částic 5 % až 20 % hmotnosti lepidla. Tato koncentrace je nedostatečná pro vytvoření souvislé vodivé cesty jako u ICA. Principem vodivosti v jednom směru je skutečnost, že vodivá částice se při montáži elektronické součástky sevře mezi vývod součástky (kontakt na součástce) a připojovací ploškou. Často mají ACA podobu folie místo pastovité formy. Při osazování DPS se na ni tato folie položí a za zvýšeného tlaku a teploty se osadí integrovaný obvod. Nejčastější tvar plniva jsou kuličky o rozměrech několika μm .



Obr. 6: Struktura anizotropně vodivého lepidla

1.3. Vlastnosti lepidel

1.3.1. Elektrické vlastnosti

U elektricky vodivých lepidel jsou nejdůležitější dvě elektrické vlastnosti, a to elektrický odpor a nelinearita voltampérové charakteristiky.

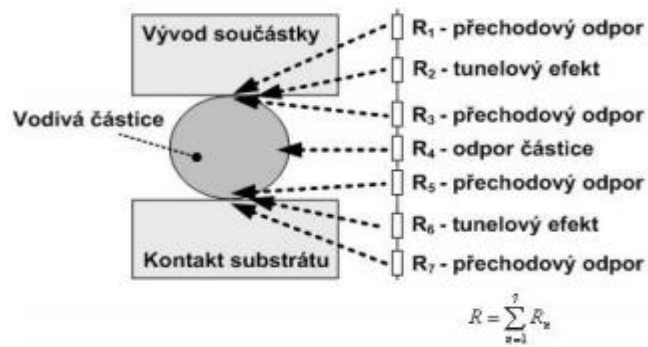
1.3.1.1. Elektrický odpor

Elektrický odpor u elektricky vodivých lepidel se skládá ze tří různých odporů a to: odpor vodivé částice, kontaktní odpor mezi vodivými částicemi a kontaktní odpor mezi kontaktovanou plochou a vodivými částicemi.

Celkový elektrický odpor adhezního spoje ovlivňuje odpor vodivé částice minimálně. Je to z důvodu, že jako materiál vodivého plniva (filler) se nejčastěji používají kovy s vysokou elektrickou vodivostí. Tento odpor je ovlivněn vším, co je obsaženo v lepidle, ale nejvíce materiálem vodivých částic. Jednou z možností zvýšení vodivosti adhezního spoje je doplnění lepidel vodivými nanočásticemi vhodného tvaru. Tyto nanočástice vytvoří můstky mezi mikročásticemi a tím se zvětší hustota vodivé sítě a klesne elektrický odpor. Výslednou hodnotu povrchu ovlivňuje také to, je-li povrch částic hladký nebo drsný.

Dominantní složkou celkového elektrického odporu je odpor mezi vodivými částicemi. Tento odpor je složen z tunelového a úžinového odporu. Tunelový jev způsobuje, že elektrony mohou díky svým vlnovým vlastnostem překonat potenciálovou bariéru. Tuto bariéru způsobují například nečistoty, izolační oxidy, vzduchová mezera. Důsledkem tohoto jevu je tunelový odpor. Úžinový odpor vzniká zejména v případě lepidel s anizotropní vodivostí.

Poslední složkou ovlivňující elektrický odpor vodivých lepidel je odpor na rozhraní mezi kontaktovanou plochou a lepidlem, ale jen v případě, kdy mají materiály, které se vzájemně stýkají, rozdílnou výstupní práci. Na tomto rozhraní dochází ke kontaktu dvou kovů s rozdílným elektrochemickým potenciálem a pokud se mezi kontaktovanou plochu a lepidlo dostane malé množství vlhkosti vznikne galvanický článek, který způsobí elektrochemickou korozi. Důsledkem této koroze je vznik oxidační vrstvy, která zvětšuje celkový elektrický odpor.

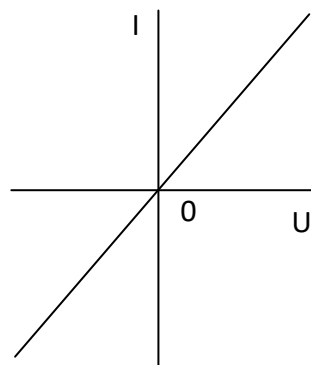


Obr. 7: Složky odporu vodivých lepidel

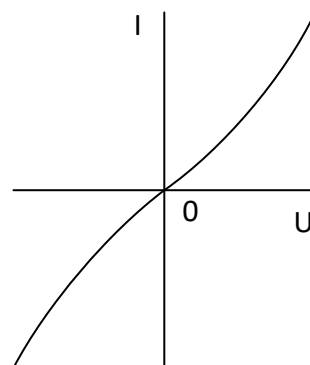
1.3.1.2. Nelinearita VA charakteristiky

Optimální VA charakteristika lineárních součástek je přímka a je důležitá pro vyhodnocení kvality spoje. Měřením nelinearity VA charakteristiky můžeme odhalit nedokonalosti a různé vady struktury, které měřením elektrického odporu nezjistíme. Mezi tyto vady patří například změny vodivostních mechanismů. Vzniklá nelinearita může mít negativní vliv na životnost spoje.

Lineární odporová součástka



Nelineární odporová součástka



Obr. 8: Lineární a nelineární VA charakteristika odporu

1.4. Metody zkoušení

V elektricky vodivém lepidle může docházet k degradačním mechanismům už od výroby lepidla, při uskladnění, nanášení, vytvrzení a jeho fungování v elektrickém zařízení. Degradací mechanismy snižují životnost a zhoršují vlastnosti lepidla. Pro určení těchto mechanismů a následnou optimalizaci vznikly metody pro měření a testování vnějších vlivů na kvality lepeného spoje. Tyto metody se rozdělují podle poškození, podle metody testování a podle délky trvání.

Rozdělení metod dle poškození vzorku se dělí na destruktivní a nedestruktivní. U destruktivní metody dojde po překročení určité hranice k nevratnému poškození vzorku. U lepených spojů se používá například namáhání vibracemi, v tahu a ve střihu. U nedestruktivní metody je vzorek namáhán pevnou hodnotou určité veličiny. Tato hodnota je nastavena tak aby nedošlo k poškození vzorku.

Rozdělení dle metod testování se dělí na mechanické, teplotní, vlhkostní a kombinace teplotní a vlhkostní.

Rozdělení metod dle délky trvání se dělí na dlouhodobé, středně dlouhé a krátkodobé. Dlouhodobé testování probíhá v řádu několika let a většinou se používají nedestruktivní metody například klimatické stárnutí při pokojové teplotě. Středně dlouhé testování probíhá v řádu týdnů až několika měsíců. Například zkoušky teplotním namáháním, teplotním šokem a vibracemi se nejčastěji provádí při středně dlouhém trvání. Krátkodobé testování probíhá v řádu minut, hodin maximálně dnů. Do této kategorie patří hlavně destruktivní metody například zkoušky odtržením, v tahu a ohýbáním.

V reálném provozu nedochází pouze k jednomu druhu namáhání. Na zařízení působí více negativních vlivů najednou, proto se většina metod testování kombinuje podle požadavků reálné aplikace zkoušeného vzorku.

1.4.1. Klimatické stárnutí

Do kategorie klimatického namáhání patří namáhání teplotní, vlhkostní a jejich kombinace. Jeden z hlavních faktorů ovlivňující degradační procesy je teplota vzduchu. Při chodu zařízení vznikají změny teploty kvůli proudění vzduchu v zařízení, dopadajícímu světlu a zahříváním od součástí. Změny teploty vyvolávají v materiálech změny rozměrů. Rozdílná teplotní rozpínavost materiálu například desky plošného spoje a součástky může mít za následek vznik trhlin a prasklin v lepidle. To má za následek snížení vodivosti a zvětšení přechodového odporu a může dojít až k odpadnutí součástky. Pro testování teplotního namáhání se používají různé metody.

Při vyšší teplotě probíhá většina degračních faktorů rychleji, proto namáhání zvýšeným teplem je jednou z nejčastějších metod zkoušení v elektrotechnice. Při namáhání zvýšenou teplotou dochází k namáhání vzorku konstantní teplotou po stanovenou dobu.

Při zkoušce teplotním cyklováním dochází k pozvolnému přechodu z jedné extrémní hodnoty do druhé například $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Změna teploty probíhá velmi pomalu až stovek minut.

Zkouška teplotní, šokem probíhá obdobně jako zkouška teplotním cyklováním, ale časový interval změny teploty je daleko kratší. Nastavení tohoto cyklu může být například takové, že přechod z jedné extrémní teploty na druhou trvá 1 minutu. V extrému se teplota na 14 minut ustálí a jeden cyklus tedy trvá 30 minut. Pro lepené spoje je tato metoda velice agresivní.

Další významnějším teplotním namáháním je namáhání mrazem. Snížená teplota má kladné účinky na vodivé lepidlo, protože zpomaluje degrační procesy. Vlivem snížené teploty pryskyřice ztuhne a ztrácí svoji pružnost. Negativní účinky mrazu se projevují při manipulaci se zařízením, kdy začne docházet k otřesům a chvění. To má za následek popraskání spoje a následné odpadnutí součástky.

Druhým faktorem ovlivňující degrační procesy je vlhkost vzduchu. Vlhkost způsobuje na vodivých částicích zvýšenou oxidaci. Vazební složka lepidla má za úkol krýt vodivé částice. U nejčastěji používaných epoxidových pryskyřic dochází k navlhání a následné korozi vodivých částic. Namáhání vlhkem probíhá stejně jako u namáhání zvýšenou teplotou. Vzorek je vystaven konstantní vlhkosti po určenou dobu.

Další metodou testování je kombinace tepelného a vlhkostního namáhání, kdy je vzorek vystaven například vyšší teplotě a vlhkosti než je pokojová.

1.4.2. Mechanické namáhání

Pomocí mechanických zkoušek se zjišťují jeho mechanické vlastnosti tzn. zjišťujeme chování materiálu za působení vnějších sil. Zjišťují se dvě vlastnosti, a to odpor materiálu proti deformaci a jeho deformační schopnost. Zkoušky mechanickým namáháním se dělí dle působení síly a dle teploty.

Při dělení zkoušek dle působení síly rozlišujeme statické a dynamické zkoušky.

U zkoušek statických se vzorek namáhá pomalu narůstající silou na předem definovanou hodnotu. Do této kategorie patří například zkouška tahem, stříhem a ohybem. U zkoušky tahem je lepidlo aplikováno mezi dvě destičky. Destičky jsou konstantní rychlostí taženy od sebe, dokud se spoj nerozlepí. Při adhezivním rozlepení je lepidlo pouze na jedné destičce. Při kohezním rozlepení zůstane lepidlo na obou destičkách. Další možností, jak testovat vzorek zkouškou tahem je, že se na vzorek působí silou s definovaným gradientem nárůstu za čas. Při zkoušce pevnosti

ve stříhu se na vzorek působí hrotem, který působí pouze na testovanou součástku a musí svírat se součástkou úhel 90°.

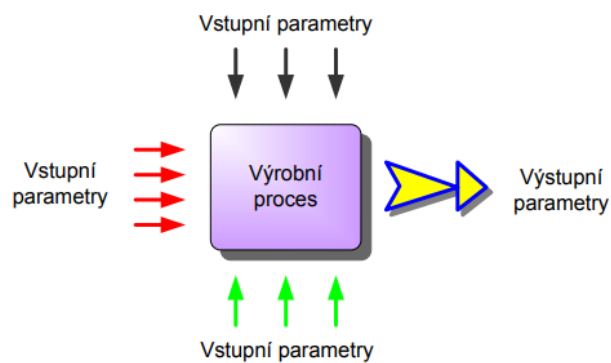
Během dynamické zkoušky se na vzorek působí nárazově po zlomek sekundy. Do dynamických zkoušek patří také zkoušky únavové.

Mezi únavové zkoušky patří zkoušky pulzující, kde síla narůstá a klesá v intervalech bez změny smyslu působení. Dále mívivé, kde síla mění svůj smysl při opakovaném namáhání. Poslední jsou zkoušky střídavé, kde síla nemění svůj smysl a opakovaně klesá a vzrůstá z určité hodnoty na vyšší hodnotu.

1.5. Faktorové experimenty

Faktorové experimenty jsou jednou z mnoha metod statistického zpracování experimentálních dat. Používají se k vytvoření matematického modelu procesu. Tento model může být statický nebo dynamický. U statistického modelu jsou uvažované proměnné konstantní v čase. V modelu se nevyskytují derivace veličin podle času. U dynamického modelu uvažované veličiny nejdou konstantní v čase a v modelu se tedy vyskytují derivace veličin podle času.

Pomocí faktorových experimentů získáme statický model procesu sloužící k nalezení optimálních podmínek zkoumaného procesu. Vytváří se model výstupního parametru v závislosti na vstupních parametrech.



Obr. 9: Struktura výrobního procesu

Technologické faktory dělíme na kvalitativní a kvantitativní. Kvalitativní faktory jsou takové, které nejdou vyjádřit číselně a musí se popsat slovně. Naopak kvantitativní faktory jdou vyjádřit číselně, tedy jsou měřitelné.

Nejčastěji se používají faktorové experimenty 2^n a 3^n , kde $n = \{2,3,4,5\}$. Počet úrovní technologických faktorů je 2 a 3. Počet faktorů je označen n . Zvětšováním počtu úrovní technologických faktorů a počtu faktorů se model stává složitějším a jeho optimalizace

náročnější. Je snahou modely co nejvíce zjednodušovat, ale nesmí mít statisticky významnou chybu od naměřených dat. Teoreticky by se mohl vytvořit i model 8^{10} , ovšem tento model by byl experimentálně neproveditelný.

A ₁		A ₂	
B ₁	B ₂	B ₁	B ₂
A ₁ B ₁	A ₁ B ₂	A ₂ B ₁	A ₂ B ₂
(1)	b	a	ab
y _{1,1}	y _{2,1}	y _{3,1}	y _{4,1}
y _{1,2}	y _{2,2}	y _{3,2}	y _{4,2}
.	.	.	.
.	.	.	.
y _{1,r}	y _{2,r}	y _{3,r}	y _{4,r}
R ₁	R ₂	R ₃	R ₄

Obr. 10: Plán faktorových experimentů 2²

1.5.1. Faktorový experiment 2³

Před začátkem experimentů se musí stanovit plán experimentů. Na Obr. 10 je zobrazen plán experimentů pro faktorové experimenty 2³ (barevná část). V prvních třech řádcích jsou uvedeny úrovně jednotlivých faktorů. Ve čtvrtém řádku je poté uvedena kombinace faktorů v jednotlivých sloupcích tabulky. V oranžovém řádku je uveden symbolický zápis kombinací faktorů odpovídající předchozímu řádku tabulky. Tento symbolický zápis se používá kvůli zjednodušení. Do tohoto řádku se malým písmenem zapisují pouze faktory, které mají index 2. Symbolické zápisy faktorů se používají pro všechna odvození. Po odvození výsledných vztahů jsou symbolické zápisy nahrazeny jednotlivými součty sloupců.

A ₁				A ₂			
B ₁		B ₂		B ₁		B ₂	
C ₁	C ₂	C ₁	C ₂	C ₁	C ₂	C ₁	C ₂
A ₁ B ₁ C ₁	A ₁ B ₁ C ₂	A ₁ B ₂ C ₁	A ₁ B ₂ C ₂	A ₂ B ₁ C ₁	A ₂ B ₁ C ₂	A ₂ B ₂ C ₁	A ₂ B ₂ C ₂
(1)	c	b	bc	a	ac	ab	abc
y _{1,1}	y _{2,1}	y _{3,1}	y _{4,1}	y _{5,1}	y _{6,1}	y _{7,1}	y _{8,1}
y _{1,2}	y _{2,2}	y _{3,2}	y _{4,2}	y _{5,2}	y _{6,2}	y _{7,2}	y _{8,2}
.
.
y _{1,r}	y _{2,r}	y _{3,r}	y _{4,r}	y _{5,r}	y _{6,r}	y _{7,r}	y _{8,r}
R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈

Obr. 11: Plán faktorových experimentů 2³

Vzorec pro výpočet celkového počtu experimentů:

$$N = r * 2^n = r * d \quad (1)$$

Kde N je celkový počet experimentů, r je počet opakování experimentů, d je počet sloupců

Vzorec pro součtové sloupce:

$$R_i \sum_{j=1}^r y_{i,j} \text{ kde } i = 1, 2, \dots, 2^n \quad (2)$$

1.5.2. Výpočet odhadu vlivu faktorů a jejich interakce

Faktorové experimenty slouží k optimalizaci procesu, proto se hledá, kdy má výstupní veličina extrém. Z matematického hlediska se hledá maximum nebo minimum v závislosti na druhu faktoru. Pro zjednodušení modelu se provede odhad vlivu jednotlivých faktorů a interakcí na výstupní parametr. Odhad vlivu jednotlivých faktorů a interakcí se určuje třemi způsoby.

První způsob je výpočet přímo z tabulky faktorových experimentů. Druhý způsob je pomocí mnemotechnické pomůcky. Třetí způsob je ze znaménkové tabulky, které jsou součástí některých statistických tabulek.

Pro praktický výpočet pro odhad vlivu faktorů a jejich interakcí se použijí vztahy:

$$Z_A = (a - 1) * (b + 1) * (c + 1) = abc + ab + ac + a - bc - b - c - 1 \quad (3)$$

Pro výpočet ostatních odhadů vlivů koeficientů a jejich interakcí se postupuje analogicky proto je pro přehlednost uvedeno jenom vzorec před matematickými úpravami:

$$Z_B = (a + 1) * (b - 1) * (c + 1) \quad (4) \quad Z_{AC} = (a - 1) * (b + 1) * (c - 1) \quad (7)$$

$$Z_C = (a + 1) * (b + 1) * (c - 1) \quad (5) \quad Z_{BC} = (a + 1) * (b - 1) * (c - 1) \quad (8)$$

$$Z_{AB} = (a - 1) * (b - 1) * (c + 1) \quad (6) \quad Z_{ABC} = (a - 1) * (b - 1) * (c - 1) \quad (9)$$

1.5.3. Určení statistické významnosti faktorů a jejich interakcí

Statistická významnost vlivů faktorů a jejich interakcí se provádí pomocí statistického F-testu. Výpočet je demonstrován pro faktorové experimenty 2^3 . Nejprve se musí spočítat odhad střední hodnoty:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^d \sum_{j=1}^r y_{i,j}}{d * r} \quad (10)$$

Dále se vypočte součet čtverců odchylek mezi změřenými daty a celkovou střední hodnotou S_0 .

$$S_0 = \sum_{i=1}^d \sum_{j=1}^r (y_{i,j} - m)^2 = S_A + S_B + S_C + S_{AB} + S_{AC} + S_{BC} + S_{ABC} + S_r \quad (11)$$

Dále se určí reziduální součet čtverců odchylek S_r , který charakterizuje opakovatelnost experimentu, proto je významnou technickou veličinou.

$$S_r = \sum_{i=1}^d \sum_{j=1}^r \left(y_{i,j} - \frac{\sum_{j=1}^r y_{i,j}}{r} \right)^2 \quad (12)$$

K určení reziduálního součtu čtverců se dá dojít i bez znalosti vztahu (12) pomocí výpočtu průměrné hodnoty naměřených hodnot pro jednotlivé kombinace faktorů (pro jednotlivé sloupce). Výpočtem čtverce odchylek jednotlivých naměřených hodnot a průměrné hodnoty naměřených hodnot v rámci jednotlivých kombinací faktorů. Součtem vypočtených čtverců odchylek v rámci jednotlivých kombinací faktorů. Toto se provede pro každou kombinaci faktorů (sloupec). Hledaný reziduální součet čtverců je součtem těchto sloupcových součtů.

Pro složky součtu čtverců odchylek S_0 , které charakterizují technologické faktory a jejich interakce, lze odvodit vztahy:

$$S_A = \frac{Z_A^2}{d * r} \quad (13)$$

$$S_B = \frac{Z_B^2}{d * r} \quad (14)$$

$$S_C = \frac{Z_C^2}{d * r} \quad (15)$$

$$S_{AB} = \frac{Z_{AB}^2}{d * r} \quad (16)$$

$$S_{AC} = \frac{Z_{AC}^2}{d * r} \quad (17)$$

$$S_{BC} = \frac{Z_{BC}^2}{d * r} \quad (18)$$

$$S_{ABC} = \frac{Z_{ABC}^2}{d * r} \quad (19)$$

Testované charakteristiky F pro technologické faktory a jejich interakce se určí ze vztahů:

$$F_A = \frac{S_A}{\frac{S_r}{v}} \quad (20)$$

$$F_B = \frac{S_B}{\frac{S_r}{v}} \quad (21)$$

$$F_C = \frac{S_C}{\frac{S_r}{v}} \quad (22)$$

$$F_{AB} = \frac{S_{AB}}{\frac{S_r}{v}} \quad (23)$$

$$F_{AC} = \frac{S_{AC}}{\frac{S_r}{v}} \quad (24)$$

$$F_{BC} = \frac{S_{BC}}{\frac{S_r}{v}} \quad (25)$$

$$F_{ABC} = \frac{S_{ABC}}{\frac{S_r}{v}} \quad (26)$$

Zde v je počet stupňů volnosti a vypočítá se podle vztahu:

$$v = d(r - 1) \quad (27)$$

Vypočtená hodnota testované charakteristiky se porovná s hodnotou kritické hodnoty F rozdělení $F_\alpha(1, v)$, která se odečte z tabulek. Hladina významnosti α se volí v rozmezí 0,1 – 0,001.

Hladina významnosti má význam takový, že $(1 - \alpha)$ je pravděpodobnost, že se neudělá chyba 1. druhu. Tato chyba nastane v případě, že byla přijata nesprávná hypotéza. Chyba 2. druhu nastane, jestliže byla zamítnuta správná hypotéza.

Jestliže je vypočtená hodnota testované charakteristiky větší než kritická hodnota F-rozdělení, pak efekt faktoru nebo jeho interakce je statisticky významný a musí se zahrnout do matematického modelu. Jestliže je vypočtená hodnota testované charakteristiky menší než kritická hodnota F-rozdělení, pak efekt faktoru nebo interakce není statisticky významný a matematický model nejprve ověřujeme bez tohoto faktoru či interakce.

1.5.4. Konstrukce matematického modelu na základě faktorových experimentů

Před vytvoření matematického modelu se jednotlivé technologické faktory transformují na bezrozměrné veličiny. Transformace se provede pomocí vztahu:

$$X_1 = \frac{2}{A_2 - A_1} * \left(A - \frac{A_2 + A_1}{2} \right) \quad (28)$$

Uvedený vztah (28) transformuje faktor A na proměnnou X_1 . Analogickými vztahy se transformují faktory B na X_2 , faktor C na X_3 atd. Transformovaná veličina nabývá hodnoty -1 pro spodní mez faktoru a +1 pro horní mez faktoru.

Obecný tvar lineárního matematického modelu pro technologický proces má tvar:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (29)$$

Výpočtem získáme nejlepší odhady neznámých koeficientů $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$, budou to koeficienty b_1, b_2, \dots, b_n , Matematický model bude mít tvar:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_n X_n \quad (30)$$

Pro výpočet koeficientů b_0, b_1, \dots, b_n , se používá metoda nejmenších čtverců. Celkový součet čtverců odchylek S se vypočte ze vztahu:

$$S = \sum_{i=1}^d (\bar{y}_i - b_0 - b_1 x_{1,i} - \dots - b_n x_{n,i})^2 \quad (31)$$

Proměnná $x_{1,i}$ představuje hodnotu bezrozměrné veličiny X_1 v i-tém sloupci. Velkými písmeny se uvádí náhodné veličiny obecně, realizace náhodných veličin se uvádí malými písmeny. Proto se v matematickém modelu transformované veličiny píší velkými písmeny a ve výpočtech se již uvádí malými písmeny.

Aritmetický průměr i-tého sloupce schématu experimentu \bar{y}_i se vypočte podle vztahu:

$$\bar{y}_i = \frac{R_i}{r} = \frac{\sum_{j=1}^r y_j}{r} \quad (32)$$

Hodnoty koeficientů b se určí z derivace S podle koeficientů položených rovny 0.

$$\frac{\partial S}{\partial b_0} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial b_1} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial b_2} = 0, \quad \dots, \quad \frac{\partial S}{\partial b_n} = 0 \quad (33)$$

Touto operací se získá n+1 rovnic:

$$b_0 d + b_1 \sum_{i=1}^d x_{1,i} + b_2 \sum_{i=1}^d x_{2,i} + \dots + b_n \sum_{i=1}^d x_{n,i} = \sum_{i=1}^d \bar{y}_i \quad (34)$$

$$b_0 \sum_{i=1}^d x_{1,i} + b_1 \sum_{i=1}^d x_{1,i}^2 + b_2 \sum_{i=1}^d x_{1,i} x_{2,i} + \dots + b_n \sum_{i=1}^d x_{1,i} x_{n,i} = \sum_{i=1}^d \bar{y}_i x_{1,i} \quad (35)$$

$$b_0 \sum_{i=1}^d x_{2,i} + b_1 \sum_{i=1}^d x_{1,i} x_{2,i} + b_2 \sum_{i=1}^d x_{2,i}^2 + \dots + b_n \sum_{i=1}^d x_{2,i} x_{n,i} = \sum_{i=1}^d \bar{y}_i x_{2,i} \quad (36)$$

$$b_0 \sum_{i=1}^d x_{n,i} + b_1 \sum_{i=1}^d x_{1,i} x_{n,i} + b_2 \sum_{i=1}^d x_{1,i} x_{n,i} + \dots + b_n \sum_{i=1}^d x_{n,i}^2 = \sum_{i=1}^d \bar{y}_i x_{n,i} \quad (37)$$

Vzhledem k transformačnímu vztahu a s ohledem na schéma úplného plánu faktorových experimentů platí:

$$\sum_{i=1}^d x_{k,i} = 0 \quad (38)$$

$$\sum_{i=1}^d x_{k,i}^2 = d \quad (39)$$

$$\sum_{i=1}^d x_{k,i} x_{s,i} = 0 \quad (40)$$

Kde index k značí proměnnou x_k , pro $k=1,2, \dots, n$, pro $k,s = 1,2, \dots, n$ a $k \neq s$.

Index i značí sloupec, $i = 1,2, \dots, d$.

Řešením soustavy rovnic (34), (35), (36), (37) získáme vztahy pro koeficienty b_0, b_1, \dots, b_n :

$$b_0 = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^d \bar{y}_i ; b_k = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^d \bar{y}_i x_{n,i} \quad (41)$$

Pro $k = 1, 2, \dots, n$

K určení velikosti koeficientů b_k u transformovaných veličin se dají využít odhady Z vlivů faktorů. Vztahy pak mají tvar:

$$b_1 = \frac{Z_A}{d * r}, \quad b_2 = \frac{Z_B}{d * r}, \quad b_3 = \frac{Z_C}{d * r}, \dots \quad (42)$$

Po určení koeficientů b_0, b_1, \dots, b_n lze napsat lineární matematický model ve tvaru:

$$\begin{aligned} \hat{y} &= b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n = \\ &= \frac{1}{d} \sum_{i=1}^d \bar{y}_i + x_1 \frac{1}{d} \sum_{i=1}^d x_{1,i} \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r y_{1,j} + x_2 \frac{1}{d} \sum_{i=1}^d x_{2,i} \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r y_{2,j} + \dots + x_n \frac{1}{d} \sum_{i=1}^d x_{n,i} \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r y_{n,j} \end{aligned} \quad (43)$$

Reziduální rozptyl se určuje pouze z naměřených hodnot. Kvalita modelu proto nemůže naměřené hodnoty ovlivnit. Po otestování kvality matematického modelu nejprve určíme odhad reziduálního rozptylu S_r ze vztahu:

$$S_r = \sum_{i=1}^d \sum_{j=1}^r y_{i,j}^2 - \frac{1}{r} \sum_{i=1}^d R_i^2 = \sum_{i=1}^d \sum_{j=1}^r y_{i,j}^2 - \frac{1}{r} \sum_{i=1}^d \left(\sum_{j=1}^r y_{i,j} \right)^2 = \sum_{i=1}^d \sum_{j=1}^r (y_{i,j} - \bar{y}_i)^2 \quad (44)$$

Pro součet čtverců odchylek naměřených hodnot a modelu S_s pak platí:

$$S_s = \sum_{i=1}^d \sum_{j=1}^r (y_{i,j} - b_0 - b_1 x_{1,i} - \dots - b_n x_{n,i})^2 \quad (45)$$

Dále se zavede testová charakteristika ve tvaru:

$$\bar{F} = \frac{\frac{S_s}{dr - n - 1}}{\frac{S_r}{v}} \quad \text{pro } dr \geq n + 1 \quad (36)$$

Při nesplnění této podmínky, nastane situace, že nebude dostatek hodnot pro výpočet koeficientů b_0, b_1, \dots, b_n .

Počet stupňů volnosti v se počítá podle (27) stejně jako při testování odhadů vlivů faktorů. Hladina významnosti α se volí v rozmezí 0,1 – 0,001. Ze statistických tabulek se odečte kritická hodnota F-rozdělení $F_\alpha[(dr - n - 1), v]$.

Je-li $\bar{F} \leq F_\alpha$ pak vypočtený model popisuje naměřené hodnoty s dostatečnou přesností. Odchylka mezi modelem a experimentálními hodnotami je statisticky nevýznamná.

Je-li $\bar{F} > F_\alpha$ pak vypočtený model nepopisuje naměřené hodnoty s dostatečnou přesností. Odchylka mezi modelem a experimentálními hodnotami je statisticky významná. Kvalita modelu se musí zvýšit tak, že do modelu zahrneme ty faktory a jejich interakce, které se vyřadili z důvodů statistické nevýznamnosti viz. kap. 1.5.2. Jestliže ani pak model nevyhoví stanovené podmínce, je třeba zvolit jiný typ modelu, například nelineární model.

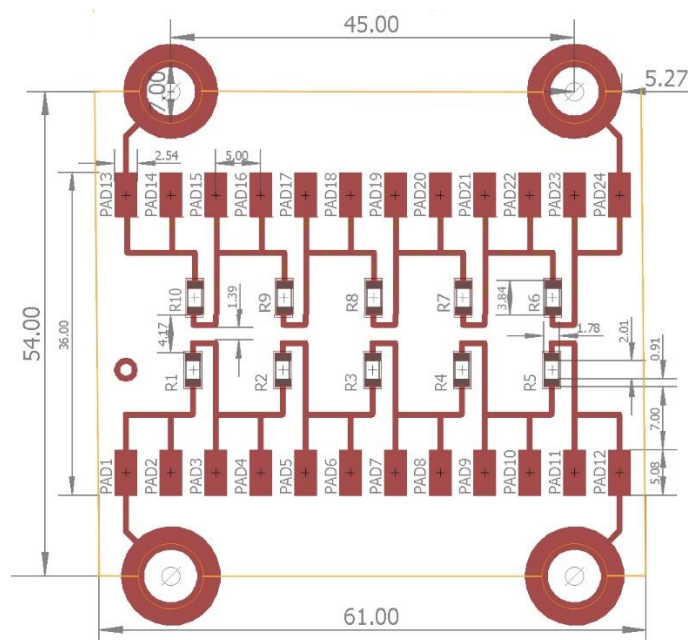
2. Experimentální část

V této části diplomové práce se budeme zabývat celým procesem pro získání dat, ze kterých se poté stanoví matematický model lepidel. Nejprve se budeme zabírat přípravou experimentů od výroby vhodné desky plošného spoje přes osazení této desky nulovými odpory a jejich klimatické namáhání až po stanovení matematického modelu na základě naměřených dat.

2.1. Příprava experimentu

2.1.1. Výroba DPS

Nejprve bylo nutné vytvořit vhodnou desku plošného spoje pro zamýšlené experimenty a následné měření vybraných elektrických vlastností. Návrh desky plošného spoje i návrh masky pro nanášení lepidel šablonovým tiskem byl proveden v návrhovém softwaru EAGLE 8.3.2. Jak je vidět na obrázku 12 deska má 4,5 x 5,4 cm. Pro velikosti a rozteče připojovacích plošek nulových odporů s pouzdry 1206 byla použita knihovna importovaná do EAGLU. Tato knihovna používala imperiální jednotky. Z kružnic se po rozříznutí desek stala kontaktní místa pro uchycení do přípravku a současně slouží jako proudové kontakty při měření čtyřvodičovou metodou, ovšem firma Pragoboard s.r.o, která tyto desky vyráběla, nedisponuje sedmimilimetrovým vrtákem, proto bylo nutno ručně vyrazit tyto díry.



Obr. 12: Deska plošného spoje

Na návrh masky pro nanášení lepidla šablonovým tiskem bylo pozapomenuto, nicméně firma Pragoboard s.r.o dodala univerzální masku pro dvanáct desek. Tato maska nepasovala do speciálního rámu pro manuální šablonový tisk, ovšem za vhodného použití drátků a kleští se

nakonec podařilo masku správně uchytit. Pro přesnější tisk kvůli nesnáším s uchycením a obtížnějším srovnáním připojovacích plošek vůči masce bylo rozhodnuto, že bude probíhat tisk pouze čtyř desek najednou místo dvanácti. Tyto desky byly umístěny těsně vedle sebe pod středem šablony kvůli vykompenzování nepřesného uchycení.

Všechny testovací desky jsou jednovrstvé bez nepájivé masky, jsou vyrobeny z materiálu FR4 o tloušťce 1 mm. Polovina desek byla galvanicky pozlacená. Šablon pro tisk byla z plechu CuSn4.

2.1.2. Nulové rezistory

Pro osazení desek byly použity nulové SMD rezistory. K dispozici byly dva typy nulových odporů o stejné velikosti 1206. Jeden typ byl rezistor s povrchovou úpravou pro pájené spoje, při ověřování jejich odporu bylo naměřeno 5 mΩ. Druhý typ byl rezistor s povrchovou úpravou vhodnou pro lepené spoje, při ověřování bylo naměřeno 12 mΩ. Proto byly použity odpory s povrchovou úpravou pro pájené spoje.

2.1.3. Použitá lepidla

Pro realizaci vodivých spojů byla použita čtyři různá lepidla, dvě dvousložková ELPOX AX 15S a Loctite 3888 a dvě jednosložková Permacol 2369/2 a ELPOX SC 70MN.

2.1.3.1. Loctite 3888

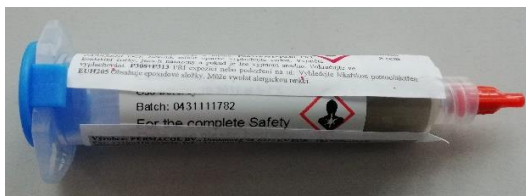
Loctite 3888 je dvousložkové lepidlo vyrobené firmou Loctite dodávané v balení o hmotnosti 2,5g. Vazební složkou je epoxydová pryskyřice, která má čirou až jantarovou barvu. Vodivou složkou jsou stříbrné částice. Je určeno pro ruční opravy a přepracování spojů. Poměr míchání je 100:6 a výsledný kompozit má viskozitu tuhé pasty a rezistivita je $< 5 * 10^{-6} \Omega m$. Toto lepidlo je oproti ostatním použitým lepidlům dodávaným ve větším množství poměrně drahé. Proto také bylo osazeno pouze osm desek. Lepidlo bylo vytvrzeno při 150 °C po dobu 30 minut.



Obr. 13: Loctite 3888

2.1.3.2. Permacol 2369/2

Permacol 2369/2 je jednosložkové lepidlo vyrobené firmou Permacol bv dodávané v injekční stříkačce o hmotnosti 35 g. Epoxidová pryskyřice tvoří vazební složku a stříbrné částice složku vodivostní. Jeho konzistence je měkká pasta ($\eta = 30\,000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$). Vodivost tohoto lepidla je $< 3 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$ a barva je tmavě stříbrná až hnědá. Lepidlo má rychlé vytvrzovací vlastnosti, proto bylo vytvrzováno při 150°C po dobu 3 minut.



Obr. 14: Permacol 2369/2

2.1.3.3. ELPOX AX 15S

ELPOX AX 15S je dvousložkové lepidlo od firmy amepox Microelectronics LTD dodávané ve dvou kalsíčkách. Toto lepidlo s vysokou viskozitou je tvořeno vazební složkou z epoxidové pryskyřice a vodivost zajišťují stříbrné vločky. Je určeno hlavně pro servisní ruční aplikace. Poměr míchání je jedna ku jedné a výsledný kompozit má konzistenci měkké pasty ($\eta = 28\,000 - 30\,000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$). Na otevřené ploše v tenké vrstvě poměrně rychle mění viskozitu. Rezistivita je $17 \cdot 10^{-7} - 18 \cdot 10^{-7} \Omega\text{m}$. Lepidlo je možné vytvrdit při pokojové teplotě 25°C , ovšem doba vytvrzování je půl druhé hodiny, proto bylo zvoleno vytvrzování při 150°C po dobu 15 minut.



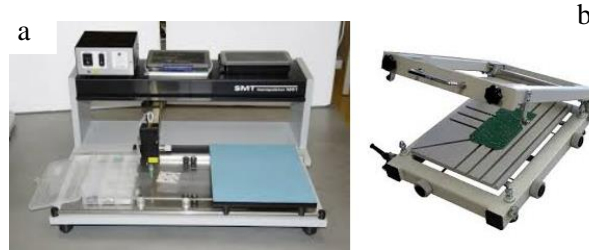
Obr. 15: ELPOX AX 15S

2.1.3.4. ELPOX SC 70MN

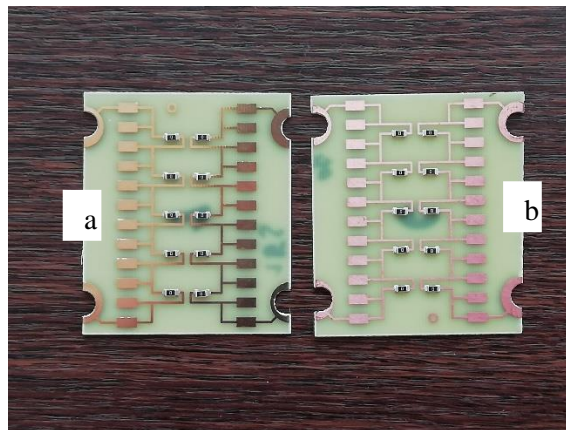
ELPOX SC 70MN je jednosložkové lepidlo od firmy amepox Microelectronics LTD dodávané v kalíšku. Vazební složku tvoří epoxi-fenolová pryskyřice. Vodivou složku tvoří částice stříbra. Je určen hlavně pro vysokorychlostní sériovou výrobu. Jeho konzistence je tekutá pasta ($\eta = 530\,000 - 560\,000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$). Lepidlo bylo vytvrzováno při teplotě 200°C po dobu 20 minut.

2.1.4. Osazení DPS

Pro nanesení lepidel bylo použito zařízení pro manuální šablonový tisk a maska. Osazování desek probíhalo pomocí vakuové pinzety a ručního manipulátoru SMT MO1. Proto nebylo možné dosáhnout ideálního umístění součástek na přípojovací plošky.



Obr. 16: a) Ruční manipulátor b) Zařízení na sitotisk



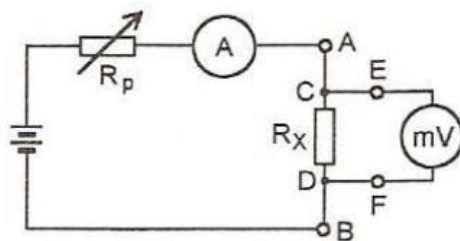
Obr. 17: Osazená DPS a) pozlacené plošky b) měděné plošky

2.2. Měření elektrických veličin

Po osazení bylo provedeno měření elektrického odporu a nelinearity VA charakteristiky u všech osazených desek. Měření elektrického odporu a nelinearity VA charakteristiky probíhalo pomocí čtyřvodičové (Kelvinovy) metody.

2.2.1. Čtyřvodičová metoda

Čtyřvodičová metoda je určena k měření malých odporů. Eliminuje vliv přívodů a přechodových odporů svorek. Měřeným vzorkem prochází konstantní proud, který na něm vytváří úbytek napětí a tento úbytek je přímo úměrný velikosti odporu. Při použití této metody nejsou měřeny úbytky napětí, které vznikají na svorkách A a B. Na obr.19 je znázorněno zapojení této metody. Na svorky A a B je připojen zdroj proudu, na svorkách C a D je připojen měřený vzorek a na svorkách E a F je připojen voltmetr.



Obr. 18: Schéma zapojení čtyřvodičové metody

2.2.2. Použité přístroje

Pro měření odporů byl použit přístroj Agilent 4263B. Měření probíhalo při frekvenci 1 kHz. Tento přístroj je přímo navržen a zkonstruován pro měření čtyřvodičovou metodou. Před samotným měřením je nutné přístroj zkalibrovat zkratováním svorek a nastavením odporu na nulu.



Obr. 19: Agilent 4263B

Pro měření nelinearity byl použit přístroj CLT (Component linearity test) type 01. Měření probíhalo při vstupní frekvenci 10 kHz a vstupním napětím 0,3 V. Výstupní data byla zaznamenávána při frekvenci 30 kHz. Na obr. 21 je vidět použitý přístroj i s přípravkem pro urychlení měření.



Obr. 20: CLT (Component linearity test) type 01

2.3. Průběh klimatického stárnutí

Po naměření prvotních hodnot byly desky klimaticky namáhané podle parametrů uvedených v tabulce 1. Bylo zvoleno osm rozdílných parametrů klimatického namáhání. Kvůli provádění faktorových experimentů 2^3 byly zvoleny tři faktory a to: čas, teplota a vlhkost. Dvě desky jedna s pozlacenými připojovacími ploškami a druhá s měděnými připojovacími ploškami od každého lepidla byly různě namáhány, nedošlo tedy k situaci, že by probíhalo například namáhání č.2 vzorek byl vyndán proměřen a vrácen do klimatické komory a pokračovalo namáhání č.6.

Tab. 1: Parametry klimatického namáhání

	Čas [hod]	Teplota [°C]	Relativní vlhkost [%]
Namáhání č.1	168	25	85
Namáhání č.2	168	25	50
Namáhání č.3	168	85	50
Namáhání č.4	168	85	85
Namáhání č.5	400	25	50
Namáhání č.6	400	25	85
Namáhání č.7	400	85	50
Namáhání č.8	400	85	85

Klimatické namáhání probíhalo ve dvou zařízeních. První použité zařízení byla klimatická komora CTS 10/200. Druhé použité zařízení byla sušárna Memmert.

2.4. Naměřené hodnoty

Po skončení klimatického namáhání byly desky plošných spojů znovu změřeny. Kvůli velkému množství naměřených dat jsou uváděny pouze jejich statisticky zpracované hodnoty v podobě mediánu, průměru, směrodatné odchylky a průměrné relativní odchylky. Původní naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze 1-4. Z naměřených hodnot bylo pro výpočty použito pouze osm hodnot, kvůli matematickému vyrovnání byla odstraněna nejvyšší a nejnižší naměřená hodnota. U některých namáhání, ve většině případů u namáhání se zvýšenou vlhkostí, některé spoje úplně zdegradovaly a byly naměřeny hodnoty například 33 Ω . Tyto hodnoty byly z výpočtů odstraněny při matematickém vyrovnání.

2.4.1. Naměřené hodnoty odporů spojů

Při výpočtu hodnoty odporu spoje se od naměřené hodnoty odečetla hodnota SMD rezistoru 5 mΩ a výsledná hodnota byla vydělena dvěma, tím byla získána hodnota odporu jednoho spoje. Z těchto hodnot byl vypočten medián, průměr, směrodatná odchylka a průměrná relativní odchylka pro každé adhezivo.

Tab. 2: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky odporů pro ELPOX AX 15S 168 hodin

ELPOX AX 15S 168 hodin								
Odpor [mΩ]	Zlato				Měď			
Teplota/ relativní vlhkost	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%
Počáteční medián	237	223	232	211	164	160	189	385
Medián po stárnutí	675	267	568	4797	1810	170	780	3053
Počáteční průměr	227	227	233	203	174	169	209	419
Průměr po stárnutí	957	291	620	4807	1639	182	826	2634
Směrodatná odchylka před stárnutím	67	50	55	47	58	30	71	68
Směrodatná odchylka po stárnutí	503	83	281	2296	639	38	176	1171
Průměrná relativní odchylka [%]	-36	19	-33	229	84	86	-11	224

Tab. 3: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky odporů pro ELPOX AX 15S 400 hodin

ELPOX AX 15S 400 hodin								
Odpor [mΩ]	Zlato				Měď			
Teplota/ relativní vlhkost	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%
Počáteční medián	233	235	191	205	161	191	137	205
Medián po stárnutí	1318	276	684	3741	1921	216	788	8602
Počáteční průměr	264	222	274	210	177	203	140	245
Průměr po stárnutí	1420	261	885	3896	1684	226	828	9390
Směrodatná odchylka před stárnutím	73	47	204	72	56	44	37	133
Směrodatná odchylka po stárnutí	486	60	589	678	744	57	230	4259
Průměrná relativní odchylka [%]	148	11	-20	870	25	28	441	818

Tab. 4: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky odporů pro ELPOX SC 70MN 168 hodin

ELPOX SC 70MN 168 hodin								
Odpor [mΩ]	Zlato				Měď			
Teplota/ relativní vlhkost	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%
Počáteční medián	195	215	211	198	96	152	96	162
Medián po stárnutí	585	220	393	1176	182	148	127	1607
Počáteční průměr	196	227	223	243	108	153	94	164
Průměr po stárnutí	512	234	394	1118	183	139	147	1628
Směrodatná odchylka před stárnutím	68	120	87	133	37	40	47	46
Směrodatná odchylka po stárnutí	133	122	156	320	44	33	70	448
Průměrná relativní odchylka [%]	168	4	95	412	70	-4	38	1081

Tab. 5: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky odporů pro ELPOX SC 70MN 400 hodin

ELPOX SC 70MN 400 hodin								
Odpor [mΩ]	Zlato				Měď			
Teplota/ relativní vlhkost	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%
Počáteční medián	195	195	145	215	147	104	75	153
Medián po stárnutí	1161	214	208	1657	339	113	102	1102
Počáteční průměr	194	192	147	236	179	131	81	204
Průměr po stárnutí	1057	206	208	1915	383	138	100	1363
Směrodatná odchylka před stárnutím	92	57	46	95	69	56	33	133
Směrodatná odchylka po stárnutí	533	62	54	682	168	55	31	962
Průměrná relativní odchylka [%]	406	6	62	730	88	7	35	564

Tab. 6: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky odporů pro Loctite 3888 168 hodin

Loctite 3888 168 hodin								
Odpor [mΩ]	Zlato				Měď			
Teplota/ relativní vlhkost	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%
Počáteční medián	145	94	107	88	125	126	95	88
Medián po stárnutí	237	129	457	914	169	131	227	1178
Počáteční průměr	152	105	110	93	124	127	98	93
Průměr po stárnutí	218	122	402	968	207	133	276	1776
Směrodatná odchylka před stárnutím	46	38	26	17	44	7	22	17
Směrodatná odchylka po stárnutí	62	30	242	319	108	8	107	1399
Průměrná relativní odchylka [%]	47	32	300	854	78	4	323	2386

Tab. 7: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky odporů pro Loctite 3888 400 hodin

Loctite 3888 400 hodin								
Odpor [mΩ]	Zlato				Měď			
Teplota/ relativní vlhkost	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%
Počáteční medián	140	148	135	124	106	85	71	123
Medián po stárnutí	220	156	899	1802	174	109	1788	554
Počáteční průměr	141	142	135	121	110	110	82	118
Průměr po stárnutí	235	163	1269	1830	208	119	1590	600
Směrodatná odchylka před stárnutím	55	28	38	17	33	49	23	16
Směrodatná odchylka po stárnutí	135	55	616	1137	96	42	1056	151
Průměrná relativní odchylka [%]	132	7	1175	1866	95	23	1959	430

Tab. 8: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky odporů pro Permacol 2369/2 168 hodin

Permacol 2369/2 168 hodin								
Odpor [mΩ]	Zlato				Měď			
Teplota/ relativní vlhkost	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%
Počáteční medián	123	153	153	247	233	177	294	204
Medián po stárnutí	82	114	89	733	586	375	275	712
Počáteční průměr	144	167	173	278	273	231	314	188
Průměr po stárnutí	92	118	110	632	505	383	276	576
Směrodatná odchylka před stárnutím	79	113	94	138	89	146	81	60
Směrodatná odchylka po stárnutí	38	52	59	221	150	175	26	222
Průměrná relativní odchylka [%]	-36	19	-33	229	84	86	-11	544

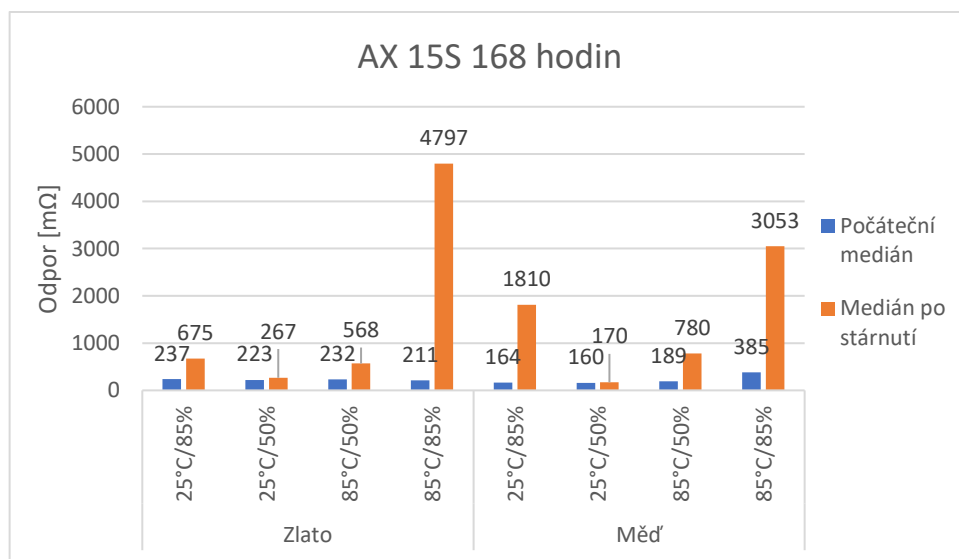
Tab. 9: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky odporů pro Permacol 2369/2 400 hodin

Permacol 2369/2 400 hodin								
Odpor [mΩ]	Zlato				Měď			
Teplota/ relativní vlhkost	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%
Počáteční medián	123	153	153	247	233	177	294	204
Medián po stárnutí	82	114	89	733	586	375	275	712
Počáteční průměr	144	167	173	278	273	231	314	188
Průměr po stárnutí	92	118	110	632	505	383	276	576
Směrodatná odchylka před stárnutím	79	113	94	138	89	146	81	60
Směrodatná odchylka po stárnutí	38	52	59	221	150	175	26	222
Průměrná relativní odchylka [%]	-39	11	-20	870	25	28	441	818

Hodnoty z tabulek 2-9 byly zpracovány do následujících grafů. Do grafů byly použity pouze mediány, protože oproti průměru nejsou tolik ovlivněny extrémními hodnotami odporu, které se při měření vyskytly. Tyto abnormálně vysoké hodnoty vznikly u SMD rezistorů, které byly během výroby poškozeny například špatným vytvrzením, nepřesným osazením či nesprávným skladováním. Grafy průměrů jsou uvedeny v příloze 9-12.

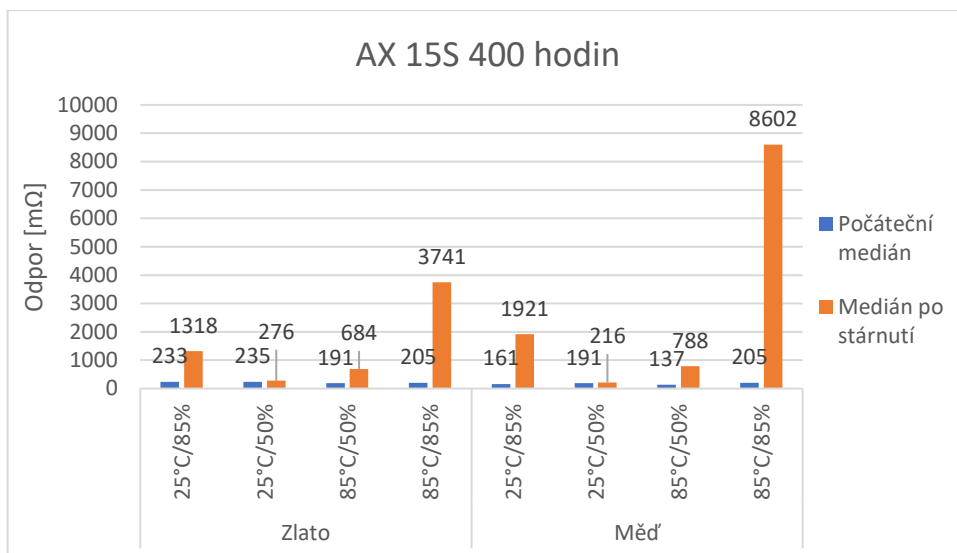
ELPOX AX 15S

Pokud adhezivo AX 15S namáháme po dobu 168 hodin zvýšenou vlhkostí, odpor spoje na pozlacených připojovacích ploškách se zvýší přibližně 400 m Ω , na měděných připojovacích ploškách odpor spoje vzroste na přibližně 2 Ω . Při namáhání pokojovou teplotou a vlhkostí se odpor ani na jedné desce výrazně nemění. Při namáhání zvýšenou teplotou se zvýší odpor spoje na pozlacených připojovacích ploškách přibližně 0 300 m Ω , oproti tomu na měděných připojovacích ploškách se odpor spoje zvýší razantně o přibližně 600 m Ω . Obě desky jak s pozlacenými připojovacími ploškami, tak s měděnými připojovacími ploškami při namáhání zvýšenou teplotou a vlhkostí masivně degradují a hodnota odporu spojů se pohybuje v řádech jednotek ohmů.



Obr. 21: Porovnání mediánů odporů ELPOX AX 15S 168 hodin

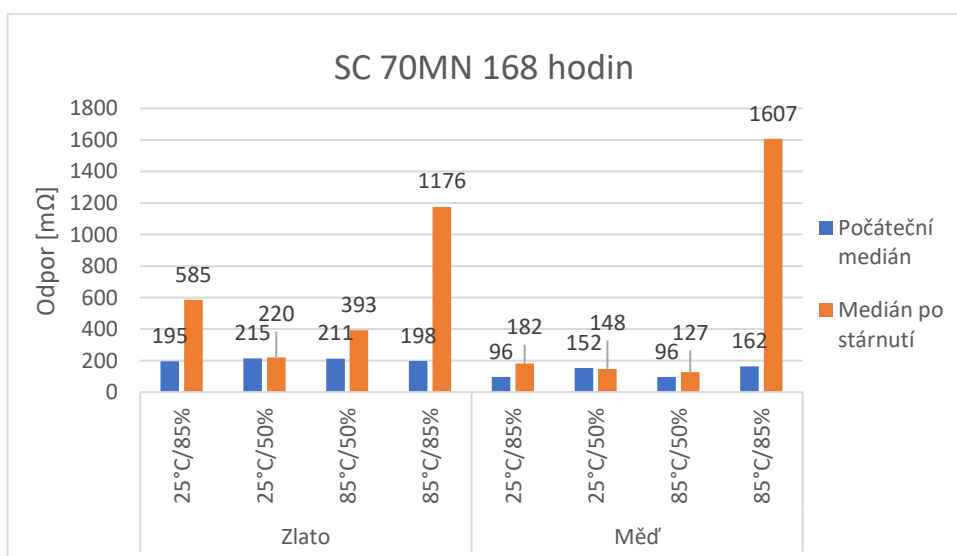
Při namáhání po dobu 400 hodin je za zvýšené vlhkosti vzroste odpor na desce s měděnými připojovacími ploškami k hodnotě blížíící se 2 Ω , na desce s pozlacenými připojovacími ploškami odpor spoje vzroste na 1,3 Ω . Při zvýšené teplotě odpor roste obdobně jako při namáhání po dobu 168 hodin. U kombinace zvýšené teploty a vlhkosti odpor spoje na obou deskách vzroste a pohybuje se v řádech jednotek ohmů, u měděné desky dosáhne skoro 10 Ω .



Obr. 22: Porovnání mediánů odporů ELPOX AX 15S 400 hodin

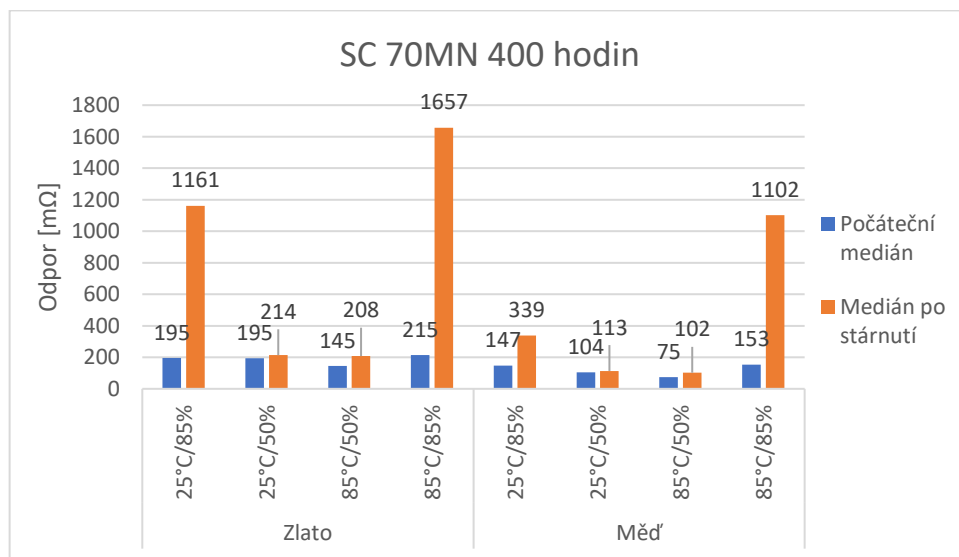
ELPOX SC 70MN

Adhezivo SC 70MN dobře snáší zvýšené klimatické namáhání. Pokud je vystaveno po dobu 168 hodin zvýšené vlhkosti, spoj na desce s pozlacenými přípojovacími ploškami degraduje více než na desce s měděnými ploškami, jeho odpor vzroste přibližně o 400 mΩ, U spoje na desce s měděnými ploškami vzroste odpor jenom přibližně o 90 mΩ. Při pokojových podmínkách se odpor spoje ani na jedné desce nemění. Při zvýšené teplotě opět méně degraduje spoj na desce s měděnými ploškami, který se zvýší jen zanedbatelně. U desky s pozlacenými ploškami je tato změna razantnější, a to o přibližně 200 mΩ. Ovšem při kombinaci zvýšené teploty a vlhkosti degraduje spoj na desce s měděnými ploškami tak razantně, že hodnota odporu tohoto spoje se pohybuje okolo 1,6 Ω. U spoje na desce s pozlacenými ploškami se odpor pohybuje okolo 1 Ω.



Obr. 23: Porovnání mediánů odporů ELPOX SC 70MN 168 hodin

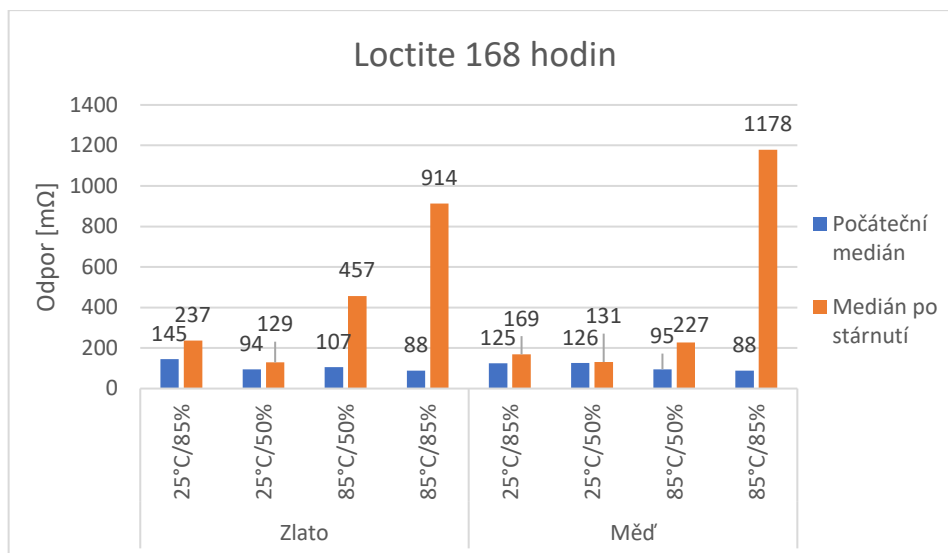
Při vystavení nepříznivým podmínkám po dobu 400 hodin se oproti 168 hodinám všechny negativní efekty zvýší. U namáhání zvýšenou vlhkostí se odpor spoje na desce s pozlacenými ploškami dostává k hodnotě 1,1 Ω . Na desce s měděnými ploškami odpor spoje vzroste, ale oproti desce s pozlacenými ploškami nikterak razantně. Při zvýšené teplotě se odpor u desky s pozlacenými ploškami zvýšil méně než při namáhání trvajícím 168 hodin. U desky s měděnými ploškami je nárůst zanedbatelný. Při kombinaci teploty a vlhkosti spoj na desce s pozlacenými ploškami vzroste až k hodnotě 1,7 Ω . Spoj na desce s měděnými ploškami vzroste k hodnotě 1,1 Ω .



Obr. 24: Porovnání mediánů odporů ELPOX SC 70MN 400 hodin

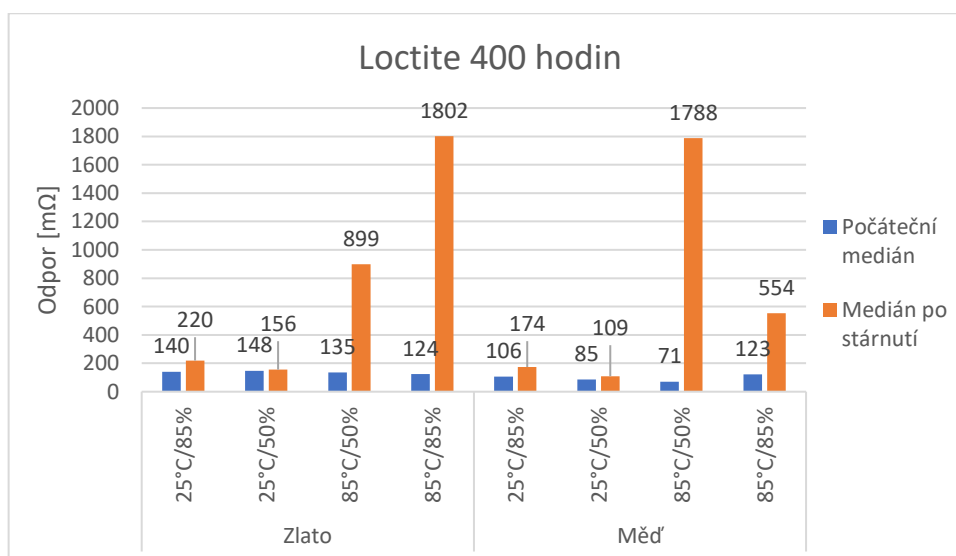
Loctite 3888

Loctite 3888 při době namáhání trvajícím 168 hodin na desce s měděnými ploškami nedegraduje nijak razantně, až na kombinaci teploty a vlhkosti kdy odpor vzroste na hodnotu okolo 1,2 Ω . Na desce s pozlacenými ploškami je degradace výraznější hlavně při namáhání zvýšenou teplotou, kde se odpor spoje zvýší o přibližně 300 m Ω . Při kombinaci zvýšené teploty a vlhkosti se odpor spoje blíží k hranici 1 Ω .



Obr. 25: Porovnání mediánů odporů Loctite 3888 168 hodin

Při namáhání trvajícím 400 hodin Loctite výrazně degraduje při zvýšené teplotě. Na desce s pozlacenými ploškami vzroste odpor k hodnotě 900 mΩ a na desce s měděnými ploškami až k hodnotě 2 Ω. Při kombinaci zvýšené teploty a vlhkosti spoj na desce s měděnými ploškami vzroste asi o 400 mΩ. Zato spoj na desce s pozlacenými ploškami výrazně degraduje a hodnota odporu spoje se blíží ke 2 Ω.

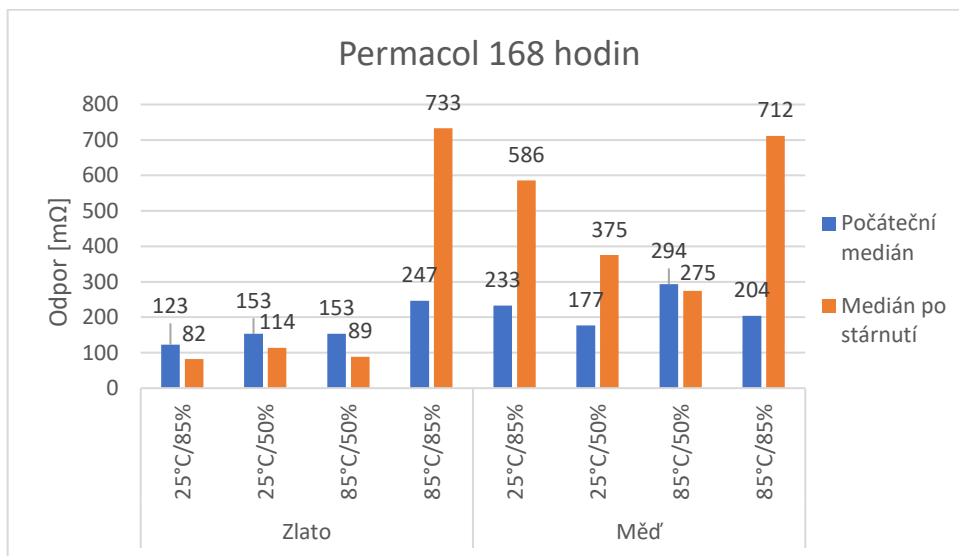


Obr. 26: Porovnání mediánů odporů Loctite 3888 400 hodin

Permacol 2369/2

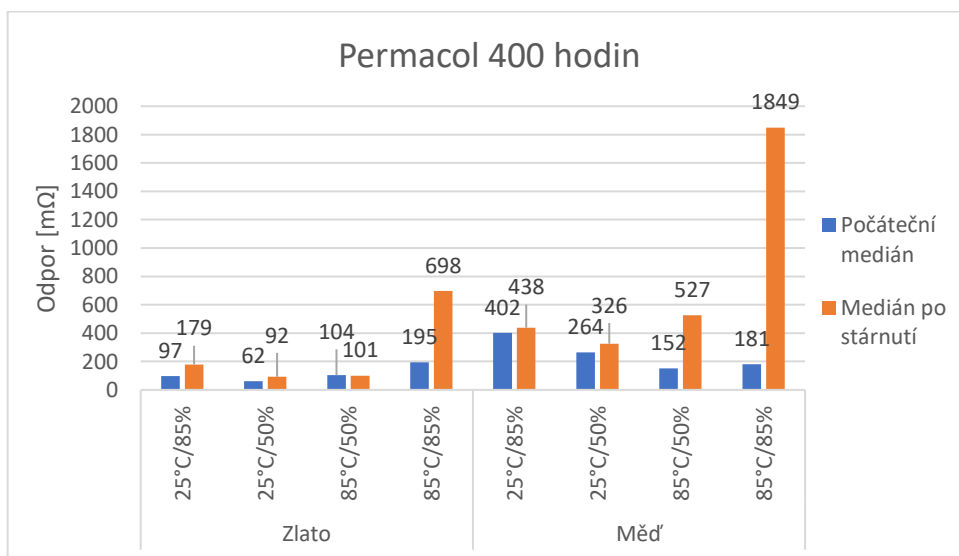
Adhezivo Permacol 2369/2 je na desce s pozlacenými ploškami velice stabilní. Při namáhání teplotou nebo vlhkostí odpor spoje mírně klesá. U namáhání teplotou dochází k poklesu odporu o 60 mΩ patrně docházelo k dotvrzování adheziva. Při kombinaci zvýšené teploty a vlhkosti odpor spoje vzroste přibližně o 500 mΩ. U desky s měděnými ploškami byla degradace

výraznější, u namáhání zvýšenou vlhkostí vzrostl odpor přibližně o 250 mΩ. Při pokojové teplotě vzrostl odpor o 200 mΩ. Při kombinaci zvýšené teploty a vlhkosti vzrostl odpor o 500 mΩ.



Obr. 27: Porovnání mediánů odporů Permacol 2369/2 168 hodin

Při namáhání po dobu 400 hodin se spoj na desce s pozlacenými ploškami choval obdobně jako při kratším namáhání. Zato u desky s měděnými ploškami nedošlo k tak výrazné degradaci při namáhání zvýšenou vlhkostí jako u předchozího namáhání. U namáhání zvýšenou teplotou došlo k výraznější degradaci a odpor spoje se zvedl o necelých 400 mΩ. Při kombinaci zvýšené teploty a vlhkosti došlo k masivní degradaci spoje na desce s měděnými připojovacími ploškami a hodnota odporu se blížila ke 2 Ω.



Obr. 28: Porovnání mediánů odporů Permacol 2369/2 400 hodin

2.4.2. Naměřené hodnoty nelinearity

V následujících tabulkách jsou uvedeny výpočty pro medián, průměr, směrodatná odchylka a průměrná relativní odchylka pro každé adhezivo.

Tab. 10: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky nelinearity VA charakteristiky pro ELPOX AX 15S 168 hodin

ELPOX AX 15S 168 hodin								
Nelinearita VA char. [μV]	Zlato				Měď			
Teplota/ relativní vlhkost	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%
Počáteční medián	0,25	0,31	0,27	0,34	0,24	0,22	0,24	0,17
Medián po stárnutí	1,09	0,88	0,89	0,05	0,36	0,77	0,14	0,18
Počáteční průměr	0,30	0,37	0,28	0,42	0,23	0,63	0,24	0,17
Průměr po stárnutí	0,90	0,87	1,06	0,04	0,34	0,93	0,20	0,15
Směrodatná odchylka před stárnutím	0,12	0,19	0,03	0,24	0,03	0,57	0,08	0,02
Směrodatná odchylka po stárnutí	0,42	0,06	0,39	0,01	0,07	0,45	0,16	0,08
Průměrná relativní odchylka [%]	305	188	313	-84	49	118	79	-21

Tab. 11: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky nelinearity VA charakteristiky pro ELPOX AX 15S 400 hodin

ELPOX AX 15S 400 hodin								
Nelinearita VA char. [μV]	Zlato				Měď			
Teplota/ relativní vlhkost	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%
Počáteční medián	0,29	0,21	0,77	0,26	0,23	0,29	0,22	0,27
Medián po stárnutí	0,63	0,67	0,41	0,05	0,09	0,45	0,33	0,06
Počáteční průměr	0,29	0,32	0,84	0,27	3,08	0,31	0,22	0,34
Průměr po stárnutí	0,63	0,81	0,48	0,05	0,09	0,45	0,31	0,06
Směrodatná odchylka před stárnutím	0,05	0,19	0,64	0,07	7,53	0,16	0,12	0,20
Směrodatná odchylka po stárnutí	0,06	0,31	0,19	0,02	0,03	0,12	0,12	0,01
Průměrná relativní odchylka [%]	136	170	49	-81	-37	91	105	-74

Tab. 12: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky nelinearity VA charakteristiky pro ELPOX SC 70MN 168 hodin

ELPOX SC 70MN 168 hodin								
Nelinearita VA char. [μ V]	Zlato				Měď			
Teplota/ relativní vlhkost	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%
Počáteční medián	0,51	0,84	0,52	0,68	0,18	0,39	0,36	1,06
Medián po stárnutí	0,74	1,60	1,60	0,03	0,39	0,90	0,47	0,04
Počáteční průměr	0,58	0,78	0,52	0,70	0,21	0,40	0,39	1,17
Průměr po stárnutí	0,81	1,60	1,53	0,05	0,37	0,88	0,50	0,08
Směrodatná odchylka před stárnutím	0,23	0,17	0,11	0,23	0,17	0,10	0,21	0,62
Směrodatná odchylka po stárnutí	0,20	0,19	0,29	0,03	0,18	0,15	0,21	0,10
Průměrná relativní odchylka [%]	41	108	253	-94	172	126	32	-95

Tab. 13: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky nelinearity VA charakteristiky pro ELPOX SC 70MN 400 hodin

ELPOX SC 70MN 400 hodin								
Nelinearita VA char. [μ V]	Zlato				Měď			
Teplota/ relativní vlhkost	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%
Počáteční medián	0,52	0,68	0,42	0,35	0,66	0,67	0,35	1,50
Medián po stárnutí	0,50	1,40	2,15	0,04	0,63	0,76	0,40	0,09
Počáteční průměr	0,55	0,64	0,41	0,40	0,84	0,72	0,59	1,45
Průměr po stárnutí	1,32	1,39	2,15	0,04	0,98	0,86	0,44	0,11
Směrodatná odchylka před stárnutím	0,17	0,12	0,07	0,12	0,46	0,29	0,68	0,82
Směrodatná odchylka po stárnutí	1,32	0,13	0,35	0,01	0,93	0,39	0,17	0,12
Průměrná relativní odchylka [%]	263	116	495	-91	20	21	46	-91

Tab. 14: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky nelinearity VA charakteristiky pro Loctite 3888 168 hodin

Loctite 3888 168 hodin								
Nelinearita VA char. [μ V]	Zlato				Měď			
Teplota/ relativní vlhkost	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%
Počáteční medián	0,46	0,48	0,41	0,60	0,30	0,28	0,19	0,74
Medián po stárnutí	1,15	1,35	1,75	0,03	1,09	0,47	0,31	0,30
Počáteční průměr	0,49	0,53	0,50	0,61	0,45	1,10	0,36	2,48
Průměr po stárnutí	1,41	1,25	1,80	0,03	1,44	0,54	0,46	0,32
Směrodatná odchylka před stárnutím	0,16	0,14	0,20	0,09	0,30	1,19	0,28	2,79
Směrodatná odchylka po stárnutí	0,69	0,31	0,60	0,01	0,92	0,19	0,35	0,13
Průměrná relativní odchylka [%]	176	142	300	-94	237	115	37	-46

Tab. 15: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky nelinearity VA charakteristiky pro Loctite 3888 400 hodin

Loctite 3888 400 hodin								
Nelinearita VA char. [μ V]	Zlato				Měď			
Teplota/ relativní vlhkost	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%
Počáteční medián	0,88	0,36	1,03	4,10	0,29	1,26	0,32	0,23
Medián po stárnutí	0,75	0,97	0,12	0,03	0,55	0,92	0,37	0,39
Počáteční průměr	0,93	0,38	1,69	6,37	0,28	1,41	0,42	0,35
Průměr po stárnutí	0,63	0,99	0,23	0,03	0,51	1,13	0,34	0,42
Směrodatná odchylka před stárnutím	0,56	0,07	1,70	5,94	0,03	0,79	0,26	0,20
Směrodatná odchylka po stárnutí	0,35	0,07	0,29	0,01	0,13	0,44	0,24	0,22
Průměrná relativní odchylka [%]	65	167	-16	-96	69	-12	-12	36

Tab. 16: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky nelinearity VA charakteristiky pro Permacol 2369/2 168 hodin

Permacol 2369/2 168 hodin								
Nelinearita VA char. [μ V]	Zlato				Měď			
Teplota/ relativní vlhkost	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%
Počáteční medián	0,35	0,36	0,15	0,76	0,05	0,11	0,05	0,64
Medián po stárnutí	0,47	1,20	0,39	0,64	0,10	0,62	0,09	0,38
Počáteční průměr	0,60	0,35	0,13	0,74	0,05	0,14	0,06	0,63
Průměr po stárnutí	0,40	1,19	0,38	0,67	0,11	0,63	0,09	0,56
Směrodatná odchylka před stárnutím	0,45	0,45	0,05	0,20	0,01	0,10	0,02	0,29
Směrodatná odchylka po stárnutí	0,19	0,19	0,07	0,26	0,02	0,17	0,03	0,50
Průměrná relativní odchylka [%]	-29	322	265	24	99	683	58	55

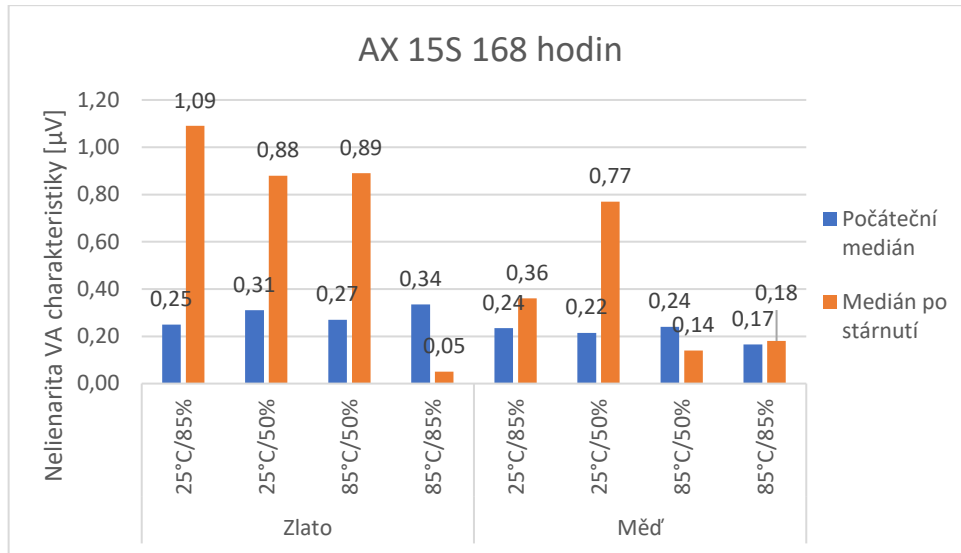
Tab. 17: Hodnoty mediánů, průměrů, směrodatných odchylek a průměrné relativní odchylky nelinearity VA charakteristiky pro Permacol 2369/2 400 hodin

Permacol 2369/2 400 hodin								
Nelinearita VA char. [μ V]	Zlato				Měď			
Teplota/ relativní vlhkost	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%	25°C/ 85%	25°C/ 50%	85°C/ 50%	85°C/ 85%
Počáteční medián	0,08	0,47	0,25	0,27	0,07	0,11	0,42	0,45
Medián po stárnutí	0,24	1,03	1,05	0,25	0,18	0,23	0,12	0,75
Počáteční průměr	0,09	0,83	0,27	0,29	0,08	0,13	0,42	0,91
Průměr po stárnutí	0,24	1,35	1,06	0,23	0,23	0,28	0,14	0,71
Směrodatná odchylka před stárnutím	0,04	1,08	0,08	0,09	0,04	0,09	0,08	0,94
Směrodatná odchylka po stárnutí	0,10	1,00	0,29	0,10	0,12	0,13	0,07	0,24
Průměrná relativní odchylka [%]	177	64	388	-33	176	234	-64	554

Hodnoty z tabulek 10-17 byly zpracovány do následujících grafů. U některých rezistorů jsou velké rozdíly mezi průměrem z naměřených dat a mediánem nelinearity VA charakteristiky, způsobených nějakou vadou. Tuto vadu nebylo možno odhalit vizuální kontrolou. Proto byly do grafů použity pouze mediány nelinearity VA charakteristiky. Grafy průměrů jsou uvedeny v příloze 13-16.

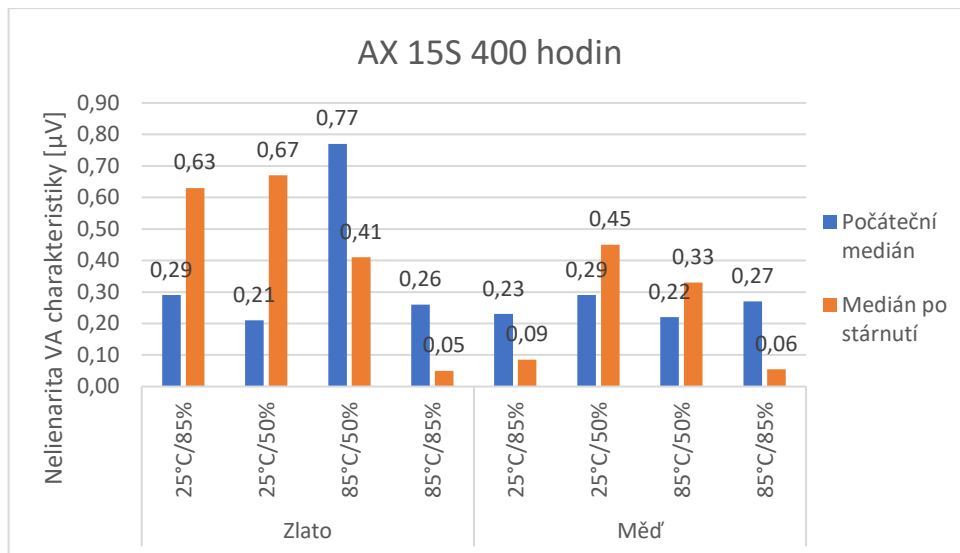
ELPOX AX 15S

Nelinearita VA charakteristiky spoje u adheziva AX 15S na desce s pozlacenými ploškami se při prvních třech namáháních výrazně zvětšila. Při kombinaci zvýšené teploty a vlhkosti naopak klesla skoro na nulu. Zato u desky s měděnými ploškami jsou změny podstatně méně radikální až na namáhání při pokojové teplotě, kde nelinearita VA charakteristiky vzrostla o 0,55 μV .



Obr. 29: Porovnání mediánů nelinearity VA charakteristiky ELPOX AX 15S 168 hodin

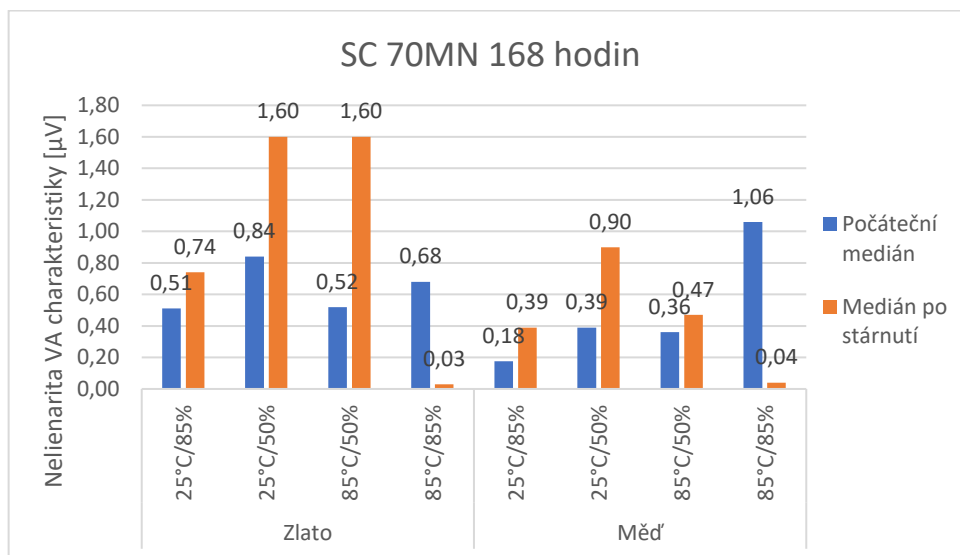
Při namáhání dlouhém 400 hodin se nelinearita VA charakteristiky spoje na desce s pozlacenými ploškami zvětšila při namáhání zvýšenou vlhkostí a při pokojových podmínkách o přibližně 0,4 μV . Při zvýšené teplotě naopak o 0,3 μV klesla. Při kombinaci zvýšené teploty a vlhkosti hodnota nelinearity VA charakteristiky spoje klesla skoro na nulu. U desky s měděnými ploškami poklesla na hodnotu blízkou nule při zvýšené vlhkosti a kombinaci zvýšené vlhkosti a teploty. U ostatních dvou namáhání je vidět mírný nárůst.



Obr. 30: Porovnání mediánů nelinearity VA charakteristiky ELPOX AX 15S 400 hodin

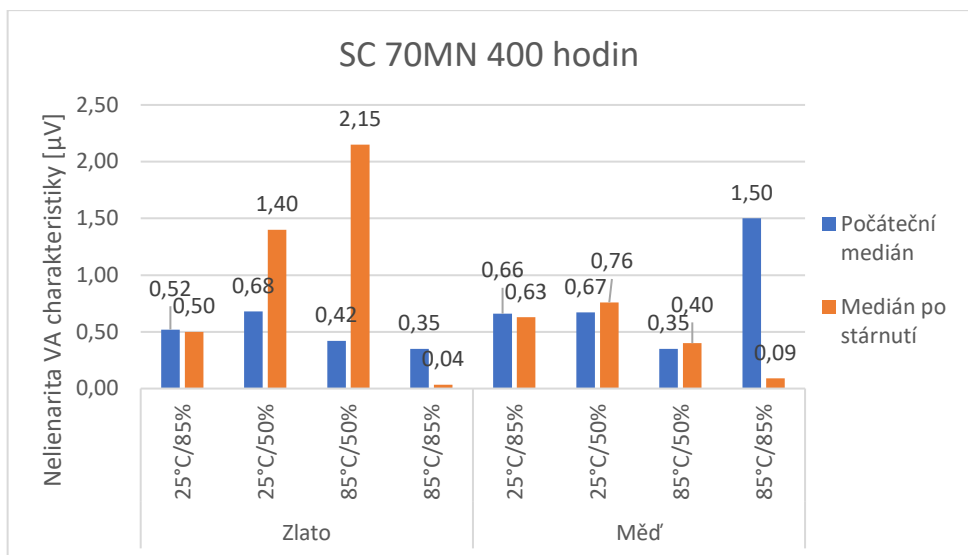
ELPOX SC 70MN

Při namáhání adheziva SC 70MN po dobu 168 hodin je vidět výrazný nárůst na desce s pozlacenými ploškami při namáhání zvýšenou teplotou a při pokojových podmínkách. Při zvýšené vlhkosti je patrný jen mírný nárůst. Obě desky při namáhání kombinací zvýšené teploty a vlhkosti vykazují nelinearitu VA charakteristiky blízkou nule. Na desce s měděnými ploškami je dále patrný značný nárůst při pokojových podmínkách.



Obr. 31: Porovnání mediánů nelinearity VA charakteristiky ELPOX SC 70MN 168 hodin

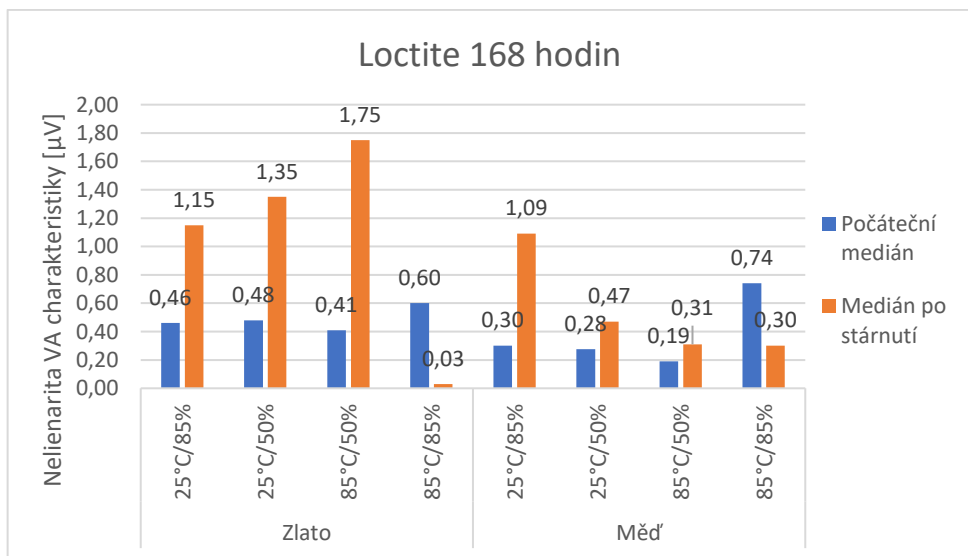
Při namáhání dlouhém 400 hodin jsou patrné velké změny u desky s pozlacenými ploškami při namáhání zvýšenou teplotou, kde vzrostla nelinearita VA charakteristiky na 2,15 µV a při pokojových podmínkách vzrostla na 1,4 µV. Při namáhání zvýšenou vlhkostí se nelinearita VA charakteristiky skoro nemění. Opět u obou desek při kombinaci zvýšené teploty a vlhkosti klesá hodnota nelinearity VA charakteristiky k nule. U spojů na desce s měděnými ploškami jinak nejsou patrné žádné výraznější změny oproti desce s pozlacenými ploškami.



Obr. 32: Porovnání mediánů nelinearity VA charakteristiky ELPOX SC 70MN 400 hodin

Loctite 3888

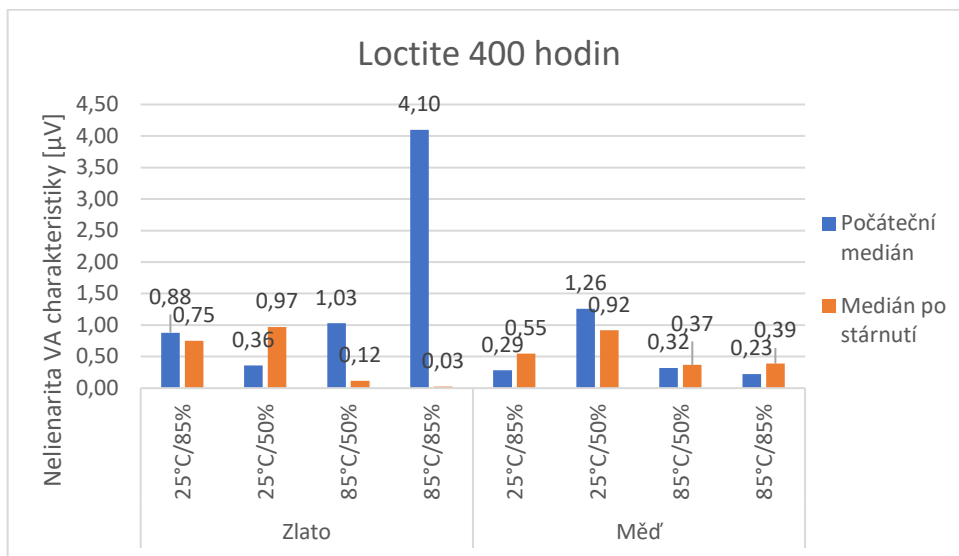
Při namáhání adheziva Loctite 3888 po dobu 168 hodin je na desce s pozlacenými ploškami patrný výrazný nárůst nelinearity VA charakteristiky při všech namáháních kromě kombinace zvýšené teploty a vlhkosti, u které hodnota klesá k nule. U spojů na desce s měděnými ploškami je nejvýraznější nárůst u namáhání zvýšenou vlhkostí. Dále při pokojových podmínkách je patrný mírný nárůst. Zato u kombinace zvýšené teploty a vlhkosti je výrazný pokles.



Obr. 33: Porovnání mediánů nelinearity VA charakteristiky Loctite 3888 168 hodin

U namáhání dlouhém 400 hodin je nejvýraznější změna u spojů na desce s pozlacenými ploškami, kdy hodnota nelinearity VA charakteristiky klesla z hodnoty 4,1 μV na hodnotu blízkou nule. Podobný jev nastal i při namáhání zvýšenou teplotou. Při pokojových podmínkách je vidět výrazný nárůst. Při zvýšené vlhkosti nastal jen mírný pokles. U spojů na desce s měděnými ploškami při zvýšené teplotě a kombinaci zvýšené teploty a vlhkosti se hodnoty skoro nezměnily.

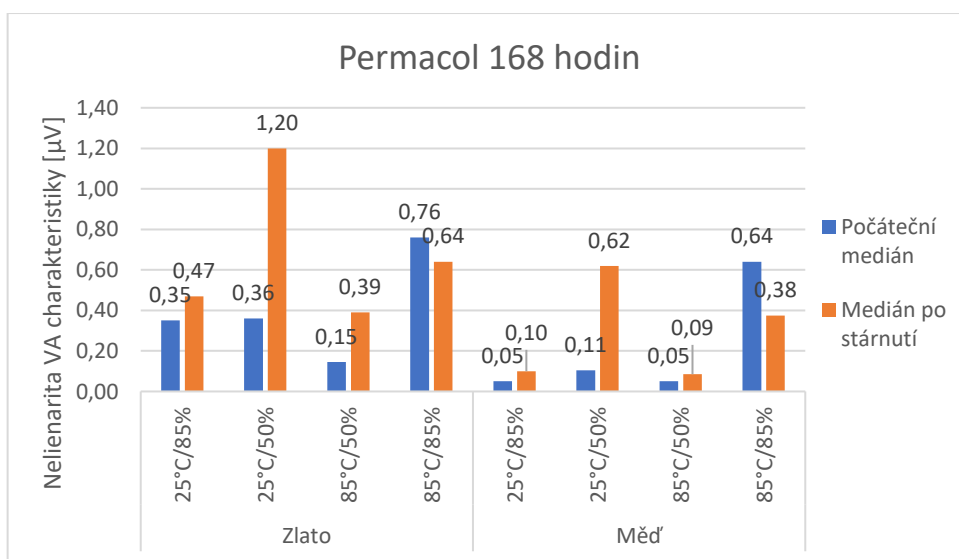
V pokojových podmínkách nastal mírný pokles a při namáhání zvýšenou vlhkostí naopak nastal mírný nárůst.



Obr. 34: Porovnání mediánů nelinearity VA charakteristiky Loctite 3888 400 hodin

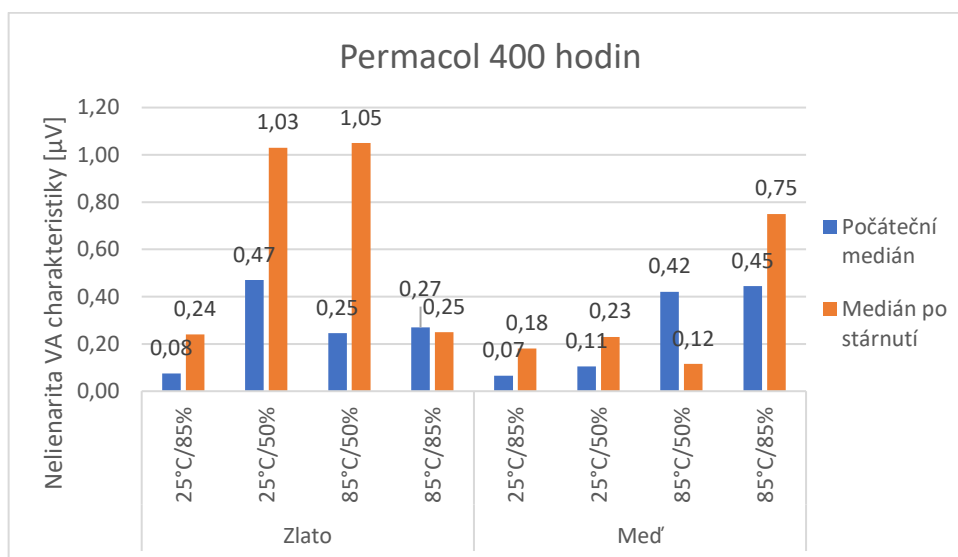
Permacol 2369/2

U adheziva Permacol při namáhání dlouhém 168 hodin je na desce s pozlacenými ploškami nejpatrnější nárůst při pokojových podmínkách. Další výrazný nárůst je při namáhání zvýšenou teplotou. Mírný nárůst hodnoty je patrný i u namáhání zvýšenou vlhkostí. Zato u kombinace zvýšené teploty a vlhkosti nastal mírný pokles. U spojů na desce s měděnými ploškami se hodnoty nelinearity VA charakteristiky při namáhání zvýšenou teplotou a namáhání zvýšenou vlhkostí blíží k nule. Opět je zde výrazný nárůst při pokojových podmínkách. Znatelný pokles nastal při kombinaci zvýšené teploty a vlhkosti.



Obr. 35: Porovnání mediánů nelinearity VA charakteristiky Permacol 2369/2 168 hodin

Při namáhání dlouhém 400 hodin nastaly u spojů na desce s pozlacenými ploškami největší změny při pokojových podmínkách a namáhání zvýšenou teplotou. Při namáhání zvýšenou vlhkostí také nastal nárůst ovšem méně výrazný. U kombinace zvýšené teploty a vlhkosti se hodnota nezměnila. Spoje na desce s měděnými ploškami vykazovaly menší změny než na desce s pozlacenými přípojovacími ploškami. Mírný nárůst nastal při namáhání zvýšenou vlhkostí a při pokojových podmínkách. Při kombinaci zvýšené teploty a vlhkosti nastal výrazný nárůst. Při namáhání zvýšenou teplotou naopak nastal výrazný pokles.



Obr. 36: Porovnání mediánů nelinearity VA charakteristiky Permacol 2369/2 168 hodin

2.5. Matematický model na základě naměřených hodnot

V této části práce byl sestaven matematický model jednotlivých adheziv pro jejich odpor a nelinearitu VA charakteristiky. Model byl sestaven z naměřených a vyrovnaných dat. Původní nevyrovnaná data jsou přiložena v příloze 1-4. Model byl sestaven pomocí faktorových experimentů 2³. Příklad výpočtu odporu je uveden pro adhezivo ELPOX AX 15S na pozlacených přípojovacích ploškách. Výpočty matematických modelů pro odpor a nelinearitu VA charakteristiky pro ostatní adheziva jsou uvedeny v přílohách 5-8.

Tab. 18: Soupis faktorů a jejich mezních hodnot

Faktor A	Čas	1	400	A2	X1
		-1	168	A1	
Faktor B	Teplota	1	85	B2	X2
		-1	25	B1	
Faktor C	Relativní vlhkost	1	85	C2	X3
		-1	50	C1	

Byl sestaven plán faktorových experimentů 2³

Tab. 19: Plán faktorových experimentů 2³

A1 = 168 hodin				A2 = 400 hodin			
B1 = 25°C		B2 = 85°C		B1 = 25°C		B2 = 85°C	
C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%
(1)	c	b	bc	a	ac	ab	abc
265	1313	403	1225	307	1071	1199	2931
183	536	421	6583	335	1145	603	4764
233	560	350	6221	170	721	498	4835
475	472	240	7481	179	1491	2299	3484
268	647	999	7642	273	2036	656	3195
250	703	930	3265	221	1980	713	3920
305	1821	715	3373	279	1961	279	3563
350	1604	905	2667	327	960	837	4476
2328	7656	4962	38455	2090	11364	7083	31166
R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8

Podle vzorce (1) byl vypočten celkový počet experimentů:

$$N = 8 * 8 = 64$$

Podle vzorce (2) byly spočítány součty sloupců R1, R2, ..., R8. Jako příklad je uveden výpočet součtu sloupce R1. Pro ostatní sloupce se postupuje analogicky.

$$R1 = 265 + 183 + 233 + 475 + 268 + 250 + 305 + 350 = 2328$$

Byl proveden výpočet odhadu vlivů faktorů a jejich interakce. Pro výpočet byly použity vzorce (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9). Jako příklad je uveden výpočet odhadu vlivu faktorů a interakcí Z_A. Pro ostatní odhady vlivu faktorů a jejich interakcí se postupuje analogicky.

$$Z_A = abc + ab + ac + a - bc - b - c - 1 =$$

$$31166 + 7083 + 11364 + 2090 - 38455 - 4962 - 7656 - 2328 = -1698$$

Dále byl proveden výpočet odhadu střední hodnoty podle vzorce (10)

$$m = \frac{105\ 101}{64} = 1642$$

Dále byl proveden výpočet složek součtu čtverců odchylek S₀, které charakterizují technologické faktory a jejich interakce podle vzorců (13), (14), (15), (16), (17), (18), (19). Jako příklad je uveden výpočet složky součtů čtverců odchylek S_A.

$$S_A = \frac{(-1698)^2}{64} = 45050$$

Tab. 20: Vypočtené hodnoty odhadů vlivů a složek součtů čtverců odchylek

ZA	-1698	SA	45050,06
ZB	58229	SB	52978382
ZC	72178	SC	81400995
ZAB	-8638	SAB	1165860
ZAC	-5463	SAC	466318,3
ZBC	42974	SBC	28855698
ZABC	-13355	SABC	2786813

Dále se podle vzorce (11) vypočte součet čtverců odchylek mezi naměřenými daty a celkovou střední hodnotou S_0 .

$$S_0 = 45050 + 52978382 + 81400995 + 1165860 + 466318,3 + 28855698 + 2786813 = 1,6 * 10^8$$

Dále byl vypočten reziduální součet čtverců odchylek podle vzorce (12). Pro snadnější výpočet byla vytvořena tabulka rozdílů uvnitř sloupců. Tyto hodnoty vyjadřují rozdíl naměřené hodnoty od průměrné hodnoty daného sloupce.

Tab. 21: Tabulka rozdílů naměřených hodnot od průměrné hodnoty sloupce

Rozdíly uvnitř sloupců								
-25,9	356,1	-217,3	-3581,8	45,8	-349,4	313,7	-964,8	1
-108,4	-420,9	-199,3	1775,7	73,8	-275,9	-282,3	867,8	2
-58,4	-396,9	-270,8	1413,7	-91,2	-699,4	-387,3	939,3	3
184,1	-484,9	-380,3	2673,7	-82,7	70,1	1413,2	-411,8	4
-22,9	-309,9	378,3	2835,2	11,8	615,1	-229,3	-701,3	5
-40,9	-253,9	309,8	-1541,8	-40,7	559,6	-172,8	23,8	6
14,1	863,6	94,8	-1434,3	17,3	540,6	-606,3	-332,8	7
58,6	647,1	284,8	-2140,3	65,8	-460,4	-48,8	579,8	8
291	957	620	4807	261	1420	885	3896	Průměry sloupců

Výsledný reziduální součet čtverců odchylek je tedy $S_R=53263706$. Dále byl vypočítán počet stupňů volnosti ze vztahu (27).

$$v = 8 * (8 - 1) = 56$$

Dále byly vypočteny testované charakteristiky F pro technologické faktory a jejich interakce podle vzorců (20), (21), (22), (23), (24), (25), (26). Jako příklad je uveden výpočet testované charakteristiky F pro faktor A. Testové charakteristiky pro ostatní faktory a jejich interakce se vypočítaly analogicky.

$$F_A = \frac{45050}{\frac{53263706}{56}} = 0,047$$

Vypočtená hodnota se porovnává s hodnotu kritické hodnoty F rozdělení $F_\alpha(1, v)$, která byla odečtena z tabulek $F_\alpha = 4,012973$. Hladina významnosti byla zvolena $\alpha=0,05$. V tab. 37 jsou

uvedeny testované charakteristiky F pro jednotlivé faktory a jejich kombinace a jejich porovnání s hodnotou kritické hodnoty F_{α} .

Tab. 22: Porovnání testové charakteristiky F

Testované char. F		Je faktor nebo interakce statisticky významný? 1=ano, 0=ne *
FA	0,047	0
FB	55,70	1
FC	85,58	1
FAB	1,23	0
FAC	0,49	0
FBC	30,34	1
FABC	2,93	0

*Statisticky významný faktor musí být zahrnut do modelu

Bylo nutné transformovat jednotlivé faktory na bezrozměrné veličiny podle vztahu (28).

$$X_1 = \frac{A - 284}{100}, \quad X_2 = \frac{B - 55}{30}, \quad X_3 = \frac{A - 135}{2} * \frac{2}{35}$$

Byl určen tvar lineárního matematického modelu pro technologický proces podle vzorce (29).

V tomto případě měl teoretický tvar:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1 X_2 + \beta_5 X_1 X_3 + \beta_6 X_2 X_3 + \beta_7 X_1 X_2 X_3$$

Výpočtem byly získány nejlepší odhady neznámých koeficientů $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7$. Po dosazení do matematického modelu:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_1 X_2 + b_5 X_1 X_3 + b_6 X_2 X_3 + b_7 X_1 X_2 X_3$$

K určení velikosti koeficientů $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7$, byly použity vzorce (41), (42). Jako příklad je uveden výpočet koeficientu b_1 .

$$b_1 = \frac{-1698}{64} = -26,5$$

Tab. 23: Vypočtené koeficienty

Výpočet koeficientů	
b0	1642,2
b1	-26,5
b2	909,8
b3	1127,8
b4	-135,0
b5	-85,4
b6	671,5
b7	-208,7

Bylo nutné vypočítat součet čtverců odchylek naměřených dat a model S_s podle vzorce (45). Pro zjednodušení byly spočítány výsledky modelu pro jednotlivé kombinace. Jako příklad je uveden výpočet pro kombinaci a .

$$Y_a = 1642,2 + 909,8 * (-1) + 1127,8 * (-1) + 671,5 * 1 = 276,1$$

Tab. 24: Výstupy modelu pro jednotlivé kombinace

Kombinace	Výstup modelu	x1	x2	x3	x1x2	x1x3	x2x3	x1x2x3
(1)	276,1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
a	276,1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
b	752,8	-1	1	-1	-1	1	-1	1
c	1188,7	-1	-1	1	1	-1	-1	1
ab	752,8	1	1	-1	1	-1	-1	-1
ac	1188,7	1	-1	1	-1	1	-1	-1
bc	4351,3	-1	1	1	-1	-1	1	-1
abc	4351,3	1	1	1	1	1	1	1

Pro další zjednodušení výpočtu byla vytvořena tabulka rozdílů naměřených hodnot od výstupu modelu pro jednotlivé kombinace. Hodnota v prvním sloupci a prvním řádku se spočítá následovně: Naměřená hodnota-Výstup modelu u kombinace 1.

$$-11,1 = 265 - 276,1$$

Tab. 25: Rozdíly naměřených hodnot od modelu

Rozdíly od modelu								
(1)	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
-11,1	124,3	-349,8	-3126,3	30,9	-117,7	446,2	-1420,3	1
-93,6	-652,7	-331,8	2231,2	58,9	-44,2	-149,8	412,2	2
-43,6	-628,7	-403,3	1869,2	-106,1	-467,7	-254,8	483,7	3
198,9	-716,7	-512,8	3129,2	-97,6	301,8	1545,7	-867,3	4
-8,1	-541,7	245,7	3290,7	-3,1	846,8	-96,8	-1156,8	5
-26,1	-485,7	177,2	-1086,3	-55,6	791,3	-40,3	-431,8	6
28,9	631,8	-37,8	-978,8	2,4	772,3	-473,8	-788,3	7
73,4	415,3	152,2	-1684,8	50,9	-228,7	83,7	124,2	8

Dále se vypočítá výsledný součet odchylek naměřených hodnot a modelu S_s jako suma čtverců hodnot v tabulce 40.

$$S_s = 57727747$$

Nakonec byla vypočítána hodnota testové charakteristiky podle vzorce (36). Podmínka u vzorce (36) byla splněna $64 \geq 4$.

$$\bar{F} = \frac{\frac{57727747}{60}}{\frac{53263706}{56}} = 1,01155$$

Tato vypočtená hodnota byla porovnána s kritickou hodnotou F-rozdělení $F_{\alpha} = 1,54911$. Pro model adheziva ELPOX AX 15S tento matematický model popisuje s dostatečnou přesností.

Výsledný matematický model pro bezrozměrné vstupní parametry adheziva ELPOX AX 15S na pozlacené tedy je:

$$Y = 1642,2 + 909,8 * x_2 + 1127,8 * x_3 + 671,5 * x_2 * x_3$$

Výsledný matematický model po zpětné transformaci na vstupní parametry adheziva ELPOX AX 15S na desce s pozlacenými připojovacími ploškami tedy je:

$$Y_{AX15SRZ} = 1642,2 + 30,33 * (-55 + B) + 64,45 * \left(C - \frac{135}{2}\right) + 1,28 * (-55 + B) * \left(C - \frac{135}{2}\right)$$

Zde $Y_{AX15SRZ}$ = $Y_{\text{adhezivo, R-odpor nebo N-nelinearita, Z - zlato nebo M-měď}}$

Pro všechna testovaná adheziva byl sestaven dostatečně přesný matematický model odporu a nelinearity VA charakteristiky.

2.5.1. Stanovení modelů

Při stanovení matematických modelů se postupovalo analogicky, jak je naznačeno v kap. 2.5. Zde jsou uvedeny pouze výsledné matematické modely pro jednotlivá adheziva. Označení modelů je následující $Y_{\text{adhezivo, R-odpor nebo N-nelinearita, Z - zlato nebo M-měď}}$.

ELPOX AX 15S

Matematický model odporů adheziva ELPOX AX 15S na desce s pozlacenými připojovacími ploškami:

$$Y_{AX15SRZ} = 1642,2 + 30,33 * (-55 + B) + 64,45 * \left(C - \frac{135}{2}\right) + 1,28 * (-55 + B) * \left(C - \frac{135}{2}\right)$$

Matematický model odporů adheziva ELPOX AX 15S na desce s měděnými přípojevacími ploškami:

$$\begin{aligned}
 Y_{AX15SRM} = & 2176,3 + 8,56 * (-284 + A) + 41,44 * (-55 + B) + \\
 & +0,28 * (-284 + A) * (-55 + B) + 94,89 * \left(-\frac{135}{2} + C\right) + \\
 & +0,48 * (-284 + A) * \left(-\frac{135}{2} + C\right) + 1,77 * (-55 + B) * \left(-\frac{135}{2} + C\right) + \\
 & +0,02 * (-284 + A) * (-55 + B) * \left(-\frac{135}{2} + C\right)
 \end{aligned}$$

Matematický model nelinearity VA charakteristiky adheziva ELPOX AX 15S na desce s pozlacenými přípojevacími ploškami:

$$\begin{aligned}
 Y_{AX15SNZ} = & 0,603 - 1,1 * 10^{-3} * (-284 + A) - 6,5 * 10^{-3} * (-55 + B) - \\
 & -11,2 * 10^{-3} * \left(-\frac{135}{2} + C\right) - 3,1 * 10^{-4} * (-55 + B) * \left(-\frac{135}{2} + C\right) + \\
 & +1,9 * 10^{-6} * (-284 + A) * (-55 + B) * \left(-\frac{135}{2} + C\right)
 \end{aligned}$$

Matematický model nelinearity VA charakteristiky adheziva ELPOX AX 15S na desce s měděnými přípojevacími ploškami:

$$\begin{aligned}
 Y_{AX15SNM} = & 0,313 - 8,9 * 10^{-4} * (-284 + A) - 4,5 * 10^{-3} * (-55 + B) + \\
 & +3,1 * 10^{-5} * (-284 + A) * (-55 + B) - 8,9 * 10^{-3} * \left(-\frac{135}{2} + C\right) + \\
 & +1,6 * 10^{-4} * (-55 + B) * \left(-\frac{135}{2} + C\right) - \\
 & -1 * 10^{-6} * (-284 + A) * (-55 + B) * \left(-\frac{135}{2} + C\right)
 \end{aligned}$$

ELPOX SC 70MN

Matematický model odporů adheziva ELPOX SC 70MN na desce s pozlacenými přípojevacími ploškami:

$$\begin{aligned}
 Y_{SC70MNRZ} = & 705,4 + 1,4 * (-284 + A) + 6,77 * (-55 + B) + \frac{178}{7} * \left(-\frac{135}{2} + C\right) + \\
 & +0,11 * (-284 + A) * \left(-\frac{135}{2} + C\right) + 0,31 * (-55 + B) * \left(-\frac{135}{2} + C\right)
 \end{aligned}$$

Matematický model odporů adheziva ELPOX SC 70MN na desce s měděnými přípojovacími ploškami:

$$Y_{SC70MNRM} = 510 + 9,97 * (-55 + B) + 21,7 * \left(-\frac{135}{2} + C\right) + \\ + 0,58 * (-55 + B) * \left(-\frac{135}{2} + C\right)$$

Matematický model nelinearity VA charakteristiky adheziva ELPOX SC 70MN na desce s pozlacenými přípojovacími ploškami:

$$Y_{SC70MNNZ} = 1,109 - 5,6 * 10^{-3} * (-55 + B) - 0,032 * \left(-\frac{135}{2} + C\right) - \\ - 6,5 * 10^{-4} * (-55 + B) * \left(-\frac{135}{2} + C\right) - \\ - 3,2 * 10^{-6} * (-284 + A) * (-55 + B) * \left(-\frac{135}{2} + C\right)$$

Matematický model nelinearity VA charakteristiky adheziva ELPOX SC 70MN na desce s měděnými přípojovacími ploškami:

$$Y_{SC70MNNM} = 0,439 - 5,9 * 10^{-3} * (-55 + B) - 0,01 * \left(-\frac{135}{2} + c\right) + \\ + 2,5 * 10^{-5} * (-284 + A) * \left(-\frac{135}{2} + c\right)$$

Loctite 3888

Matematický model odporů adheziva Loctite 3888 na desce s pozlacenými přípojovacími ploškami:

$$Y_{LocRZ} = 649,4 + \frac{111}{50} * (-284 + A) + 15,59 * (-55 + B) + \\ + 0,07 * (-284 + A) * (-55 + B) + 9,3 * \left(-\frac{135}{2} + c\right)$$

Matematický model odporů adheziva Loctite 3888 na desce s měděnými přípojovacími ploškami:

$$Y_{LocRM} = 613,5 + 14,9 * (-55 + B) - 0,18 * (-284 + A) * \left(-\frac{135}{2} + c\right) - \\ - 0,006 * (-284 + A) * (-55 + B) * \left(-\frac{135}{2} + c\right)$$

Matematický model nelinearity VA charakteristiky adheziva Loctite 3888 na desce s pozlacenými připojovacími ploškami:

$$\begin{aligned}
 Y_{LocNZ} = & 0,797 - 3,3 * 10^{-3} * (-284 + A) - 9,1 * 10^{-3} * (-55 + B) - \\
 & -15,5 * 10^{-3} * \left(-\frac{135}{2} + C\right) + 7,6 * 10^{-5} * (-284 + A) * \left(-\frac{135}{2} + C\right) - \\
 & -4,2 * 10^{-4} * (-55 + B) * \left(-\frac{135}{2} + C\right) + \\
 & +5 * 10^{-6} * (-284 + A) * (-55 + B) * \left(-\frac{135}{2} + C\right)
 \end{aligned}$$

Matematický model nelinearity VA charakteristiky adheziva Loctite 3888 na desce s měděnými připojovacími ploškami:

$$\begin{aligned}
 Y_{LocNM} = & 0,652 - 8,4 * 10^{-3} * (-55 + B) - 8,8 * 10^{-5} * (-284 + A) * \left(-\frac{135}{2} + C\right) + 4,2 \\
 & * 10^{-6} * (-284 + A) * (-55 + B) * \left(-\frac{135}{2} + C\right)
 \end{aligned}$$

Permacol 2369/2

Matematický model odporů adheziva Permacol 2369/2 na desce s pozlacenými připojovacími ploškami:

$$Y_{PermaRZ} = 278 + \frac{62}{15} * (-55 + B) + 8,5 * \left(-\frac{135}{2} + C\right) + 0,3 * (-55 + B) * \left(-\frac{135}{2} + C\right)$$

Matematický model odporů adheziva Permacol 2369/2 na desce s měděnými připojovacími ploškami:

$$\begin{aligned}
 Y_{PermaRM} = & 649,1 + 2,1 * (-284 + A) + 7,6 * (-55 + B) + \\
 & +0,08 * (-284 + A) * (-55 + B) + 13,4 * \left(-\frac{135}{2} + C\right) + \\
 & +0,07 * (-284 + A) * \left(-\frac{135}{2} + C\right) + 0,34 * (-55 + B) * \left(-\frac{135}{2} + C\right) + \\
 & +0,003 * (-284 + A) * (-55 + B) * \left(-\frac{135}{2} + C\right)
 \end{aligned}$$

Matematický model nelinearity VA charakteristiky adheziva Permacol 2369/2 na desce s pozlacenými připojovacími ploškami:

$$Y_{PermaNZ} = 0,69 - 0,017 * \left(-\frac{135}{2} + C\right) - 1 * 10^{-4} * (-284 + A) * \left(-\frac{135}{2} + C\right) + \\ + 3,2 * 10^{-4} * (-55 + B) * \left(-\frac{135}{2} + C\right)$$

Matematický model nelinearity VA charakteristiky adheziva Permacol 2369/2 na desce s měděnými připojovacími ploškami:

$$Y_{PermaNM} = 0,3 + 2,5 * 10^{-5} * (-284 + A) * (-55 + B) + 2,6 * 10^{-3} * \left(-\frac{135}{2} + C\right) + \\ + 5,3 * 10^{-5} * (-284 + A) * \left(-\frac{135}{2} + C\right) + 3,7 * 10^{-4} * (-55 + B) * \left(-\frac{135}{2} + C\right)$$

2.5.2. Ověření přesnosti modelů

Pro ověření přesnosti modelů byla jedna deska s měděnými připojovacími ploškami a jedna deska s pozlacenými připojovacími ploškami od každého adheziva namáhána po dobu 170 hodin teplotou 60 °C a relativní vlhkostí 50 %. Z naměřených hodnot byl vypočítán medián a porovnán s teoretickou hodnotou vypočítanou pomocí faktorových experimentů.

V tab. 25 jsou teoretické a naměřené hodnoty odporu a nelinearity VA charakteristiky. Pro adhezivum ELPOX AX 15S na desce s pozlacenými připojovacími ploškami má nejmenší relativní odchylku mezi modelovými a naměřenými hodnotami ze všech testovaných adheziv. Relativní odchylka mezi teoretickými a naměřenými hodnotami je 6 % pro model výpočtu odporu a 7 % pro model výpočtu nelinearity VA charakteristiky. U téhož adheziva na desce s měděnými připojovacími ploškami je už rozdíl mezi teoretickými a naměřenými hodnotami znatelnější. Relativní odchylka mezi teoretickými a naměřenými hodnotami je 25 % pro model výpočtu odporu a -24 % pro model výpočtu nelinearity VA charakteristiky.

Matematický model výpočtu odporu pro adhezivum ELPOX SC 70MN na desce s pozlacenými připojovacími ploškami má větší relativní odchylku mezi modelovými a naměřenými hodnotami, než u adheziva ELPOX AX 15S jeho relativní odchylka je 14 %. Model pro výpočet nelinearity VA charakteristiky má velkou relativní odchylku. Rozdíl mezi naměřenou a teoretickou hodnotou je 0,71 μV, relativní odchylka je 80 %. Model odporu na desce s měděnými připojovacími ploškami má relativní odchylku -29 %. Model nelinearity VA charakteristiky na desce s měděnými připojovacími ploškami má menší relativní odchylku, než model odporu na téže desce, relativní odchylka modelu nelinearity VA charakteristiky je 15 %.

U adheziva Loctite 3888 má stanovený model výpočtu odporu na obou deskách velkou relativní odchylku. U modelu výpočtu odporu na desce s pozlacenými připojovacími ploškami je relativní odchylka 94 %. Model výpočtu nelinearity VA charakteristiky na desce s pozlacenými připojovacími ploškami má relativní odchylku 58 %. Model výpočtu odporu pro měděnou desku má relativní odchylku 68 %. U modelu výpočtu nelinearity VA charakteristiky pro měděnou desku má menší relativní odchylku než pro pozlacenou desku, relativní odchylka je -11 %.

Druhý model výpočtu odporu s nejmenší relativní odchylkou byl sestaven pro adhezivum Permacol 2369/2 na desce s pozlacenými připojovacími ploškami. U tohoto adheziva na desce s pozlacenými připojovacími ploškami je rozdíl mezi teoretickými a naměřenými hodnotami minimální, jeho relativní odchylka je -8 %. Oproti tomu model výpočtu odporu na desce s měděnými připojovacími ploškami má větší relativní odchylku -26 %. Nejmenší relativní odchylku ze všech adheziv má model výpočtu nelinearity VA charakteristiky na desce s pozlacenými připojovacími ploškami, relativní odchylka je 4 %. Relativní odchylka modelu výpočtu nelinearity VA charakteristiky na desce s měděnými připojovacími ploškami je -37 %.

Tab. 26: porovnání teoretických a naměřených hodnot a jejich relativní odchylka

	Teoretický odpor [mΩ]	Naměřený odpor [mΩ]	Relativní odchylka odporů [%]	Teoretická nelinearita VA char. [μV]	Naměřená nelinearita VA char. [μV]	Relativní odchylka nel. VA char. [%]
AX 15S zlato	554	521	6	0,92	0,86	7
AX 15S měď	558	445	25	0,5	0,66	-24
SC 70MN zlato	320	280	14	1,6	0,89	80
SC 70MN měď	130	182	-29	0,62	0,54	15
Loctite zlato	311	160	94	1,5	0,95	58
Loctite měď	333	198	68	0,49	0,55	-11
Permacol zlato	125	136	-8	0,78	0,75	4
Permacol měď	322	437	-26	0,33	0,52	-37

2.6. Diskuze výsledků

Z hlediska počátečních odporů adhezních spojů je možné konstatovat, že s výjimkou adheziva Permacol 2369/2 byly počáteční odpory spojů vytvořených na Cu připojovacích ploškách nižší než u spojů vytvořených na pozlacených připojovacích ploškách. Důvodem zde může být kvalita kontaktů mezi mědí a zlatou vrstvou. Bylo zjištěno, že směrodatné odchylky vypočtené z hodnot odporů před stárnutím jsou ve většině případů značně nižší než směrodatné odchylky po stárnutí. A to nezávisle na typu povrchu, na kterém byly spoje vytvořeny. Ze všech použitých typů klimatických stárnutí vyplynulo, že spoje jsou nejvíce degradovány při kombinaci zvýšené teploty a zvýšené vlhkosti. Ve všech případech odpor spoje narůstá. To je způsobeno tím, že při stárnutí dochází k difuzi molekul vody do matrice adhezního spoje, což způsobuje vznik chemických reakcí, jejichž výsledkem jsou vrstvy, které zhoršují kontakty mezi částicemi vodivého plniva, mezi částicemi vodivého plniva a kontaktem vývodu nulového odporu a mezi částicemi vodivého plniva a připojovací ploškou [11]. Protože spoje nebyly připravovány automaticky (osazení nulových rezistorů bylo provedeno na ručním osazovacím manipulátoru), dochází zde k rozptylu hodnot jednotlivých spojů. Při tepelném stárnutí v běžné relativní vlhkosti nedocházelo u adheziv s výjimkou adheziva Loctite 3888 k významným změnám odporů spojů. U adheziva Loctite 3888 došlo ke značnému nárůstu odporu jak na pozlacených připojovacích ploškách, tak na měděných připojovacích ploškách. Tato situace je poněkud překvapivá, protože při dotvrzování adheziv dochází zpravidla k vyššímu stupni jejich prosítování, což je spojeno se zmenšením jejich objemu. Tím se vylepšují kontakty mezi částicemi plniva i kontakty mezi těmito částicemi, kontaktní ploškou a kontaktem (vývodem) připojené součástky. To mívá za následek snížení odporu adhezního spoje. V případě adheziva Loctite 3888 zřejmě došlo již k počátku degradace adheziva, což se projevilo nárůstem odporu spojů.

Výsledky získané měřením nelinearity adhezních spojů jasně deklarují nehomogenitu vytvořených spojů. Protože nelinearita VA charakteristiky daleko citlivěji reaguje na změny ve spojích než hodnota jejich odporu, mají hodnoty tohoto parametru větší rozptyl než hodnoty odporu. Obecně lze konstatovat, že nelinearita u většiny spojů vytvořených na pozlaceném povrchu je vyšší než hodnota tohoto parametru na měděném povrchu. Na této skutečnosti se zřejmě podílí nelinearita kontaktu mezi zlatou vrstvou nanesenou na měděnou připojovací plošku. Protože nelinearita adhezních spojů je závislá zejména na podílu tunelového mechanismu na celkové vodivosti adhezního spoje, pak pokles tohoto parametru znamená, že ve výsledné vodivosti spoje začíná dominovat jiný typ vodivostního mechanismu. Tato skutečnost většinou nastala u spojů vytvořených na pozlacených ploškách po stárnutí ve zvýšené teplotě a zvýšené vlhkosti. Příčinou této skutečnosti může být, že dotvrzování zvýšenou teplotou převážilo nad degradací tunelových bariér vyvolanou navlháním matrice. Tato úvaha je však spekulativní a těmito změnami se bude třeba ještě v budoucnosti podrobněji zabývat.

Bylo zjištěno, že je velmi slabá souvislost mezi změnou nelinearity spojů a změnou jejich odporu. Důvodem je, že zatímco odpor je výsledkem všech možných typů vodivostních mechanismů, které se ve spoji vyskytují (přímý kovový kontakt, iontová migrace, tunelování, úžinový jev...), nelinearita odráží zejména nelineární mechanismy vodivosti. Nejvýznamnějším z těchto mechanismů je tunelování.

Ověřování přesnosti matematických modelů bylo provedeno jedním dodatečným měřením. To ukázalo různou přesnost jednotlivých modelů. Přestože všechny modely měly při F testu statisticky zanedbatelnou odchylku mezi modelem a naměřenými hodnotami a byly tedy akceptovatelné, ukázalo se, že pro dané měření mají v některých případech značnou relativní odchylku od naměřených hodnot. To však nesnižuje kvalitu modelu, protože pro korektní kvalifikaci by bylo třeba ověřovat model větším počtem měření. To by snížilo možnou chybu, která se může objevit při daném jednom konkrétním měření.

3. Závěr

V práci byla obecně popsána elektricky vodivá lepidla a podrobněji popsány anizotropně a izotropně vodivá lepidla a jejich vlastnosti. Dále byly prezentovány metody pro hodnocení vlivu klimatické zátěže na kvalitu adhezního vodivého spoje. Podrobně bylo popsáno také samotné klimatické testování. Na tuto teoretickou analýzu pak navázalo vlastní testování experimentální části. Byl uveden princip faktorových experimentů a postup při výpočtu matematického modelu pomocí těchto experimentů. Pro experimentální část práce byly navrženy a vyrobeny desky plošných spojů, které byly uzpůsobeny pro čtyřvodičovou metodu měření odporu a nelinearity adhezních spojů. Byla provedena montáž nulových odporů a tím byly vytvořeny adhezní spoje pro testování.

Spoje byly vytvořeny na měděném a na pozlaceném měděném povrchu. Zlacení bylo provedeno chemicky a tloušťka zlaté vrstvy byla přibližně 5 μm .

Pak byl změřen odpor a nelinearita VA charakteristiky adhezních spojů. Hodnoty odporu před namáháním se pohybují v rozmezí od 62 $\text{m}\Omega$ do 402 $\text{m}\Omega$. Hodnoty nelinearity VA charakteristiky měly před namáháním značný rozptyl a pohybovaly se od 0,05 μV do 4,1 μV .

Adhezní spoje byly stárnuty ve čtyřech typech klimatu. Po stárnutí byl opět změřen odpor a nelinearita adhezních spojů. Všechny testované adhezní spoje nejvíce degradovaly při kombinaci teploty 85 $^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkosti 85 %, až na adhezivo Loctite 3888, které obdobně degradovalo i při namáhání teplotou 85 $^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkostí 50 %. Degradace byla tak značná, že spoje takovýchto vlastností by v řadě elektronických zařízení již způsobily jejich poruchu.

Ve většině případů bylo o něco lepších výsledků dosahováno u spojů realizovaných na měděném povrchu. V případě adheziva ELPOX AX 15s a Permacol 2369/2 je nárůst odporu po stárnutí v 85 $^{\circ}\text{C}$ / 85% na mědi větší než na pozlaceném povrchu. Je třeba také konstatovat, že poměr mezi změnami při jednotlivých typech stárnutí spojů realizovaných na pozlaceném a měděném povrchu se mění i v průběhu stárnutí. Například u adheziva ELPOX AX 15s je po době stárnutí 168 hodin větší změna v případě stárnutí 85 $^{\circ}\text{C}$ /85% u spojů vytvořených na pozlaceném povrchu než u měděných, zatímco po 400 hodinách stárnutí za stejných podmínek je tomu naopak.

U nelinearity VA charakteristiky byl po klimatickém namáhání rozptyl hodnot značný. Opět lze souhrnně konstatovat, že změny po klimatickém namáhání byly u spojů vytvořených na pozlaceném povrchu větší než u spojů na měděném povrchu. Příčiny těchto změn byly podrobně diskutovány výše. Jako základní důvod zde vidím nelinearitu, která vzniká mezi zlatou vrstvou a měděnou připojovací ploškou, případně mezi lepidlem a kontaktem nulového odporu. Nedá se přesněji určit, které klimatické stárnutí má na míru nelinearity VA charakteristiky největší vliv.

U spojů vytvořených z různých typů lepidel a na různých typech povrchu byla reakce na různé typy namáhání značně odlišná. Z relativních změn u jednotlivých typů lepidel a jednotlivých typů stárnutí lze usuzovat na použitelnost při různém typu klimatického zatěžování.

Byl vytvořen matematický model pro výpočet odporu a nelinearity VA charakteristiky v závislosti na klimatickém namáhání pomocí faktorových experimentů. Pro ověření bylo provedeno další klimatické stárnutí s parametry ležícími v oblasti mezi extrémními hodnotami použitými při tvorbě matematického modelu, tedy mezi mezními hodnotami času, teploty a vlhkosti. Nejmenší odchylka tohoto ověřovacího měření byla zjištěna mezi modelovou a naměřenou hodnotou pro adhezivo ELPOX AX 15S na pozlaceném povrchu. Velikost této odchylky mezi modelovou hodnotou a naměřenou byla 6 %. Největší odchylka mezi modelovou a naměřenou hodnotou byla v případě adheziva Loctite 3888 na pozlaceném povrchu. Pro výpočet nelinearity VA charakteristiky byl nejmenší rozdíl mezi modelovou a naměřenou hodnotou zjištěn pro Permacol 2369/2 na pozlaceném povrchu, u kterého byla relativní odchylka teoretické a naměřené hodnoty 4 %. Největší odchylka mezi modelovou a naměřenou hodnotou byla zjištěna pro adhezivo ELPOX SC 70MN na pozlaceném povrchu. Je však třeba poznamenat, že s ohledem na rozptyl měřených hodnot odporu spojů by korektní zhodnocení kvality modelu vyžadovalo provedení řady dalších měření za různých podmínek, což by mohlo být dobrým tématem pro následující diplomovou práci.

Diplomová práce ukázala vlastnosti lepených spojů za různých klimatických podmínek na dvou různých typech povrchů. Vytvoření matematických modelů vytvořilo podmínky pro hlubší studium i lepší teoretický popis změn vyvolaných klimatickou zátěží spojů a vlivu povrchu připojovací plošky, na které byly spoje vytvořeny.

Seznam použité literatury

- [1] ALAM, M. O. a Christopher BAILEY. *Advanced adhesives in electronics: materials, properties and applications*. 1st pub. Cambridge: Woodhead, 2011. ISBN 9781845695767.
- [2] MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 2001. ISBN 9788001023921.
- [3] BOLCEK, Martin. *Aplikace lepidel v mikroelektronických sestavách*. Brno, 2017. Bakalářská práce. VUT v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [4] ŽALSKÁ, Pavlína. *Porovnání pájek a elektricky vodivých lepidel*. Praha, 2014. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D.
- [5] MACH, Pavel. *Modifikovaná elektricky vodivá lepidla*. Electroscope [online]. 2009, (2) [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: http://ek702p10-ket.fel.zcu.cz/images/PDF/Rocnik2009/cislo2_2009_Diagnostika/r3c2c7.pdf
- [6] POŘÍZEK, Michal. *Elektricky vodivá lepidla*. Zlín, 2016. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta aplikované informatiky.
- [7] KULHAVÝ, Jan. *Studie růstu dendritů na deskách plošných spojů*. Praha, 2017. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Fakulta elektrotechnická.
- [8] LAUKO, Marek. *Degradace elektrovodivých lepidel*. Praha, 2014. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Fakulta elektrotechnická.
- [9] MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. *Statistické zpracování experimentálních dat v chemometrii, biometrii, ekonometrii a v dalších oborech přírodních, technických a společenských věd*. 2. vyd., East Publishing, 1998. ISBN 9788072190034.
- [10] STREJČEK, Jindřich. *Dimenzování proudových vodičů tlustovrstvých obvodů*. Brno, 2010. Bakalářská práce. VUT v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [11] SAARINE, K., FRISK, L. : Changes in Adhesion of Non-Conductive Adhesives Attachments During Humidity Test, IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Vol. 1, No. 7, 2011, pp. 1082-1088
- [12] MACH, Pavel. *Základní pojmy z problematiky jakosti. ISO 9000. Faktorové experimenty I*. [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/34747/mod_resource/content/1/P%C5%99edn_1_Jakost_Fakt_exper_1.pdf
- [13] MACH, Pavel. *Faktorové experimenty II*. [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/34754/mod_resource/content/2/P%C5%99edn_2_%20Fakt_exper_2.pdf

Seznam příloh

Příloha 1	
Naměřené hodnoty ELPOX AX 15S	70
Příloha 2	
Naměřené hodnoty ELPOX SC 70MN	75
Příloha 3	
Naměřené hodnoty Loctite 3888	79
Příloha 4	
Naměřené hodnoty Permacol 2369/2	83
Příloha 5	
Faktorové experimenty ELPOX AX 15S	87
Příloha 6	
Faktorové experimenty ELPOX SC 70MN	96
Příloha 7	
Faktorové experimenty Loctite 3888	105
Příloha 8	
Faktorové experimenty Permacol 2369/2	114
Příloha 9	
Porovnání průměrů odporů ELPOX AX 15S	123
Příloha 10	
Porovnání průměrů odporů ELPOX SC 70MN	124
Příloha 11	
Porovnání průměrů odporů Loctite 3888	125
Příloha 12	
Porovnání průměrů odporů Permacol 2369/2	126
Příloha 13	
Porovnání průměrů nelinearity VA charakteristiky ELPOX AX 15S	127
Příloha 14	
Porovnání průměrů nelinearity VA charakteristiky ELPOX SC 70MN	128
Příloha 15	
Porovnání průměrů nelinearity VA charakteristiky Loctite 3888	129
Příloha 16	
Porovnání průměrů nelinearity VA charakteristiky Permacol 2369/2	130

Příloha 1

ELPOX AX 15S, Cu přípojovací plošky, naměřené hodnoty odporu

168 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	153,5	109	266	341,5	182,5	226	134,5	263	175	110
	Odpor po stárnutí [mΩ]	3451	726,5	1750,5	2608,5	1941,5	5683	630,5	1423	1870	2165
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	137	148	571,5	207,5	145	229	162,5	162,5	157	252
	Odpor po stárnutí [mΩ]	145	154,5	620	238	155	253,5	173	171,5	169	268
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	301,5	230	148,5	238	137	323,5	145	143,5	302,5	402
	Odpor po stárnutí [mΩ]	1456	1231,5	729	916	599	790	732,5	770,5	841	3313,5
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	354,5	530,5	539,5	499,5	663,5	479,5	376,5	337,5	381,5	388,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	33438,5	14138,5	4270,5	3535,5	1066,5	1463	3222	2883	3550	1080,5

400 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	235,5	120,5	182	166	155,5	137,5	292	371	419,5	125
	Odpor po stárnutí [mΩ]	3945	1751,5	770,5	929,5	2582,5	2301,5	2423,5	2090	6723,5	624
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	244	415	203	194	187,5	167	300	166,5	351	165
	Odpor po stárnutí [mΩ]	252,5	458	226,5	233	205	185	359	174,5	402	174
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	150,5	137	136,5	206	180,5	85,5	250	183	117,5	103,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	1106	1006	1156	794	782	494	1173,5	2084	753	535,5
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	159	235,5	262	174	128,5	240,5	150	412,5	123,5	560
	Odpor po stárnutí [mΩ]	44259,5	58692	3043	8259	7978	9384,5	11764,5	18848,5	8945	37440,5

ELPOX AX 15S, pozlacené Cu připojovací plošky, naměřené hodnoty odporu

168 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	280	146	148,5	146,5	313	553	225	306	248	366
	Odpor po stárnutí [mΩ]	1313	536	560	472	4024,5	5525,5	647	703	1820,5	1604
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	218,5	152,5	189	370,5	341,5	370	236,5	220	225	232,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	265	182,5	232,5	538	505	475	268	250	305	349,5
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	151	261	218,5	168,5	345	291,5	209,5	245	321,5	383,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	403	421	349,5	240	1060	1651,5	998,5	930	715	905
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	247,5	118	237,5	265,5	314	221	184	149,5	537,5	200,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	1225	6582,5	6220,5	16586,5	10730	9480,5	7642	3265	3372,5	2666,5

400 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	211	310,5	530,5	243	394,5	211,5	222,5	194,5	378,5	258
	Odpor po stárnutí [mΩ]	1071	4072,5	1144,5	721	1490,5	2035,5	1980	1961	960	6088
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	297,5	259,5	342,5	163,5	624,5	146,5	239,5	196	243,5	229,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	307	335	384	170	838	178,5	273	220,5	278,5	327
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	275	266,5	240,5	160	202	267,5	164,5	180	163,5	804,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	2298,5	2528,5	1199	603	498	3810	656	712,5	279	836,5
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	376	138	213,5	151,5	307,5	243	216,5	197	147,5	176
	Odpor po stárnutí [mΩ]	2931	4763,5	4835	3484	4905,5	3194,5	3919,5	3563	4475,5	1689

ELPOX AX 15S, Cu přípojovací plošky, naměřené hodnoty nelinearity VA charakteristiky

168 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	0,22	0,23	0,25	0,24	0,26	0,24	0,15	0,22	0,78	0,72
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,26	0,24	0,4	0,7	0,4	0,54	0,26	0,34	0,38	0,4
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	1,3	1,4	1,8	1,9	1,4	0,16	0,23	0,16	0,2	0,17
	Odpor po stárnutí [mΩ]	2,1	1,9	1,5	1,7	1,2	0,52	0,74	0,34	0,8	0,62
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,18	0,21	0,17	0,14	0,16	0,3	0,27	0,28	0,38	0,28
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,82	0,25	0,4	0,48	0,23	0,05	0,05	0,05	0,05	1,2
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	0,18	0,15	0,16	0,18	0,17	0,16	0,14	0,2	0,16	0,14
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,05	0,24	0,22	0,18	0,05	0,05	0,2	0,18	0,05	0,05

400 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	0,26	0,19	0,16	0,22	0,24	23	0,34	0,3	0,32	0,2
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,54	0,1	0,12	0,12	0,08	0,09	0,46	0,05	0,05	0,07
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,46	0,48	0,52	0,54	0,42	0,15	0,13	0,15	0,14	0,16
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,6	0,42	0,48	0,54	0,58	0,38	0,22	0,32	0,26	0,86
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,1	0,11	0,13	0,1	0,09	0,2	0,48	0,24	0,28	0,26
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,46	0,32	0,34	0,32	0,36	0,12	0,08	0,42	0,1	0,07
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	0,14	0,16	0,14	0,15	0,16	0,62	0,54	1,1	0,38	0,58
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,05	0,09	0,08	0,05	0,05	0,04	0,07	0,06	0,07	0,04

ELPOX AX 15S, pozlacené Cu připojovací plošky, naměřené hodnoty nelinearity VA charakteristiky

168 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	0,18	0,23	0,24	0,72	0,62	0,25	0,24	0,25	0,25	0,32
	Odpor po stárnutí [mΩ]	2,8	1,2	1,3	1,2	0,98	1,4	0,3	0,3	0,46	0,38
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,52	4	0,46	0,74	0,38	0,22	0,18	0,24	0,16	0,2
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,96	0,86	0,94	1,2	0,9	0,82	0,74	0,76	0,84	0,9
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,24	0,3	0,38	0,3	0,32	0,32	0,26	0,28	0,24	0,26
	Odpor po stárnutí [mΩ]	1,7	1,9	1,7	1,4	1,5	1	0,78	0,7	0,64	0,72
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	0,2	0,16	0,21	0,2	0,21	0,8	0,72	0,6	0,46	0,78
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,05	0,05	0,05	0,07	0,04	0,05	0,03	0,02	0,03	0,05

400 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	0,32	0,44	0,3	0,34	0,38	0,28	0,26	0,24	0,22	0,16
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,6	0,44	0,66	0,58	0,7	0,68	0,58	0,52	0,84	0,7
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,76	0,72	0,86	0,44	0,48	0,22	0,14	0,2	0,18	0,19
	Odpor po stárnutí [mΩ]	1,5	1,4	1,7	1,1	1	0,46	0,72	0,54	0,62	0,6
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,24	0,2	0,2	0,16	0,18	2,3	1,5	1,6	1,5	1,3
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,62	0,9	0,48	0,36	0,34	0,98	0,08	0,32	0,46	0,34
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	0,32	0,3	0,38	0,32	0,44	0,2	0,18	0,21	0,22	0,19
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,04	0,07	0,07	0,03	0,05	0,07	0,03	0,05	0,06	0,03

Příloha 2

ELPOX SC 70MN, Cu připojovací plošky, naměřené hodnoty odporů

168 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	127,5	64,5	133	85	78	80	65	185	106,5	93,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	212,5	-	196	170	175	127,5	124,5	270,5	188,5	-
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	285	164,5	130,5	157,5	370	147	118	223,5	194,5	89,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	296,5	171,5	134,5	160,5	176,5	165	120,5	234	92,5	90,5
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	52	263,5	84,5	216	162	40,5	107	34,5	159	109
	Odpor po stárnutí [mΩ]	86	254	91,5	296	193,5	62	205,5	282	113	140
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	164,5	262	853,5	137,5	193	171	112	160	466,5	108
	Odpor po stárnutí [mΩ]	1557	4815	1025,5	1645,5	1568	2045,5	1045,5	2477,5	5969	1657

400 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	205,5	333,5	145	221,5	112	119,5	142,5	615,5	637	149
	Odpor po stárnutí [mΩ]	401	464,5	253	429	203,5	2561	276	764	1508,5	276,5
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	224,5	78,5	342,5	226,5	99,5	349	116	94,5	109	99,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	224,5	83	345,5	236	102,5	486	127	113	103,5	113,5
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	39	58,5	190,5	66,5	83	148,5	86,5	179	52	113,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	53,5	85,5	289,5	108	96	161	117	307	66	112
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	97	157,5	142	545,5	223	145,5	513,5	148	475,5	170
	Odpor po stárnutí [mΩ]	618	1258,5	1091	2124	557	5091,5	3566,5	573	4655,5	1112,5

ELPOX SC 70MN, pozlacené Cu připojovací plošky, naměřené hodnoty odporů

168 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	101	996,5	222,5	223,5	292,5	116	157,5	167,5	299,5	286
	Odpor po stárnutí [mΩ]	209,5	1119,5	614,5	583	587,5	458,5	426	598	939,5	620,5
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	372,5	260,5	113,5	182	517,5	93,5	441	512	247,5	105
	Odpor po stárnutí [mΩ]	383	269	122	189	528	94,5	448,5	599	251,5	111,5
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	218	94,5	305,5	430	393	169,5	155,5	435	204,5	245
	Odpor po stárnutí [mΩ]	414,5	331,5	844,5	915	471	170,5	192,5	371,5	536	662,5
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	147	225,5	169,5	152,5	419	257,5	86,5	252	171	549
	Odpor po stárnutí [mΩ]	753	1167,5	2275	1665,5	1533,5	1532,5	1184	976,5	1228	569,5

400 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	470	213,5	337,5	554,5	309	65,5	127,5	176,5	89,5	230,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	1139	2158,5	1523	2106,5	1893,5	205	831	1183	357,5	1320
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	95,5	284,5	727	236	237	142,5	184,5	205	312,5	153,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	101,5	306	668,5	255	250,5	150	205,5	221,5	324,5	159
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	106,5	244	125	72,5	284	218	138,5	150,5	150,5	212
	Odpor po stárnutí [mΩ]	167,5	563	194,5	107	259	518	220,5	278,5	259	176,5
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	244,5	185	154	124,5	298,5	427,5	555	427	157,5	299,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	1263	2894	1601	1713,5	1087	3169,5	2937	3129,5	1429	2393,5

ELPOX SC 70MN, Cu připojovací plošky, naměřené hodnoty nelinearity VA charakteristiky

168 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	0,1	0,14	0,23	0,09	0,1	0,21	0,22	0,66	0,05	0,27
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,48	-	0,4	0,2	-	0,36	0,64	0,5	0,38	0
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,62	0,36	0,34	0,28	0,42	0,44	0,42	0,26	0,5	0,36
	Odpor po stárnutí [mΩ]	1	0,7	0,76	0,92	0,92	1,2	0,98	0,72	0,88	0,76
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,34	0,4	0,52	0,38	0,48	0,25	0,19	0,21	0,94	0,2
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,44	0,38	0,5	0,25	0,64	0,38	0,52	0,18	0,86	0,82
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	1,5	2,5	1,3	1,3	1,9	0,82	0,6	0,76	0,54	0,52
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04	0,07	0,06	0,03	0,38	0,03

400 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	0,92	1,1	0,64	0,84	0,56	0,5	0,52	2,1	0,68	0,52
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,88	0,28	0,36	0,22	0,54	2,7	0,42	0,72	2,9	0,76
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,58	0,4	0,64	0,62	0,44	1,5	0,78	0,7	0,82	0,72
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,8	0,38	0,86	0,88	0,64	1,9	0,72	0,64	0,72	1,1
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,48	0,58	2,5	0,68	0,76	0,12	0,21	0,2	0,22	0,1
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,68	0,38	0,48	0,34	0,42	0,26	0,34	0,76	0,22	0,54
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	1,6	2,2	2,1	2,6	2,5	0,44	0,52	0,62	1,4	0,56
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,14	0,05	0,03	0,03	0,01	0,46	0,1	0,13	0,11	0,08

ELPOX SC 70MN, pozlacené Cu připojovací plošky, naměřené hodnoty nelinearity VA charakteristiky

168 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	0,54	0,9	1	1,3	1,6	0,4	0,48	0,56	0,36	0,36
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,66	0,92	1,4	1,5	1,3	0,74	0,68	0,74	0,68	0,78
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	1	0,92	0,64	0,88	0,86	0,5	1,2	1	0,82	0,58
	Odpor po stárnutí [mΩ]	1,8	1,5	1,3	1,7	1,9	1,6	2,6	2,1	1,6	1,4
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,62	0,34	0,66	0,68	0,54	0,5	0,42	0,42	0,54	0,48
	Odpor po stárnutí [mΩ]	1,2	1	1,5	1,8	1,4	1,7	1,9	1,7	3,8	2,8
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	1,1	0,86	0,94	0,92	1	0,68	0,3	0,6	0,5	0,48
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,09	0,07	0,03	0,07	0,18	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02

400 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	1,1	0,64	0,86	0,54	0,9	0,38	0,5	0,6	0,48	0,32
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,32	0,54	0,32	0,46	0,38	2	4,6	4,4	2,3	4,2
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,36	0,7	0,6	0,74	0,76	0,66	0,72	0,56	0,84	0,58
	Odpor po stárnutí [mΩ]	1,1	1,4	1,4	1,5	1,4	1,5	1,5	1,3	1,7	1,3
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,46	0,36	0,4	0,34	0,48	0,52	0,48	0,54	0,44	0,28
	Odpor po stárnutí [mΩ]	2,3	2,9	3,4	2,3	4,2	1,7	1,9	2,1	2,2	1,8
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	0,27	0,3	0,36	0,28	0,3	0,56	0,74	0,58	0,34	0,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,03	0,02	0,04	0,04	0,02	0,06	0,03	0,04	0,06	0,02

Příloha 3

Loctite 3888, Cu přípojovací plošky, naměřené hodnoty odporů

168 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	318,5	298,5	50,5	179,5	137,5	83	111,5	149,5	183	100
	Odpor po stárnutí [mΩ]	1050	468	75	180	239,5	113	157,5	316,5	425	147,5
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	127,5	250	126,5	137	125	122	121	44	138,5	120,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	132,5	263	133,5	144	129	128,5	124	45	145	123,5
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	121,5	77,5	81,5	135	93,5	65	97	242	159,5	116
	Odpor po stárnutí [mΩ]	385,5	196	195	461,5	223	142,5	231	4074	602,5	376,5
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	123	88	84,5	99	115	801	63,5	119	86,5	88,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	7160	4156	2422	6612	987	3755	582,5	376	1369	557

400 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	136,5	175,5	69	108,5	212,5	221,5	128,5	85	74,5	103,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	268	398	121	183	587,5	497	296	129,5	104,5	164,5
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	220	71	145	127	81	1204	61,5	85	85,5	873
	Odpor po stárnutí [mΩ]	248,5	73,5	201,5	133	87,5	74	100	249	163,5	118,5
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	84	133	68,5	72,5	180,5	187,5	68,5	99	63,5	63
	Odpor po stárnutí [mΩ]	3306	3289	3389	2295	1793,5	1783	445	2481	295	318,5
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	113	149,5	125,5	123,5	149	121,5	101	123,5	90,5	242
	Odpor po stárnutí [mΩ]	723,5	940	505	599	682	508	384,5	896,5	863,5	503

Loctite 3888, pozlacené Cu připojovací plošky, naměřené hodnoty odporů

168 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	161	116,5	185,5	279,5	128	213,5	209,5	75,5	125	220,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	230	169	243	471	265,5	256,5	299	87,5	194	313
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	240,5	109,5	84	82,5	191,5	138,5	104	74,5	63	187
	Odpor po stárnutí [mΩ]	266,5	263	133,5	144	129	128,5	124	45	145	123,5
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	121,5	77,5	81,5	135	93,5	65	97	242	159,5	116
	Odpor po stárnutí [mΩ]	-	823,5	200,5	740	64	77,5	465,5	574,5	448,5	643,5
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	247	88	84,5	99	115	801	63,5	119	86,5	88,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	1213	575,5	763,5	1282	649	4205	1064	1513	715,5	1184

400 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	750	433,5	115,5	251	166	73,5	100,5	88	169,5	165
	Odpor po stárnutí [mΩ]	4721	1857	191,5	548	247,5	93,5	131,5	124,5	294,5	251
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	181	203	174,5	155	109	149,5	249	146	96,5	120,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	202,5	207	198	159,5	118	157,5	288,5	153,5	100,5	125,5
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	170	170,5	128,5	141	185	189,5	62,5	98	128	464
	Odpor po stárnutí [mΩ]	4019	985,5	693,5	694,5	810	2060	1923	2176	2283	812
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	131,5	149,5	125,5	123,5	149	121,5	101	123,5	90,5	242
	Odpor po stárnutí [mΩ]	7008	4554	444	3810	2775	326,5	1668	1031	1937	2646

Loctite 3888, Cu připojovací plošky, naměřené hodnoty nelinearity VA charakteristiky

168 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	1,4	1,5	0,5	0,96	0,92	0,22	0,18	0,2	0,32	0,28
	Odpor po stárnutí [mΩ]	2,5	5,2	1,8	2,8	3,2	1,2	0,98	0,84	0,58	0,44
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,29	0,14	0,22	0,26	0,16	14	1,8	2,7	3,2	5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,54	0,72	0,98	0,84	1	0,74	0,38	0,4	0,38	0,32
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,18	0,15	0,11	0,2	0,15	0,54	0,7	1,8	0,96	0,86
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,28	0,25	0,1	0,34	0,14	1,2	0,82	0,54	1,3	1,6
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	0,48	1	0,12	0,1	0,13	11	5	8	7	6
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,26	0,17	0,21	0,34	0,2	0,56	0,34	0,46	0,92	0,22

400 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	0,24	0,29	0,26	0,32	0,2	0,84	0,3	0,28	0,24	0,34
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,6	0,24	0,22	0,66	0,42	0,64	0,72	0,42	0,52	0,58
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	1,8	0,62	0,56	0,7	0,72	16	2	2,4	2,5	17
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,9	0,78	0,62	1,6	0,94	2,7	0,78	1,5	1,9	7
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,36	0,24	0,32	0,34	1,1	1,1	0,3	0,3	0,32	0,3
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,09	0,06	0,09	0,08	0,42	0,86	0,46	0,82	0,32	0,42
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	0,2	0,19	0,42	0,24	0,78	0,2	0,21	0,19	0,21	0,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,02	0,01	0,02	0,05	0,32	0,64	0,46	0,62	0,74	0,28

Loctite 3888, pozlacené Cu připojovací plošky, naměřené hodnoty nelinearity VA charakteristiky

168 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	0,84	0,7	0,62	1,2	0,72	0,32	0,5	0,36	0,42	0,28
	Odpor po stárnutí [mΩ]	2,5	1,9	2,5	2,2	2,6	0,94	1,3	0,68	0,62	1
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	1,4	0,74	0,54	0,6	0,74	0,42	0,72	0,34	0,42	0,42
	Odpor po stárnutí [mΩ]	2,3	1,5	1,4	2	1,5	0,9	1,3	0,9	0,82	1,7
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,76	0,86	0,7	1,1	0,78	0,28	0,42	0,28	0,4	0,34
	Odpor po stárnutí [mΩ]	3	5	1,7	3,4	2,2	0,72	1,8	1,6	1,5	1,9
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	1,2	0,7	0,56	0,52	0,44	0,64	0,52	0,72	0,5	0,7
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,12	0,03	0,04	0,02	0,03	0,02	0,05	0,03	0,04	0,02

400 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	1,4	3	1	1,9	1,4	0,34	0,34	0,32	0,22	0,76
	Odpor po stárnutí [mΩ]	4,2	0,05	0,28	0,11	0,22	0,72	0,78	0,86	0,98	1,1
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,38	0,56	0,28	0,38	0,36	0,34	0,68	0,34	0,36	0,34
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,98	1,1	0,88	0,92	0,9	1,1	1,7	1	0,96	0,94
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,2	0,14	0,22	0,26	0,16	14	1,8	2,7	3,2	5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,98	0,08	0,11	0,12	0,07	0,1	0,16	0,23	0,05	6,8
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	6	15	2,2	14	15	12	0,7	0,56	0,52	0,42
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,03	0,02	0,34	0,02	0,03	0,02	0,04	0,03	0,02	0,02

Příloha 4

Permacol 2369/2, Cu přípojovací plošky, naměřené hodnoty odporů

168 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	209	194	422	218	188,5	296	411	760,5	915	247
	Odpor po stárnutí [mΩ]	300	585,5	748	649	586,5	748	433	614,5	630,5	239,5
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	340,5	434,5	172,5	79,5	181,5	448,5	133,5	61,5	2015	74
	Odpor po stárnutí [mΩ]	554,5	663,5	429	97	244	516	156,5	178,5	1628	321
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	509	270,5	253	830	331,5	259	330	316,5	241,5	569
	Odpor po stárnutí [mΩ]	497	275,5	259,5	607,5	250	277	308,5	273,5	242,5	323
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	58,5	198	177,5	209,5	437,5	243,5	255	140,5	220,5	51,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	376,5	716,5	751	824,5	707	258	249,5	799,5	749	74

400 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	423,5	410,5	454,5	372,5	251,5	429,5	410	393,5	861	391,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	895	588	499	311,5	420,5	455,5	364	595	865,5	363
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	137,5	276	477	893,5	314,5	244	225,5	382	369	252
	Odpor po stárnutí [mΩ]	316,5	334,5	589	976,5	426	311,5	264,5	385	406,5	271
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	57,5	82,5	818	156	147,5	266,5	1184,5	207,5	711	106
	Odpor po stárnutí [mΩ]	175	2435	1298	847,5	265,5	503,5	2923	550	1212,5	420
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	176	185	154	124,5	298,5	427,5	555	427	157,5	299,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	1985	2894	1601	1713,5	1087	3169,5	2937	3129,5	1429	2393,5

Permacol 2369/2, pozlacené Cu přípojovací plošky, naměřené hodnoty odporů

168 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	44	72	130	432,5	314	173	559,5	194	110	115
	Odpor po stárnutí [mΩ]	37,5	52,5	81	150	185,5	143,5	256	118	82,5	73
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	202,5	434,5	172,5	79,5	181,5	448,5	133,5	61,5	2014,5	74
	Odpor po stárnutí [mΩ]	232,5	138,5	92,5	365,5	79	182,5	200	71	45	135,5
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	143	163,5	265,5	45	363,5	123	188,5	381	1195	95
	Odpor po stárnutí [mΩ]	62	72	286	42,5	202	115	210,5	104,5	236	73
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	331	206,5	563	287	519	448,5	168,5	79	101,5	163,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	1267	716,5	751	824,5	707	258	249,5	799,5	749	74

400 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	100	90,5	49	168	284	94,5	107,5	257,5	29	330
	Odpor po stárnutí [mΩ]	61,5	128	123,5	417	179	314,5	179,5	426,5	253,5	564,5
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	150	52	122,5	140	29	27	32	71	573,5	991
	Odpor po stárnutí [mΩ]	181	54,5	117,5	121,5	26	-	34	66	1791	990
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	90,5	201,5	269,5	82,5	80,5	99,5	221	108,5	237,5	156,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	53	223	104	97	56	105,5	134,5	77	238	110,5
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	84	199	166,5	235,5	239	91	271,5	45	191,5	296
	Odpor po stárnutí [mΩ]	1985	557,5	596,5	798,5	4307,5	546	525	1342	888	935,5

Permacol 2369/2, Cu přípojovací plošky, naměřené hodnoty nelinearity VA charakteristiky

168 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	0,08	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,15	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05	0,36	0,14	0,15	0,24	0,18
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,52	0,64	0,58	0,88	0,72	0,48	0,8	0,76	0,28	0,6
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,08	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,13	0,1	0,08	0,15	0,06	0,05	0,07	0,09	0,08	0,09
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	0,05	0,86	0,94	0,92	1	0,68	0,3	0,6	0,5	0,48
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,26	0,25	0,29	0,21	0,16	0,82	0,76	0,48	1,9	0,46

400 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	0,08	0,14	0,1	0,15	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,14	0,32	0,26	0,42	0,42	0,1	0,12	0,22	0,12	0,14
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,18	0,17	0,32	0,16	0,22	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,58	0,22	0,28	0,18	0,28	0,12	0,22	0,48	0,24	0,22
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,32	0,36	0,4	0,34	0,48	0,52	0,48	0,54	0,44	0,28
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,24	0,14	0,26	0,21	0,15	0,09	0,08	0,06	0,05	0,08
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	1,5	2,5	2,1	1,9	0,74	0,05	0,05	0,15	0,05	0,05
	Odpor po stárnutí [mΩ]	1	0,64	0,68	0,66	0,32	0,82	0,94	0,98	0,26	0,82

Permacol 2369/2, pozlacené Cu připojovací plošky, naměřené hodnoty nelinearity VA charakteristiky

168 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	0,16	0,2	0,2	0,42	0,28	1,5	1,1	1,7	1,1	1,3
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,1	0,12	0,16	0,26	0,5	0,5	1,2	0,7	0,46	0,48
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,52	0,4	0,48	0,66	0,34	0,15	0,26	0,15	0,38	0,25
	Odpor po stárnutí [mΩ]	1,2	1,4	1,6	1	1,1	1,3	1,2	1,4	0,9	0,82
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,15	0,17	0,16	0,05	0,14	0,05	0,12	0,17	0,21	0,05
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,3	0,34	0,5	0,28	0,44	0,26	0,42	0,42	0,48	0,36
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	0,82	0,7	1,5	0,9	0,58	1	0,98	0,4	0,46	0,5
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,09	0,44	0,76	0,26	2,4	1,1	0,52	0,74	0,98	0,54

400 hod	Pořadí odporu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	0,18	0,14	0,1	0,15	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,32	0,32	0,26	0,42	0,42	0,1	0,12	0,22	0,12	0,14
25°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,72	0,2	0,3	0,22	0,13	0,64	0,82	13	3,6	13
	Odpor po stárnutí [mΩ]	1,2	0,64	0,6	0,66	0,86	-	1,2	1,8	3,8	12
85°C/ 50%	Počáteční odpor [mΩ]	0,22	0,25	0,3	0,18	0,18	0,21	0,4	0,24	0,42	0,3
	Odpor po stárnutí [mΩ]	1,1	2,9	1,5	1,5	1	0,76	0,58	0,78	1,1	0,7
85°C/ 85%	Počáteční odpor [mΩ]	0,2	0,22	0,3	0,22	0,32	0,3	0,52	0,22	0,54	0,24
	Odpor po stárnutí [mΩ]	0,05	0,09	0,04	0,24	0,02	0,32	0,26	0,28	0,24	0,36

Příloha 5

Faktorové experimenty, ELPOX AX 15S, Cu přípojovací plošky, naměřené odpory

A1 = 168 hodin				A2 = 400 hodin				
B1 = 25°C		B2 = 85°C		B1 = 25°C		B2 = 85°C		
C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
145	727	1232	4271	253	1752	1106	3043	1
155	1751	729	3536	227	771	1006	8259	2
238	2609	916	1067	233	930	1156	7978	3
155	1942	599	1463	205	2583	794	9385	4
254	631	790	3222	185	2302	782	11765	5
173	1423	733	2883	359	2424	494	18849	6
172	1870	771	3550	175	2090	753	8945	7
169	2165	841	1081	174	624	536	6895	8
1460	13116	6610	21071	1810	13473	6627	75118	
R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	

182	1639	826	2634	226	1684	828	9390	Průměry sloupců
-----	------	-----	------	-----	------	-----	------	-----------------

ZA	$abc + ab + ac + a - bc - b - c - 1$	54771	SA	46872851	d = počet sloupců	8
ZB	$abc + ab - ac - a + bc + b - c - 1$	79567	SB	98920430	r = počet řádků	8
ZC	$abc - ab + ac - a + bc - b + c - 1$	106272	SC	1,76E+08	N = celkový počet experimentů	64
ZAB	$abc + ab - ac - a - bc - b + c + 1$	53356	SAB	44482230	m = odhad střední hodnoty	2176
ZAC	$abc - ab + ac - a - bc + b - c + 1$	54037	SAC	45624959		
ZBC	$abc - ab - ac + a + bc - b - c + 1$	59633	SBC	55563980		
ZABC	$abc - ab - ac + a - bc + b + c - 1$	54022	SABC	45599633		

Rozdíly uvnitř sloupců								
-37,4	-912,9	405,3	1636,6	26,3	67,4	277,7	-6346,7	1
-27,9	111,1	-97,2	901,6	0,3	-913,6	177,7	-1130,7	2
55,6	969,1	89,8	-1567,4	6,8	-754,6	327,7	-1411,7	3
-27,4	302,1	-227,2	-1170,9	-21,2	898,4	-34,3	-5,2	4
71,1	-1008,9	-36,2	588,1	-41,2	617,4	-46,3	2374,8	5
-9,4	-216,4	-93,7	249,1	132,8	739,4	-334,3	9458,8	6
-10,9	230,6	-55,7	916,1	-51,7	405,9	-75,3	-444,7	7
-13,4	525,6	14,8	-1553,4	-52,2	-1060,1	-292,8	-2494,7	8

Testované char. F		Má Vv ýznam? 1=ano	Kvantil F $1-\alpha(1, v)$
FA	16,0	1	4,012973
FB	33,7	1	
FC	60,1	1	
FAB	15,1	1	
FAC	15,5	1	
FBC	18,9	1	
FABC	15,5	1	

SR = suma čtverců residua	1,64E+08
v = počet stupňů volnosti	56
SR/v	2936972
α PRAVDĚPODOBNOST	0,05

Výpočet koeficientů		
b0	2176,3	
b1	855,8	1
b2	1243,2	1
b3	1660,5	1
b4	833,7	1
b5	844,3	1
b6	931,8	1
b7	844,1	1

Počet důležitých faktorů	
n=	7

Kombinace	Výstup modelu
1	182,4
a	226,2
b	826,2
c	1639,4
ab	828,3
ac	1684,1
bc	2633,9
abc	9389,7

x1	x2	x3	x12	x13	x23	x123
-1	-1	-1	1	1	1	-1
1	-1	-1	-1	-1	1	1
-1	1	-1	-1	1	-1	1
-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	-1	1	-1	-1	-1
1	-1	1	-1	1	-1	-1
-1	1	1	-1	-1	1	-1
1	1	1	1	1	1	1

Rozdíly od modelu								
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
-37,4	-912,9	405,3	1636,6	26,3	67,4	277,7	-6346,7	1
-27,9	111,1	-97,2	901,6	0,3	-913,6	177,7	-1130,7	2
55,6	969,1	89,8	-1567,4	6,8	-754,6	327,7	-1411,7	3
-27,4	302,1	-227,2	-1170,9	-21,2	898,4	-34,3	-5,2	4
71,1	-1008,9	-36,2	588,1	-41,2	617,4	-46,3	2374,8	5
-9,4	-216,4	-93,7	249,1	132,8	739,4	-334,3	9458,8	6
-10,9	230,6	-55,7	916,1	-51,7	405,9	-75,3	-444,7	7
-13,4	525,6	14,8	-1553,4	-52,2	-1060,1	-292,8	-2494,7	8

Součet čtverců odchylek naměřených hodnot od modelu			SS	1,64E+08
Podmínka $d^*r > n+1$		64	>	8
$d^*r - n - 1$		56		
$SS / (d^*r - n - 1)$		2936972		

Testová charakteristika F pro model	< nebo >	Kritická hodnota F-rozdělení
1	<=	1,557933374

Popisuje model hodnoty s dostatečnou přesností?	ANO!
---	------

Faktorové experimenty, ELPOX AX 15S, Cu přípojovací plošky, naměřená nelinearita VA char.

A1 = 168 hodin				A2 = 400 hodin				
B1 = 25°C		B2 = 85°C		B1 = 25°C		B2 = 85°C		
C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
1,50	0,26	0,25	0,10	0,60	0,10	0,46	0,08	1
1,70	0,24	0,40	0,24	0,42	0,12	0,32	0,05	2
1,20	0,40	0,48	0,22	0,48	0,12	0,34	0,05	3
0,52	0,40	0,23	0,18	0,54	0,08	0,32	0,04	4
0,74	0,26	0,05	0,05	0,58	0,09	0,36	0,07	5
0,34	0,34	0,05	0,05	0,38	0,05	0,12	0,06	6
0,80	0,38	0,05	0,20	0,32	0,05	0,42	0,07	7
0,62	0,40	0,05	0,18	0,26	0,07	0,10	0,05	8
7,42	2,68	1,56	1,22	3,58	0,68	2,44	0,47	
R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	

0,928	0,335	0,195	0,153	0,448	0,085	0,305	0,059	Průměry sloupců
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-----------------

ZA	$abc + ab + ac + a - bc - b - c - 1$	-5,71	SA	0,509439	d = počet sloupců	8
ZB	$abc + ab - ac - a + bc + b - c - 1$	-8,67	SB	1,174514	r = počet řádků	8
ZC	$abc - ab + ac - a + bc - b + c - 1$	-9,95	SC	1,546914	N = celkový počet experimentů	64
ZAB	$abc + ab - ac - a - bc - b + c + 1$	5,97	SAB	0,556889	m = odhad střední hodnoty	0,313
ZAC	$abc - ab + ac - a - bc + b - c + 1$	0,21	SAC	0,000689		
ZBC	$abc - ab - ac + a + bc - b - c + 1$	5,33	SBC	0,443889		
ZABC	$abc - ab - ac + a - bc + b + c - 1$	-3,47	SABC	0,188139		

Rozdíly uvnitř sloupců								
0,573	-0,075	0,055	-0,053	0,153	0,015	0,155	0,021	1
0,773	-0,095	0,205	0,088	-0,028	0,035	0,015	-0,009	2
0,273	0,065	0,285	0,068	0,033	0,035	0,035	-0,009	3
-0,408	0,065	0,035	0,028	0,093	-0,005	0,015	-0,019	4
-0,188	-0,075	-0,145	-0,103	0,133	0,005	0,055	0,011	5
-0,588	0,005	-0,145	-0,103	-0,068	-0,035	-0,185	0,001	6
-0,128	0,045	-0,145	0,048	-0,128	-0,035	0,115	0,011	7
-0,308	0,065	-0,145	0,028	-0,188	-0,015	-0,205	-0,009	8

Testované char. F		Má Vvýznam? 1=ano	Kvantil $F_{1-\alpha}(1, v)$
FA	13,1	1	4,012973
FB	30,2	1	
FC	39,8	1	
FAB	14,3	1	
FAC	0,0	0	
FBC	11,4	1	
FABC	4,8	1	

SR = suma čtverců residua	2,174
v = počet stupňů volnosti	56
SR/v	0,039
α PRAVDĚPODOBNOST	0,05

Výpočet koeficientů		
b0	0,3	
b1	-0,1	1
b2	-0,1	1
b3	-0,2	1
b4	0,1	1
b5	0,0	0
b6	0,1	1
b7	-0,1	1

Počet důležitých faktorů	
n=	6

Kombinace	Výstup modelu
1	0,9
a	0,5
b	0,2
c	0,3
ab	0,3
ac	0,1
bc	0,2
abc	0,1

x1	x2	x3	x12	x13	x23	x123
-1	-1	-1	1	1	1	-1
1	-1	-1	-1	-1	1	1
-1	1	-1	-1	1	-1	1
-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	-1	1	-1	-1	-1
1	-1	1	-1	1	-1	-1
-1	1	1	-1	-1	1	-1
1	1	1	1	1	1	1

Rozdíly od modelu								
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
0,58	-0,08	0,06	-0,06	0,15	0,02	0,15	0,02	1
0,78	-0,10	0,21	0,08	-0,03	0,04	0,01	-0,01	2
0,28	0,06	0,29	0,06	0,03	0,04	0,03	-0,01	3
-0,40	0,06	0,04	0,02	0,09	0,00	0,01	-0,02	4
-0,18	-0,08	-0,14	-0,11	0,13	0,01	0,05	0,01	5
-0,58	0,00	-0,14	-0,11	-0,07	-0,03	-0,19	0,00	6
-0,12	0,04	-0,14	0,04	-0,13	-0,03	0,11	0,01	7
-0,30	0,06	-0,14	0,02	-0,19	-0,01	-0,21	-0,01	8

Součet čtverců odchylek naměřených hodnot od modelu	SS	2,175027
Podmínka $d^*r > n+1$	64	>
$d^*r - n - 1$	57	
$SS / (d^*r - n - 1)$	0,038158	

Testová charakteristika F pro model	< nebo >	Kritická hodnota F-rozdělení
0,982767487	<=	1,555624898

Popisuje model hodnoty s dostatečnou přesností?	ANO!
---	------

Faktorové experimenty, ELPOX AX 15S, pozlacené Cu přípojovací plošky, naměřená nelinearita VA charakteristiky

A1 = 168 hodin				A2 = 400 hodin				
B1 = 25°C		B2 = 85°C		B1 = 25°C		B2 = 85°C		
C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
0,86	1,20	1,70	0,05	1,40	0,60	0,48	0,04	1
0,94	1,30	1,40	0,05	1,10	0,66	0,36	0,07	2
0,90	1,20	1,50	0,05	1,00	0,58	0,34	0,03	3
0,96	0,98	1,00	0,04	0,46	0,70	0,62	0,05	4
0,74	1,40	0,78	0,05	0,72	0,68	0,90	0,07	5
0,76	0,30	0,70	0,03	0,54	0,58	0,32	0,03	6
0,84	0,46	0,64	0,03	0,62	0,52	0,46	0,05	7
0,90	0,38	0,72	0,05	0,60	0,70	0,34	0,06	8
6,90	7,22	8,44	0,35	6,44	5,02	3,82	0,40	
R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	

0,86	0,90	1,06	0,04	0,81	0,63	0,48	0,05	Průměry sloupců
------	------	------	------	------	------	------	------	-----------------

ZA	$abc + ab + ac + a - bc - b - c - 1$	-7,23	SA	0,82	d = počet sloupců	8
ZB	$abc + ab - ac - a + bc + b - c - 1$	-12,57	SB	2,47	r = počet řádků	8
ZC	$abc - ab + ac - a + bc - b + c - 1$	-12,61	SC	2,48	N = celkový počet experimentů	64
ZAB	$abc + ab - ac - a - bc - b + c + 1$	-1,91	SAB	0,06	m = odhad střední hodnoty	0,6029
ZAC	$abc - ab + ac - a - bc + b - c + 1$	2,93	SAC	0,13		
ZBC	$abc - ab - ac + a + bc - b - c + 1$	-10,41	SBC	1,69		
ZABC	$abc - ab - ac + a - bc + b + c - 1$	6,41	SABC	0,64		

Rozdíly uvnitř sloupců								
0,00	0,30	0,65	0,01	0,60	-0,03	0,00	-0,01	1
0,08	0,40	0,35	0,01	0,30	0,03	-0,12	0,02	2
0,04	0,30	0,45	0,01	0,20	-0,05	-0,14	-0,02	3
0,10	0,08	-0,05	0,00	-0,35	0,07	0,14	0,00	4
-0,12	0,50	-0,28	0,01	-0,09	0,05	0,42	0,02	5
-0,10	-0,60	-0,36	-0,01	-0,27	-0,05	-0,16	-0,02	6
-0,02	-0,44	-0,42	-0,01	-0,19	-0,11	-0,02	0,00	7
0,04	-0,52	-0,34	0,01	-0,21	0,07	-0,14	0,01	8

Testované char. F		Má Vvýznam? 1=ano	Kvantil $F_{1-\alpha}(1, v)$
FA	12,2	1	4,012973
FB	36,9	1	
FC	37,1	1	
FAB	0,9	0	
FAC	2,0	0	
FBC	25,3	1	
FABC	9,6	1	

SR = suma čtverců residua	3,75
v = počet stupňů volnosti	56
SR/v	0,067
α PRAVDĚPODOBNOST	0,05

Výpočet koeficientů		
b0	0,60	
b1	-0,11	1
b2	-0,20	1
b3	-0,20	1
b4	-0,03	0
b5	0,05	0
b6	-0,16	1
b7	0,10	1

Počet důležitých faktorů	
n=	5

Kombinace	Výstup modelu
1	0,85
a	0,82
b	0,98
c	0,98
ab	0,55
ac	0,55
bc	0,06
abc	0,03

x1	x2	x3	x12	x13	x23	x123
-1	-1	-1	1	1	1	-1
1	-1	-1	-1	-1	1	1
-1	1	-1	-1	1	-1	1
-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	-1	1	-1	-1	-1
1	-1	1	-1	1	-1	-1
-1	1	1	-1	-1	1	-1
1	1	1	1	1	1	1

Rozdíly od modelu								
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
0,01	0,22	0,72	-0,01	0,58	0,05	-0,07	0,01	1
0,09	0,32	0,42	-0,01	0,28	0,11	-0,19	0,04	2
0,05	0,22	0,52	-0,01	0,18	0,03	-0,21	0,00	3
0,11	0,00	0,02	-0,02	-0,36	0,15	0,07	0,02	4
-0,11	0,42	-0,20	-0,01	-0,10	0,13	0,35	0,04	5
-0,09	-0,68	-0,28	-0,03	-0,28	0,03	-0,23	0,00	6
-0,01	-0,52	-0,34	-0,03	-0,20	-0,03	-0,09	0,02	7
0,05	-0,60	-0,26	-0,01	-0,22	0,15	-0,21	0,03	8

Součet čtverců odchylek naměřených hodnot od modelu	SS	3,94
Podmínka $d^*r > n+1$	64	> 6
$d^*r - n - 1$	58	
$SS / (d^*r - n - 1)$	0,067913	

Testová charakteristika F pro model	< nebo >	Kritická hodnota F-rozdělení
1,014759513	<=	1,553387477

Popisuje model hodnoty s dostatečnou přesností?	ANO!
---	------

Faktorové experimenty, ELPOX AX 15S, Cu přípojovací plošky, naměřená nelinearita VA charakteristiky

A1 = 168 hodin				A2 = 400 hodin				
B1 = 25°C		B2 = 85°C		B1 = 25°C		B2 = 85°C		
C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
1,50	0,26	0,25	0,10	0,60	0,10	0,46	0,08	1
1,70	0,24	0,40	0,24	0,42	0,12	0,32	0,05	2
1,20	0,40	0,48	0,22	0,48	0,12	0,34	0,05	3
0,52	0,40	0,23	0,18	0,54	0,08	0,32	0,04	4
0,74	0,26	0,05	0,05	0,58	0,09	0,36	0,07	5
0,34	0,34	0,05	0,05	0,38	0,05	0,12	0,06	6
0,80	0,38	0,05	0,20	0,32	0,05	0,42	0,07	7
0,62	0,40	0,05	0,18	0,26	0,07	0,10	0,05	8
7,42	2,68	1,56	1,22	3,58	0,68	2,44	0,47	
R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	

0,928	0,335	0,195	0,153	0,448	0,085	0,305	0,059	Průměry sloupců
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-----------------

ZA	$abc + ab + ac + a - bc - b - c - 1$	-5,71	SA	0,509439	d = počet sloupců	8
ZB	$abc + ab - ac - a + bc + b - c - 1$	-8,67	SB	1,174514	r = počet řádků	8
ZC	$abc - ab + ac - a + bc - b + c - 1$	-9,95	SC	1,546914	N = celkový počet experimentů	64
ZAB	$abc + ab - ac - a - bc - b + c + 1$	5,97	SAB	0,556889	m = odhad střední hodnoty	0,3132
ZAC	$abc - ab + ac - a - bc + b - c + 1$	0,21	SAC	0,000689		
ZBC	$abc - ab - ac + a + bc - b - c + 1$	5,33	SBC	0,443889		
ZABC	$abc - ab - ac + a - bc + b + c - 1$	-3,47	SABC	0,188139		

Rozdíly uvnitř sloupců								
0,573	-0,075	0,055	-0,053	0,153	0,015	0,155	0,021	1
0,773	-0,095	0,205	0,088	-0,028	0,035	0,015	-0,009	2
0,273	0,065	0,285	0,068	0,033	0,035	0,035	-0,009	3
-0,408	0,065	0,035	0,028	0,093	-0,005	0,015	-0,019	4
-0,188	-0,075	-0,145	-0,103	0,133	0,005	0,055	0,011	5
-0,588	0,005	-0,145	-0,103	-0,068	-0,035	-0,185	0,001	6
-0,128	0,045	-0,145	0,048	-0,128	-0,035	0,115	0,011	7
-0,308	0,065	-0,145	0,028	-0,188	-0,015	-0,205	-0,009	8

Testované char. F		Má Vvýznam? 1=ano	Kvantil $F_{1-\alpha}(1, v)$
FA	13,1	1	4,012973
FB	30,2	1	
FC	39,8	1	
FAB	14,3	1	
FAC	0,0	0	
FBC	11,4	1	
FABC	4,8	1	

SR = suma čtverců residua	2,174
v = počet stupňů volnosti	56
SR/v	0,039
α PRAVDĚPODOBNOST	0,05

Výpočet koeficientů		
b0	0,31	
b1	-0,09	1
b2	-0,14	1
b3	-0,16	1
b4	0,09	1
b5	0,00	0
b6	0,08	1
b7	-0,05	1

Počet důležitých faktorů	
n=	6

Kombinace	Výstup modelu
1	0,92
a	0,45
b	0,19
c	0,34
ab	0,31
ac	0,08
bc	0,16
abc	0,06

x1	x2	x3	x12	x13	x23	x123
-1	-1	-1	1	1	1	-1
1	-1	-1	-1	-1	1	1
-1	1	-1	-1	1	-1	1
-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	-1	1	-1	-1	-1
1	-1	1	-1	1	-1	-1
-1	1	1	-1	-1	1	-1
1	1	1	1	1	1	1

Rozdíly od modelu								
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
0,58	-0,08	0,06	-0,06	0,15	0,02	0,15	0,02	1
0,78	-0,10	0,21	0,08	-0,03	0,04	0,01	-0,01	2
0,28	0,06	0,29	0,06	0,03	0,04	0,03	-0,01	3
-0,40	0,06	0,04	0,02	0,09	0,00	0,01	-0,02	4
-0,18	-0,08	-0,14	-0,11	0,13	0,01	0,05	0,01	5
-0,58	0,00	-0,14	-0,11	-0,07	-0,03	-0,19	0,00	6
-0,12	0,04	-0,14	0,04	-0,13	-0,03	0,11	0,01	7
-0,30	0,06	-0,14	0,02	-0,19	-0,01	-0,21	-0,01	8

Součet čtverců odchylek naměřených hodnot od modelu	SS	2,175027
Podmínka $d^*r > n+1$	64	> 7
$d^*r - n - 1$	57	
$SS / (d^*r - n - 1)$	0,038158	

Testová charakteristika F pro model	< nebo >	Kritická hodnota F-rozdělení
0,982767487	<=	1,555624898

Popisuje model hodnoty s dostatečnou přesností?	ANO!
---	------

Příloha 6

Faktorové experimenty, ELPOX SC 70MN, pozlacené Cu připojovací plošky, naměřený odpor

A1 = 168 hodin				A2 = 400 hodin				
B1 = 25°C		B2 = 85°C		B1 = 25°C		B2 = 85°C		
C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	
l	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
383	210	415	753	102	1523	195	1263	1
269	621	332	1168	306	1139	107	2894	2
122	615	471	1534	159	1894	259	1601	3
189	583	171	1533	255	205	168	1714	4
449	588	193	1184	251	831	221	1087	5
95	459	372	977	150	1183	279	2937	6
252	426	536	1228	206	358	259	1429	7
112	598	663	570	222	1320	177	2394	8
1869	4098	3150	8945	1649	8452	1663	15318	
R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	

234	512	394	1118	206	1057	208	1915	Průměry sloupců
-----	-----	-----	------	-----	------	-----	------	-----------------

ZA	$abc + ab + ac + a - bc - b - c - 1$	9020,5	SA	1271397	d = počet sloupců	8
ZB	$abc + ab - ac - a + bc + b - c - 1$	13008	SB	2643673	r = počet řádků	8
ZC	$abc - ab + ac - a + bc - b + c - 1$	28482	SC	12674935	N = celkový počet experimentů	64
ZAB	$abc + ab - ac - a - bc - b + c + 1$	751,5	SAB	8824,254	m = odhad střední hodnoty	705,4
ZAC	$abc - ab + ac - a - bc + b - c + 1$	12436	SAC	2416276		
ZBC	$abc - ab - ac + a + bc - b - c + 1$	10419	SBC	1696018		
ZABC	$abc - ab - ac + a - bc + b + c - 1$	3286,5	SABC	168766,9		

Rozdíly uvnitř sloupců								
149,4	-302,7	20,8	-365,1	-104,6	466,5	-13,3	-651,8	1
35,4	108,3	-62,3	49,4	99,9	82,5	-100,8	979,3	2
-111,6	102,3	77,3	415,4	-47,1	837,0	51,2	-313,8	3
-44,6	70,8	-223,3	414,4	48,9	-851,5	-40,3	-201,3	4
214,9	75,3	-201,3	65,9	44,4	-225,5	12,7	-827,8	5
-139,1	-53,7	-22,3	-141,6	-56,1	126,5	70,7	1022,3	6
17,9	-86,2	142,3	109,9	-0,6	-699,0	51,2	-485,8	7
-122,1	85,8	268,8	-548,6	15,4	263,5	-31,3	478,8	8

Testované char. F		Má Vvýznam? 1=ano	Kvantil F $1-\alpha(1, v)$
FA	9,7	1	4,012973
FB	20,2	1	
FC	97,0	1	
FAB	0,1	0	
FAC	18,5	1	
FBC	13,0	1	
FABC	1,3	0	

SR = suma čtverců residua	7319120
v = počet stupňů volnosti	56
SR/v	130698,6
α PRAVDĚPODOBNOST	0,05

Výpočet koeficientů		
b0	705,4	
b1	140,9	1
b2	203,2	1
b3	445,0	1
b4	11,7	0
b5	194,3	1
b6	162,8	1
b7	51,4	0

Počet důležitých faktorů	
n=	5

Kombinace	Výstup modelu
1	273,2
a	166,5
b	354,1
c	449,1
ab	247,4
ac	1119,6
bc	1181,2
abc	1851,7

x1	x2	x3	x12	x13	x23	x123
-1	-1	-1	1	1	1	-1
1	-1	-1	-1	-1	1	1
-1	1	-1	-1	1	-1	1
-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	-1	1	-1	-1	-1
1	-1	1	-1	1	-1	-1
-1	1	1	-1	-1	1	-1
1	1	1	1	1	1	1

Rozdíly od modelu								
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
109,8	-239,6	60,4	-428,2	-65,0	403,4	-52,9	-588,7	1
-4,2	171,4	-22,6	-13,7	139,5	19,4	-140,4	1042,3	2
-151,2	165,4	116,9	352,3	-7,5	773,9	11,6	-250,7	3
-84,2	133,9	-183,6	351,3	88,5	-914,6	-79,9	-138,2	4
175,3	138,4	-161,6	2,8	84,0	-288,6	-26,9	-764,7	5
-178,7	9,4	17,4	-204,7	-16,5	63,4	31,1	1085,3	6
-21,7	-23,1	181,9	46,8	39,0	-762,1	11,6	-422,7	7
-161,7	148,9	308,4	-611,7	55,0	200,4	-70,9	541,8	8

Součet čtverců odchylek naměřených hodnot od modelu	SS	7496712
Podmínka $d^*r > n+1$	64	> 6
$d^*r - n - 1$	58	
$SS / (d^*r - n - 1)$	129253,6	

Testová charakteristika F pro model	< nebo >	Kritická hodnota F-rozdělení
0,988944555	<=	1,553387477

Popisuje model hodnoty s dostatečnou přesností?	ANO!
---	------

Faktorové experimenty, ELPOX SC 70MN, Cu přípojovací plošky, naměřený odpor

A1 = 168 hodin				A2 = 400 hodin				
B1 = 25°C		B2 = 85°C		B1 = 25°C		B2 = 85°C		
C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
172	213	86	1557	225	401	54	618	1
135	196	92	1026	83	465	86	1259	2
161	170	194	1646	236	253	108	1091	3
177	175	62	1568	103	429	96	2124	4
165	128	206	2046	127	204	161	557	5
121	125	282	1046	113	277	117	1113	6
93	271	113	2478	104	276	66	3567	7
91	189	140	1657	114	764	112	573	8
1112	1465	1174	13022	1103	3068	799	10901	
R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	
139	183	147	1628	138	383	100	1363	Průměry sloupců

ZA	abc + ab + ac + a - bc - b - c - 1	-901	SA	12684,39	d = počet sloupců	8
ZB	abc + ab - ac - a + bc + b - c - 1	19148	SB	5728842	r = počet řádků	8
ZC	abc - ab + ac - a + bc - b + c - 1	24267	SC	9201364	N = celkový počet experimentů	64
ZAB	abc + ab - ac - a - bc - b + c + 1	-4090	SAB	261376,6	m = odhad střední hodnoty	510
ZAC	abc - ab + ac - a - bc + b - c + 1	-135	SAC	284,7656		
ZBC	abc - ab - ac + a + bc - b - c + 1	19632	SBC	6022116		
ZABC	abc - ab - ac + a - bc + b + c - 1	-3358	SABC	176190,1		

Rozdíly uvnitř sloupců								
32,6	29,4	-60,7	-70,7	86,6	17,6	-46,4	-744,6	1
-4,4	12,9	-55,2	-602,2	-54,9	81,1	-14,4	-104,1	2
21,6	-13,1	46,8	17,8	98,1	-130,4	8,1	-271,6	3
37,6	-8,1	-84,7	-59,7	-35,4	45,6	-3,9	761,4	4
26,1	-55,6	58,8	417,8	-10,9	-179,9	61,1	-805,6	5
-18,4	-58,6	135,3	-582,2	-24,9	-106,9	17,1	-250,1	6
-46,4	87,4	-33,7	849,8	-34,4	-107,4	-33,9	2203,9	7
-48,4	5,4	-6,7	29,3	-24,4	380,6	12,1	-789,6	8

Testované char. F		Má Vv ýznam? 1=ano	Kvantil $F_{1-\alpha}(1, v)$
FA	0,1	0	4,012973
FB	34,3	1	
FC	55,2	1	
FAB	1,6	0	
FAC	0,0	0	
FBC	36,1	1	
FABC	1,1	0	

SR = suma čtverců residua	9339806
v = počet stupňů volnosti	56
SR/v	166782,3
α PRAVDĚPODOBNOST	0,05

Výpočet koeficientů		
b0	510,0	
b1	-14,1	0
b2	299,2	1
b3	379,2	1
b4	-63,9	0
b5	-2,1	0
b6	306,8	1
b7	-52,5	0

Počet důležitých faktorů	
n=	3

Kombinace	Výstup modelu
1	138,4
a	138,4
b	123,3
c	283,3
ab	123,3
ac	283,3
bc	1495,1
abc	1495,1

x1	x2	x3	x12	x13	x23	x123
-1	-1	-1	1	1	1	-1
1	-1	-1	-1	-1	1	1
-1	1	-1	-1	1	-1	1
-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	-1	1	-1	-1	-1
1	-1	1	-1	1	-1	-1
-1	1	1	-1	-1	1	-1
1	1	1	1	1	1	1

Rozdíly od modelu								
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
33,1	-70,8	-37,3	61,9	86,1	117,8	-69,8	-877,1	1
-3,9	-87,3	-31,8	-469,6	-55,4	181,3	-37,8	-236,6	2
22,1	-113,3	70,2	150,4	97,6	-30,3	-15,3	-404,1	3
38,1	-108,3	-61,3	72,9	-35,9	145,8	-27,3	628,9	4
26,6	-155,8	82,2	550,4	-11,4	-79,8	37,7	-938,1	5
-17,9	-158,8	158,7	-449,6	-25,4	-6,8	-6,3	-382,6	6
-45,9	-12,8	-10,3	982,4	-34,9	-7,3	-57,3	2071,4	7
-47,9	-94,8	16,7	161,9	-24,9	480,8	-11,3	-922,1	8

Součet čtverců odchylek naměřených hodnot od modelu			SS	9790342
Podmínka $d^*r > n+1$		64	>	4
$d^*r - n - 1$		60		
$SS / (d^*r - n - 1)$		163172,4		

Testová charakteristika F pro model	< nebo >	Kritická hodnota F-rozdělení
0,978355688	<=	1,549112862

Popisuje model hodnoty s dostatečnou přesností?	ANO!
---	------

Faktorové experimenty, ELPOX SC 70MN, pozlacené Cu přípojovací plošky, naměřená nelinearita VA charakteristiky

A1 = 168 hodin				A2 = 400 hodin				
B1 = 25°C		B2 = 85°C		B1 = 25°C		B2 = 85°C		
C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
1,80	0,66	1,20	0,09	1,10	0,32	2,30	0,03	1
1,50	0,92	1,00	0,07	1,40	0,54	2,90	0,02	2
1,30	1,30	1,50	0,03	1,40	0,32	2,30	0,04	3
1,70	0,74	1,80	0,07	1,50	0,46	1,70	0,04	4
1,90	0,68	1,40	0,02	1,40	0,38	1,90	0,02	5
1,60	0,74	1,70	0,03	1,50	2,00	2,10	0,06	6
1,60	0,68	1,90	0,02	1,50	2,30	2,20	0,03	7
1,40	0,78	1,70	0,03	1,30	4,20	1,80	0,04	8
12,80	6,50	12,20	0,36	11,10	10,52	17,20	0,28	
R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	

1,60	0,81	1,53	0,05	1,39	1,32	2,15	0,04	Průměry sloupců
------	------	------	------	------	------	------	------	-----------------

ZA	$abc + ab + ac + a - bc - b - c - 1$	7,24	SA	0,819025	d = počet sloupců	8
ZB	$abc + ab - ac - a + bc + b - c - 1$	-10,88	SB	1,8496	r = počet řádků	8
ZC	$abc - ab + ac - a + bc - b + c - 1$	-35,64	SC	19,84703	N = celkový počet experimentů	64
ZAB	$abc + ab - ac - a - bc - b + c + 1$	2,6	SAB	0,105625	m = odhad střední hodnoty	1,108
ZAC	$abc - ab + ac - a - bc + b - c + 1$	0,64	SAC	0,0064		
ZBC	$abc - ab - ac + a + bc - b - c + 1$	-21,88	SBC	7,480225		
ZABC	$abc - ab - ac + a - bc + b + c - 1$	-10,8	SABC	1,8225		

Rozdíly uvnitř sloupců								
0,200	-0,153	-0,325	0,045	-0,288	-0,995	0,150	-0,005	1
-0,100	0,108	-0,525	0,025	0,012	-0,775	0,750	-0,015	2
-0,300	0,488	-0,025	-0,015	0,012	-0,995	0,150	0,005	3
0,100	-0,073	0,275	0,025	0,113	-0,855	-0,450	0,005	4
0,300	-0,133	-0,125	-0,025	0,012	-0,935	-0,250	-0,015	5
0,000	-0,073	0,175	-0,015	0,113	0,685	-0,050	0,025	6
0,000	-0,133	0,375	-0,025	0,113	0,985	0,050	-0,005	7
-0,200	-0,033	0,175	-0,015	-0,088	2,885	-0,350	0,005	8

Testované char. F		Má Vvýznam? 1=ano	Kvantil F $1-\alpha(1, v)$
FA	2,8	0	4,012973
FB	6,3	1	
FC	67,9	1	
FAB	0,4	0	
FAC	0,0	0	
FBC	25,6	1	
FABC	6,2	1	

SR = suma čtverců residua	16,3579
v = počet stupňů volnosti	56
SR/v	0,292105
α PRAVDĚPODOBNOST	0,05

Výpočet koeficientů		
b0	1,11	
b1	0,11	0
b2	-0,17	1
b3	-0,56	1
b4	0,04	0
b5	0,01	0
b6	-0,34	1
b7	-0,17	1

Počet důležitých faktorů	
n=	4

Kombinace	Výstup modelu
1	1,66
a	1,33
b	1,67
c	0,90
ab	2,01
ac	1,23
bc	0,21
abc	-0,13

x1	x2	x3	x12	x13	x23	x123
-1	-1	-1	1	1	1	-1
1	-1	-1	-1	-1	1	1
-1	1	-1	-1	1	-1	1
-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	-1	1	-1	-1	-1
1	-1	1	-1	1	-1	-1
-1	1	1	-1	-1	1	-1
1	1	1	1	1	1	1

Rozdíly od modelu								
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
0,14	-0,24	-0,47	-0,12	-0,23	-0,91	0,29	0,16	1
-0,16	0,03	-0,67	-0,14	0,08	-0,69	0,89	0,15	2
-0,36	0,41	-0,17	-0,18	0,08	-0,91	0,29	0,17	3
0,04	-0,16	0,13	-0,14	0,18	-0,77	-0,31	0,17	4
0,24	-0,22	-0,27	-0,19	0,08	-0,85	-0,11	0,15	5
-0,06	-0,16	0,03	-0,18	0,18	0,77	0,09	0,19	6
-0,06	-0,22	0,23	-0,19	0,18	1,07	0,19	0,16	7
-0,26	-0,12	0,03	-0,18	-0,02	2,97	-0,21	0,17	8

Součet čtverců odchylek naměřených hodnot od modelu			SS	17,28895
Podmínka $d^*r > n+1$		64	>	5
$d^*r - n - 1$		59		
$SS / (d^*r - n - 1)$		0,293033		

Testová charakteristika F pro model	< nebo >	Kritická hodnota F-rozdělení
1,003175887	<=	1,551217827

Popisuje model hodnoty s dostatečnou přesností?	ANO!
---	------

Faktorové experimenty, ELPOX SC 70MN, Cu přípojovací plošky, naměřená nelinearita VA charakteristiky

A1 = 168 hodin				A2 = 400 hodin				
B1 = 25°C		B2 = 85°C		B1 = 25°C		B2 = 85°C		
C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
0,70	0,48	0,44	0,04	0,80	0,88	0,68	0,14	1
0,76	0,40	0,38	0,05	0,38	0,28	0,38	0,05	2
0,92	0,20	0,50	0,03	0,86	0,36	0,48	0,03	3
0,92	0,30	0,25	0,03	0,88	0,22	0,34	0,03	4
0,98	0,36	0,64	0,04	0,64	0,54	0,42	0,10	5
0,72	0,64	0,38	0,07	0,72	0,76	0,26	0,13	6
0,88	0,50	0,52	0,06	0,64	0,42	0,34	0,11	7
0,76	0,38	0,82	0,03	0,72	0,72	0,54	0,08	8
6,64	3,26	3,93	0,35	5,64	4,18	3,44	0,67	
R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	

0,83	0,41	0,49	0,04	0,71	0,52	0,43	0,08	Průměry sloupců
------	------	------	------	------	------	------	------	-----------------

ZA	$abc + ab + ac + a - bc - b - c - 1$	-0,25	SA	0,00	d = počet sloupců 8 r = počet řádků 8 N = celkový počet experimentů 64 m = odhad střední hodnoty 0,4392
ZB	$abc + ab - ac - a + bc + b - c - 1$	-11,33	SB	2,01	
ZC	$abc - ab + ac - a + bc - b + c - 1$	-11,19	SC	1,96	
ZAB	$abc + ab - ac - a - bc - b + c + 1$	-0,09	SAB	0,00	
ZAC	$abc - ab + ac - a - bc + b - c + 1$	2,73	SAC	0,12	
ZBC	$abc - ab - ac + a + bc - b - c + 1$	-1,51	SBC	0,04	
ZABC	$abc - ab - ac + a - bc + b + c - 1$	-1,11	SABC	0,02	

Rozdíly uvnitř sloupců								
-0,13	0,07	-0,05	0,00	0,10	0,36	0,25	0,06	1
-0,07	-0,01	-0,11	0,01	-0,33	-0,24	-0,05	-0,03	2
0,09	-0,21	0,01	-0,01	0,16	-0,16	0,05	-0,05	3
0,09	-0,11	-0,24	-0,01	0,18	-0,30	-0,09	-0,05	4
0,15	-0,05	0,15	0,00	-0,06	0,02	-0,01	0,02	5
-0,11	0,23	-0,11	0,03	0,02	0,24	-0,17	0,05	6
0,05	0,09	0,03	0,02	-0,06	-0,10	-0,09	0,03	7
-0,07	-0,03	0,33	-0,01	0,02	0,20	0,11	0,00	8

Testované char. F		Má Vvýznam? 1=ano	Kvantil $F_{1-\alpha}(1, v)$
FA	0,0	0	4,012973
FB	97,6	1	
FC	95,2	1	
FAB	0,0	0	
FAC	5,7	1	
FBC	1,7	0	
FABC	0,9	0	

SR = suma čtverců residua	1,15
v = počet stupňů volnosti	56
SR/v	0,0205
α PRAVDĚPODOBNOST	0,05

Výpočet koeficientů		
b0	0,44	
b1	0,00	0
b2	-0,18	1
b3	-0,17	1
b4	0,00	0
b5	0,04	1
b6	-0,02	0
b7	-0,02	0

Počet důležitých faktorů	
n=	3

Kombinace	Výstup modelu
1	0,83
a	0,75
b	0,48
c	0,40
ab	0,39
ac	0,48
bc	0,04
abc	0,13

x1	x2	x3	x12	x13	x23	x123
-1	-1	-1	1	1	1	-1
1	-1	-1	-1	-1	1	1
-1	1	-1	-1	1	-1	1
-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	-1	1	-1	-1	-1
1	-1	1	-1	1	-1	-1
-1	1	1	-1	-1	1	-1
1	1	1	1	1	1	1

Rozdíly od modelu								
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
-0,13	0,08	-0,04	0,00	0,05	0,40	0,29	0,01	1
-0,07	0,00	-0,10	0,01	-0,37	-0,20	-0,01	-0,08	2
0,09	-0,20	0,02	-0,01	0,11	-0,12	0,09	-0,10	3
0,09	-0,10	-0,23	-0,01	0,13	-0,26	-0,05	-0,10	4
0,15	-0,04	0,16	0,00	-0,11	0,06	0,03	-0,03	5
-0,11	0,24	-0,10	0,03	-0,03	0,28	-0,13	0,00	6
0,05	0,10	0,04	0,02	-0,11	-0,06	-0,05	-0,02	7
-0,07	-0,02	0,34	-0,01	-0,03	0,24	0,15	-0,05	8

Součet čtverců odchylek naměřených hodnot od modelu	SS	1,21
Podmínka $d^*r > n+1$	64	>
$d^*r - n - 1$	60	
$SS / (d^*r - n - 1)$	0,020112	

Testová charakteristika F pro model	< nebo >	Kritická hodnota F-rozdělení
0,978737287	<=	1,549112862

Popisuje model hodnoty s dostatečnou přesností?	ANO!
---	------

Příloha 7

Faktorové experimenty, Loctite 3888, pozlacené Cu přípojovací plošky, naměřený odpor

A1 = 168 hodin				A2 = 400 hodin				
B1 = 25°C		B2 = 85°C		B1 = 25°C		B2 = 85°C		
C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	
l	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
134	230	201	576	198	192	986	444	1
144	169	740	764	160	548	694	3810	2
129	243	64	1282	118	248	695	2775	3
129	266	78	649	158	94	810	327	4
124	257	466	1064	203	132	2060	1668	5
45	299	575	1513	154	125	1923	1031	6
145	88	449	716	101	295	2176	1937	7
124	194	644	1184	126	251	812	2646	8
973	1745	3214	7746	1215	1882	10154	14636	
R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	

122	218	402	968	152	235	1269	1830	Průměry sloupců
-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	-----------------

ZA	$abc + ab + ac + a - bc - b - c - 1$	14210,5	SA	3155286	d = počet sloupců	8
ZB	$abc + ab - ac - a + bc + b - c - 1$	29935,5	SB	14002096	r = počet řádků	8
ZC	$abc - ab + ac - a + bc - b + c - 1$	10452,5	SC	1707106	N = celkový počet experimentů	64
ZAB	$abc + ab - ac - a - bc - b + c + 1$	13450,5	SAB	2826812	m = odhad střední hodnoty	649,4
ZAC	$abc - ab + ac - a - bc + b - c + 1$	-154,5	SAC	372,9727		
ZBC	$abc - ab - ac + a + bc - b - c + 1$	7574,5	SBC	896453,9		
ZABC	$abc - ab - ac + a - bc + b + c - 1$	55,5	SABC	48,12891		

Rozdíly uvnitř sloupců								
11,9	11,9	-201,3	-392,7	46,1	-43,8	-283,8	-1385,5	1
22,4	-49,1	338,3	-204,7	7,6	312,8	-575,8	1980,0	2
7,4	24,9	-337,8	313,3	-33,9	12,3	-574,8	945,5	3
6,9	47,4	-324,3	-319,2	5,6	-141,8	-459,3	-1503,0	4
2,4	38,4	63,8	95,3	50,6	-103,8	790,8	-162,0	5
-76,6	80,9	172,8	544,8	1,6	-110,8	653,8	-799,0	6
23,4	-130,6	46,8	-252,7	-51,4	59,3	906,3	107,5	7
1,9	-24,1	241,8	215,8	-26,4	15,8	-457,3	816,5	8

Testované char. F		Má Vvýznam? 1=ano	Kvantil F $1-\alpha(1, v)$
FA	11,9	1	4,012973
FB	52,8	1	
FC	6,4	1	
FAB	10,7	1	
FAC	0,0	0	
FBC	3,4	0	
FABC	0,0	0	

SR = suma čtverců residua	14847564
v = počet stupňů volnosti	56
SR/v	265135,1
α PRAVDĚPODOBNOST	0,05

Výpočet koeficientů		
b0	649,4	
b1	222,0	1
b2	467,7	1
b3	163,3	1
b4	210,2	1
b5	-2,4	0
b6	118,4	0
b7	0,9	0

Počet důležitých faktorů	
n=	4

Kombinace	Výstup modelu
1	6,5
a	30,2
b	521,6
c	333,1
ab	1386,1
ac	356,9
bc	848,3
abc	1712,7

x1	x2	x3	x12	x13	x23	x123
-1	-1	-1	1	1	1	-1
1	-1	-1	-1	-1	1	1
-1	1	-1	-1	1	-1	1
-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	-1	1	-1	-1	-1
1	-1	1	-1	1	-1	-1
-1	1	1	-1	-1	1	-1
1	1	1	1	1	1	1

Rozdíly od modelu								
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
127,0	-103,1	-321,1	-272,8	167,8	-165,4	-400,6	-1268,7	1
137,5	-164,1	218,4	-84,8	129,3	191,1	-692,6	2096,8	2
122,5	-90,1	-457,6	433,2	87,8	-109,4	-691,6	1062,3	3
122,0	-67,6	-444,1	-199,3	127,3	-263,4	-576,1	-1386,2	4
117,5	-76,6	-56,1	215,2	172,3	-225,4	673,9	-45,2	5
38,5	-34,1	52,9	664,7	123,3	-232,4	536,9	-682,2	6
138,5	-245,6	-73,1	-132,8	70,3	-62,4	789,4	224,3	7
117,0	-139,1	121,9	335,7	95,3	-105,9	-574,1	933,3	8

Součet čtverců odchylek naměřených hodnot od modelu		SS	15744439
Podmínka $d^*r > n+1$	64	>	5
$d^*r - n - 1$	59		
$SS / (d^*r - n - 1)$	266854,9		

Testová charakteristika F pro model	< nebo >	Kritická hodnota F-rozdělení
1,006486608	<=	1,551217827

Popisuje model hodnoty s dostatečnou přesností?	ANO!
---	------

Faktorové experimenty, Loctite 3888, Cu přípojovací plošky, naměřený odpor

A1 = 168 hodin				A2 = 400 hodin				
B1 = 25°C		B2 = 85°C		B1 = 25°C		B2 = 85°C		
C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
134	75	386	4156	74	268	3306	724	1
144	180	196	2422	202	398	2295	503	2
129	240	195	987	133	121	1794	505	3
129	113	462	3755	88	183	1783	599	4
124	158	223	583	74	296	445	682	5
133	317	143	376	100	130	2481	508	6
145	425	231	1369	164	105	295	385	7
124	148	377	557	119	165	319	897	8
1060	1654	2211	14204	952	1665	12716	4802	
R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	

133	207	276	1776	119	208	1590	600	Průměry sloupců
-----	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----------------

ZA	$abc + ab + ac + a - bc - b - c - 1$	1004,5	SA	15765,94	d = počet sloupců	8
ZB	$abc + ab - ac - a + bc + b - c - 1$	28602	SB	12782859	r = počet řádků	8
ZC	$abc - ab + ac - a + bc - b + c - 1$	5385,5	SC	453181,4	N = celkový počet experimentů	64
ZAB	$abc + ab - ac - a - bc - b + c + 1$	1200,5	SAB	22518,75	m = odhad střední hodnoty	613,4766
ZAC	$abc - ab + ac - a - bc + b - c + 1$	-19788	SAC	6118511		
ZBC	$abc - ab - ac + a + bc - b - c + 1$	2771,5	SBC	120018,9		
ZABC	$abc - ab - ac + a - bc + b + c - 1$	-20026	SABC	6266573		

Rozdíly uvnitř sloupců								
1,0	-131,8	109,1	2380,5	-45,4	59,9	1716,0	123,3	1
11,5	-26,8	-80,4	646,0	82,6	189,9	705,5	-97,2	2
-3,5	32,8	-81,4	-788,5	14,1	-87,1	204,0	-95,2	3
-4,0	-93,8	185,1	1979,5	-31,4	-25,1	193,5	-1,2	4
-8,5	-49,3	-53,4	-1193,0	-44,9	87,9	-1144,5	81,8	5
0,0	109,8	-133,9	-1399,5	-18,9	-78,6	891,0	-92,2	6
12,5	218,3	-45,4	-406,5	44,6	-103,6	-1294,5	-215,7	7
-9,0	-59,3	100,1	-1218,5	-0,4	-43,6	-1271,0	296,3	8

Testované char. F		Má Vvýznam? 1=ano	Kvantil F $1-\alpha(1, v)$
FA	0,0	0	4,012973
FB	28,6	1	
FC	1,0	0	
FAB	0,1	0	
FAC	13,7	1	
FBC	0,3	0	
FABC	14,0	1	

SR = suma čtverců residua	25030660
v = počet stupňů volnosti	56
SR/v	446976,1
α PRAVDĚPODOBNOST	0,05

Výpočet koeficientů		
b0	613,5	
b1	15,7	0
b2	446,9	1
b3	84,1	0
b4	18,8	0
b5	-309,2	1
b6	43,3	0
b7	-312,9	1

Počet důležitých faktorů	
n=	3

Kombinace	Výstup modelu
1	170,3
a	162,8
b	438,3
c	162,8
ab	1682,5
ac	170,3
bc	1682,5
abc	438,3

x1	x2	x3	x12	x13	x23	x123
-1	-1	-1	1	1	1	-1
1	-1	-1	-1	-1	1	1
-1	1	-1	-1	1	-1	1
-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	-1	1	-1	-1	-1
1	-1	1	-1	1	-1	-1
-1	1	1	-1	-1	1	-1
1	1	1	1	1	1	1

Rozdíly od modelu								
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
-36,8	-87,8	-52,8	2473,5	-89,3	97,7	1623,0	285,2	1
-26,3	17,2	-242,3	739,0	38,7	227,7	612,5	64,7	2
-41,3	76,7	-243,3	-695,5	-29,8	-49,3	111,0	66,7	3
-41,8	-49,8	23,2	2072,5	-75,3	12,7	100,5	160,7	4
-46,3	-5,3	-215,3	-1100,0	-88,8	125,7	-1237,5	243,7	5
-37,8	153,7	-295,8	-1306,5	-62,8	-40,8	798,0	69,7	6
-25,3	262,2	-207,3	-313,5	0,7	-65,8	-1387,5	-53,8	7
-46,8	-15,3	-61,8	-1125,5	-44,3	-5,8	-1364,0	458,2	8

Součet čtverců odchylek naměřených hodnot od modelu			SS	25642145
Podmínka $d^*r > n+1$		64	>	4
$d^*r - n - 1$		60		
$SS / (d^*r - n - 1)$		427369,1		

Testová charakteristika F pro model	< nebo >	Kritická hodnota F-rozdělení
0,956134145	<=	1,549112862

Popisuje model hodnoty s dostatečnou přesností?	ANO!
---	------

Faktorové experimenty, Loctite 3888, pozlacené Cu přípojovací plošky, naměřená nelinearita VA charakteristiky

A1 = 168 hodin				A2 = 400 hodin				
B1 = 25°C		B2 = 85°C		B1 = 25°C		B2 = 85°C		
C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
1,50	1,90	1,70	0,03	0,98	0,28	0,98	0,03	1
1,40	1,00	3,00	0,04	1,10	0,11	0,08	0,04	2
1,50	2,20	2,20	0,02	0,92	0,22	0,11	0,02	3
0,90	2,60	0,72	0,03	0,90	0,72	0,12	0,03	4
1,30	0,94	1,80	0,02	1,10	0,78	0,07	0,02	5
0,90	1,30	1,60	0,05	1,00	0,86	0,10	0,05	6
0,82	0,68	1,50	0,03	0,96	0,98	0,16	0,03	7
1,70	0,62	1,90	0,04	0,94	1,10	0,23	0,04	8
10,02	11,24	14,42	0,26	7,90	5,05	1,85	0,26	
R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	

1,25	1,41	1,80	0,03	0,99	0,63	0,23	0,03	Průměry sloupců
------	------	------	------	------	------	------	------	-----------------

ZA	$abc + ab + ac + a - bc - b - c - 1$	-20,88	SA	6,8121	d = počet sloupců	8
ZB	$abc + ab - ac - a + bc + b - c - 1$	-17,42	SB	4,741506	r = počet řádků	8
ZC	$abc - ab + ac - a + bc - b + c - 1$	-17,38	SC	4,719756	N = celkový počet experimentů	64
ZAB	$abc + ab - ac - a - bc - b + c + 1$	-4,26	SAB	0,283556	m = odhad střední hodnoty	0,797
ZAC	$abc - ab + ac - a - bc + b - c + 1$	8,5	SAC	1,128906		
ZBC	$abc - ab - ac + a + bc - b - c + 1$	-14,12	SBC	3,115225		
ZABC	$abc - ab - ac + a - bc + b + c - 1$	16,64	SABC	4,3264		

Rozdíly uvnitř sloupců								
0,25	0,50	-0,10	0,00	-0,01	-0,35	0,75	0,00	1
0,15	-0,41	1,20	0,01	0,11	-0,52	-0,15	0,01	2
0,25	0,80	0,40	-0,01	-0,07	-0,41	-0,12	-0,01	3
-0,35	1,20	-1,08	0,00	-0,09	0,09	-0,11	0,00	4
0,05	-0,47	0,00	-0,01	0,11	0,15	-0,16	-0,01	5
-0,35	-0,11	-0,20	0,02	0,01	0,23	-0,13	0,02	6
-0,43	-0,73	-0,30	0,00	-0,03	0,35	-0,07	0,00	7
0,45	-0,79	0,10	0,01	-0,05	0,47	0,00	0,01	8

Testované char. F		Má Vv ýznam? 1=ano	Kvantil $F_{1-\alpha}(1, v)$
FA	41,3	1	4,012973
FB	28,8	1	
FC	28,6	1	
FAB	1,7	0	
FAC	6,9	1	
FBC	18,9	1	
FABC	26,3	1	

SR = suma čtverců residua	9,225925
v = počet stupňů volnosti	56
SR/v	0,164749
α PRAVDĚPODOBNOST	0,05

Výpočet koeficientů		
b0	0,797	
b1	-0,326	1
b2	-0,272	1
b3	-0,272	1
b4	-0,067	0
b5	0,133	1
b6	-0,221	1
b7	0,260	1

Počet důležitých faktorů	
n=	6

Kombinace	Výstup modelu
1	1,3
a	0,9
b	1,7
c	1,5
ab	0,3
ac	0,6
bc	0,0
abc	0,1

x1	x2	x3	x12	x13	x23	x123
-1	-1	-1	1	1	1	-1
1	-1	-1	-1	-1	1	1
-1	1	-1	-1	1	-1	1
-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	-1	1	-1	-1	-1
1	-1	1	-1	1	-1	-1
-1	1	1	-1	-1	1	-1
1	1	1	1	1	1	1

Rozdíly od modelu								
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
0,181	0,428	-0,036	0,064	0,059	-0,285	0,682	-0,069	1
0,081	-0,472	1,264	0,074	0,179	-0,455	-0,218	-0,059	2
0,181	0,728	0,464	0,054	-0,001	-0,345	-0,188	-0,079	3
-0,419	1,128	-1,016	0,064	-0,021	0,155	-0,178	-0,069	4
-0,019	-0,532	0,064	0,054	0,179	0,215	-0,228	-0,079	5
-0,419	-0,172	-0,136	0,084	0,079	0,295	-0,198	-0,049	6
-0,499	-0,792	-0,236	0,064	0,039	0,415	-0,138	-0,069	7
0,381	-0,852	0,164	0,074	0,019	0,535	-0,068	-0,059	8

Součet čtverců odchylek naměřených hodnot od modelu	SS	9,509481
Podmínka $d^*r > n+1$	64	>
$d^*r - n - 1$	57	
$SS / (d^*r - n - 1)$	0,166833	

Testová charakteristika F pro model	< nebo >	Kritická hodnota F-rozdělení
1,012651658	<=	1,555624898

Popisuje model hodnoty s dostatečnou přesností?	ANO!
---	------

Faktorové experimenty, Loctite 3888, Cu přípojovací plošky, naměřená nelinearita VA charakteristiky

A1 = 168 hodin				A2 = 400 hodin				
B1 = 25°C		B2 = 85°C		B1 = 25°C		B2 = 85°C		
C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
0,54	1,80	0,28	0,26	0,90	0,60	0,09	0,26	1
0,72	2,50	0,25	0,17	0,78	0,24	0,08	0,50	2
0,84	3,20	0,10	0,21	0,62	0,66	0,09	0,32	3
0,74	1,20	0,34	0,34	1,60	0,42	0,42	0,64	4
0,38	0,98	0,14	0,22	0,94	0,64	0,46	0,46	5
0,40	0,84	1,20	0,56	0,78	0,42	0,82	0,62	6
0,38	0,58	0,82	0,34	1,50	0,52	0,32	0,74	7
0,32	0,44	0,54	0,46	1,90	0,58	0,42	0,28	8
4,32	11,54	3,67	2,56	9,02	4,08	2,70	3,82	
R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	

0,54	1,44	0,46	0,32	1,13	0,51	0,34	0,48	Průměry sloupců
------	------	------	------	------	------	------	------	-----------------

ZA	$abc + ab + ac + a - bc - b - c - 1$	-2,47	SA	0,095327	d = počet sloupců	8
ZB	$abc + ab - ac - a + bc + b - c - 1$	-16,21	SB	4,105689	r = počet řádků	8
ZC	$abc - ab + ac - a + bc - b + c - 1$	2,29	SC	0,081939	N = celkový počet experimentů	64
ZAB	$abc + ab - ac - a - bc - b + c + 1$	3,05	SAB	0,145352	m = odhad střední hodnoty	0,652
ZAC	$abc - ab + ac - a - bc + b - c + 1$	-9,93	SAC	1,540702		
ZBC	$abc - ab - ac + a + bc - b - c + 1$	-2,27	SBC	0,080514		
ZABC	$abc - ab - ac + a - bc + b + c - 1$	14,39	SABC	3,235502		

Rozdíly uvnitř sloupců								
0,00	0,36	-0,18	-0,06	-0,23	0,09	-0,25	-0,22	1
0,18	1,06	-0,21	-0,15	-0,35	-0,27	-0,26	0,02	2
0,30	1,76	-0,36	-0,11	-0,51	0,15	-0,25	-0,16	3
0,20	-0,24	-0,12	0,02	0,47	-0,09	0,08	0,16	4
-0,16	-0,46	-0,32	-0,10	-0,19	0,13	0,12	-0,02	5
-0,14	-0,60	0,74	0,24	-0,35	-0,09	0,48	0,14	6
-0,16	-0,86	0,36	0,02	0,37	0,01	-0,02	0,26	7
-0,22	-1,00	0,08	0,14	0,77	0,07	0,08	-0,20	8

Testované char. F		Má Vvýznam? 1=ano	Kvantil F1- $\alpha(1, v)$
FA	0,508	0,000	4,012973
FB	21,901	1,000	
FC	0,437	0,000	
FAB	0,775	0,000	
FAC	8,218	1,000	
FBC	0,429	0,000	
FABC	17,259	1,000	

SR = suma čtverců residua	10,49829
v = počet stupňů volnosti	56
SR/v	0,187469
α PRAVDĚPODOBNOST	0,05

Výpočet koeficientů		
b0	0,65	
b1	-0,04	0
b2	-0,25	1
b3	0,04	0
b4	0,05	0
b5	-0,16	1
b6	-0,04	0
b7	0,22	1

Počet důležitých faktorů	
n=	3

Kombinace	Výstup modelu
1	0,525
a	1,285
b	0,468
c	1,285
ab	0,329
ac	0,525
bc	0,329
abc	0,468

x1	x2	x3	x12	x13	x23	x123
-1	-1	-1	1	1	1	-1
1	-1	-1	-1	-1	1	1
-1	1	-1	-1	1	-1	1
-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	-1	1	-1	-1	-1
1	-1	1	-1	1	-1	-1
-1	1	1	-1	-1	1	-1
1	1	1	1	1	1	1

Rozdíly od modelu								
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
0,015	0,515	-0,188	-0,069	-0,385	0,075	-0,239	-0,208	1
0,195	1,215	-0,218	-0,159	-0,505	-0,285	-0,249	0,032	2
0,315	1,915	-0,368	-0,119	-0,665	0,135	-0,239	-0,148	3
0,215	-0,085	-0,128	0,011	0,315	-0,105	0,091	0,172	4
-0,145	-0,305	-0,328	-0,109	-0,345	0,115	0,131	-0,008	5
-0,125	-0,445	0,732	0,231	-0,505	-0,105	0,491	0,152	6
-0,145	-0,705	0,352	0,011	0,215	-0,005	-0,009	0,272	7
-0,205	-0,845	0,072	0,131	0,615	0,055	0,091	-0,188	8

Součet čtverců odchylek naměřených hodnot od modelu			SS	10,90142
Podmínka $d^*r > n+1$		64	>	4
$d^*r - n - 1$		60		
$SS / (d^*r - n - 1)$		0,18169		

Testová charakteristika F pro model	< nebo >	Kritická hodnota F-rozdělení
0,969173068	<=	1,549112862

Popisuje model hodnoty s dostatečnou přesností?	ANO!
---	------

Příloha 8

Faktorové experimenty, Permacol 2369/2, pozlacené Cu přípojovací plošky, naměřený odpor

A1 = 168 hodin				A2 = 400 hodin				
B1 = 25°C		B2 = 85°C		B1 = 25°C		B2 = 85°C		
C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	
l	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
139	38	62	717	181	62	53	558	1
93	53	72	751	55	128	104	597	2
79	81	73	825	118	124	97	799	3
183	150	43	707	122	417	56	546	4
200	144	202	258	26	179	106	525	5
71	118	115	250	990	315	135	1342	6
45	83	211	800	34	180	77	888	7
136	73	105	749	66	254	111	936	8
944	738	882	5055	1591	1657	738	6189	
R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	

118	92	110	632	199	207	92	774	Průměry sloupců
-----	----	-----	-----	-----	-----	----	-----	-----------------

ZA	$abc + ab + ac + a - bc - b - c - 1$	2555	SA	102000,4	d = počet sloupců	8
ZB	$abc + ab - ac - a + bc + b - c - 1$	7934	SB	983568,1	r = počet řádků	8
ZC	$abc - ab + ac - a + bc - b + c - 1$	9485	SC	1405707	N = celkový počet experimentů	64
ZAB	$abc + ab - ac - a - bc - b + c + 1$	-575	SAB	5166,016	m = odhad střední hodnoty	278
ZAC	$abc - ab + ac - a - bc + b - c + 1$	1550	SAC	37539,06		
ZBC	$abc - ab - ac + a + bc - b - c + 1$	9765	SBC	1489925		
ZABC	$abc - ab - ac + a - bc + b + c - 1$	1006	SABC	15813,06		

Rozdíly uvnitř sloupců								
20,5	-54,8	-48,2	84,6	-17,8	-145,6	-39,2	-216,1	1
-25,5	-39,8	-38,2	119,1	-144,3	-79,1	11,8	-177,1	2
-39,0	-11,3	-37,2	192,6	-81,3	-83,6	4,8	24,9	3
64,5	57,8	-67,7	75,1	-77,3	209,9	-36,2	-227,6	4
82,0	51,3	91,8	-373,9	-172,8	-28,1	13,3	-248,6	5
-47,0	25,8	4,8	-382,4	791,2	107,4	42,3	568,4	6
-73,0	-9,8	100,3	167,6	-164,8	-27,6	-15,2	114,4	7
17,5	-19,3	-5,7	117,1	-132,8	46,4	18,3	161,9	8

Testované char. F		Má Vv ýznam? 1=ano	Kvantil $F_{1-\alpha}(1, v)$
FA	3,1	0	4,012973
FB	29,9	1	
FC	42,7	1	
FAB	0,2	0	
FAC	1,1	0	
FBC	45,3	1	
FABC	0,5	0	

SR = suma čtverců residua	1841642
v = počet stupňů volnosti	56
SR/v	32886,46
α PRAVDĚPODOBNOST	0,05

Výpočet koeficientů		
b0	278,0	
b1	39,9	0
b2	124,0	1
b3	148,2	1
b4	-9,0	0
b5	24,2	0
b6	152,6	1
b7	15,7	0

Počet důležitých faktorů	
n=	3

Kombinace	Výstup modelu
1	158,4
a	158,4
b	101,2
c	149,7
ab	101,2
ac	149,7
bc	702,8
abc	702,8

x1	x2	x3	x12	x13	x23	x123
-1	-1	-1	1	1	1	-1
1	-1	-1	-1	-1	1	1
-1	1	-1	-1	1	-1	1
-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	-1	1	-1	-1	-1
1	-1	1	-1	1	-1	-1
-1	1	1	-1	-1	1	-1
1	1	1	1	1	1	1

Rozdíly od modelu								
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
-19,9	-112,2	-39,2	13,8	22,6	-88,2	-48,2	-145,3	1
-65,9	-97,2	-29,2	48,3	-103,9	-21,7	2,8	-106,3	2
-79,4	-68,7	-28,2	121,8	-40,9	-26,2	-4,2	95,8	3
24,1	0,3	-58,7	4,3	-36,9	267,3	-45,2	-156,8	4
41,6	-6,2	100,8	-444,8	-132,4	29,3	4,3	-177,8	5
-87,4	-31,7	13,8	-453,3	831,6	164,8	33,3	639,3	6
-113,4	-67,2	109,3	96,8	-124,4	29,8	-24,2	185,3	7
-22,9	-76,7	3,3	46,3	-92,4	103,8	9,3	232,8	8

Součet čtverců odchylek naměřených hodnot od modelu	SS	2002160
Podmínka $d^*r > n+1$	64	> 4
$d^*r - n - 1$	60	
$SS / (d^*r - n - 1)$	33369,34	

Testová charakteristika F pro model	< nebo >	Kritická hodnota F-rozdělení
1,014683186	<=	1,549112862

Popisuje model hodnoty s dostatečnou přesností?	ANO!
---	------

Faktorové experimenty, Permacol 2369/2, Cu přípojovací plošky, naměřený odpor

A1 = 168 hodin				A2 = 400 hodin				
B1 = 25°C		B2 = 85°C		B1 = 25°C		B2 = 85°C		
C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
555	300	276	377	317	588	1298	1985	1
664	586	260	717	335	499	848	2894	2
429	649	250	751	426	312	266	1601	3
321	587	277	707	312	421	504	1714	4
244	433	309	258	265	456	175	1087	5
516	615	274	250	385	364	550	2937	6
157	631	243	800	407	595	1213	1429	7
179	240	323	749	271	363	420	2394	8
3063	4039	2210	4607	2716	3597	5272	16040	
R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	

383	505	276	576	339	450	659	2005	Průměry sloupců
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	-----------------

ZA	$abc + ab + ac + a - bc - b - c - 1$	13706	SA	2935226	d = počet sloupců	8
ZB	$abc + ab - ac - a + bc + b - c - 1$	14715	SB	3383300	r = počet řádků	8
ZC	$abc - ab + ac - a + bc - b + c - 1$	15022	SC	3525945	N = celkový počet experimentů	64
ZAB	$abc + ab - ac - a - bc - b + c + 1$	15285	SAB	3650488	m = odhad střední hodnoty	649
ZAC	$abc - ab + ac - a - bc + b - c + 1$	8276	SAC	1070190		
ZBC	$abc - ab - ac + a + bc - b - c + 1$	11309	SBC	1998336		
ZABC	$abc - ab - ac + a - bc + b + c - 1$	8465	SABC	1119629		

Rozdíly uvnitř sloupců								
171,6	-204,8	-0,7	-199,4	-22,9	138,4	639,0	-20,0	1
280,6	80,7	-16,7	140,6	-4,9	49,4	188,5	889,0	2
46,1	144,2	-26,2	175,1	86,6	-138,1	-393,5	-404,0	3
-61,9	81,7	0,8	131,1	-27,9	-29,1	-155,5	-291,5	4
-138,9	-71,8	32,3	-317,9	-74,9	5,9	-484,0	-918,0	5
133,1	109,7	-2,7	-326,4	45,6	-85,6	-109,0	932,0	6
-226,4	125,7	-33,7	223,6	67,1	145,4	553,5	-576,0	7
-204,4	-265,3	46,8	173,1	-68,4	-86,6	-239,0	388,5	8

Testované char. F		Má Vvýznam? l=ano	Kvantil F $1-\alpha(1, v)$
FA	30,5	1	4,012973
FB	35,1	1	
FC	36,6	1	
FAB	37,9	1	
FAC	11,1	1	
FBC	20,8	1	
FABC	11,6	1	

SR = suma čtverců residua	5392434
v = počet stupňů volnosti	56
SR/v	96293,47
α PRAVDĚPODOBNOST	0,05

Výpočet koeficientů		
b0	649,1	
b1	214,2	1
b2	229,9	1
b3	234,7	1
b4	238,8	1
b5	129,3	1
b6	176,7	1
b7	132,3	1

Počet důležitých faktorů	
n=	7

Kombinace	Výstup modelu
1	382,9
a	339,4
b	276,2
c	504,8
ab	659,0
ac	449,6
bc	575,9
abc	2005,0

x1	x2	x3	x12	x13	x23	x123
-1	-1	-1	1	1	1	-1
1	-1	-1	-1	-1	1	1
-1	1	-1	-1	1	-1	1
-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	-1	1	-1	-1	-1
1	-1	1	-1	1	-1	-1
-1	1	1	-1	-1	1	-1
1	1	1	1	1	1	1

Rozdíly od modelu								
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
171,6	-204,8	-0,7	-199,4	-22,9	138,4	639,0	-20,0	1
280,6	80,7	-16,7	140,6	-4,9	49,4	188,5	889,0	2
46,1	144,2	-26,2	175,1	86,6	-138,1	-393,5	-404,0	3
-61,9	81,7	0,8	131,1	-27,9	-29,1	-155,5	-291,5	4
-138,9	-71,8	32,3	-317,9	-74,9	5,9	-484,0	-918,0	5
133,1	109,7	-2,7	-326,4	45,6	-85,6	-109,0	932,0	6
-226,4	125,7	-33,7	223,6	67,1	145,4	553,5	-576,0	7
-204,4	-265,3	46,8	173,1	-68,4	-86,6	-239,0	388,5	8

Součet čtverců odchylek naměřených hodnot od modelu			SS	5392434
Podmínka $d^*r > n+1$		64	>	8
$d^*r - n - 1$		56		
$SS / (d^*r - n - 1)$		96293,47		

Testová charakteristika F pro model	< nebo >	Kritická hodnota F-rozdělení
1	<=	1,557933374

Popisuje model hodnoty s dostatečnou přesností?	ANO!
---	------

Faktorové experimenty, Permacol 2369/2, pozlacené Cu přípojovací plošky, naměřená nelinearita

VA charakteristiky

A1 = 168 hodin				A2 = 400 hodin				
B1 = 25°C		B2 = 85°C		B1 = 25°C		B2 = 85°C		
C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
1,20	0,12	0,30	0,44	1,20	0,32	1,50	0,09	1
1,40	0,16	0,34	0,76	0,64	0,32	1,50	0,24	2
1,00	0,26	0,28	0,26	0,60	0,26	1,00	0,05	3
1,10	0,50	0,44	1,10	0,66	0,42	0,76	0,32	4
1,30	0,50	0,42	0,52	0,86	0,12	1,10	0,26	5
1,20	0,70	0,42	0,74	1,20	0,22	0,78	0,28	6
1,40	0,46	0,48	0,98	1,80	0,12	1,10	0,24	7
0,90	0,48	0,36	0,54	3,80	0,14	0,70	0,36	8
9,50	3,18	3,04	5,34	10,76	1,92	8,44	1,84	
R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	

1,19	0,40	0,38	0,67	1,35	0,24	1,06	0,23	Průměry sloupců
------	------	------	------	------	------	------	------	-----------------

ZA	$abc + ab + ac + a - bc - b - c - 1$	13706	SA	1,9	d = počet sloupců	8
ZB	$abc + ab - ac - a + bc + b - c - 1$	14715	SB	-6,7	r = počet řádků	8
ZC	$abc - ab + ac - a + bc - b + c - 1$	15022	SC	-19,46	N = celkový počet experimentů	64
ZAB	$abc + ab - ac - a - bc - b + c + 1$	15285	SAB	1,9	m = odhad střední hodnoty	0,688
ZAC	$abc - ab + ac - a - bc + b - c + 1$	8276	SAC	-11,42		
ZBC	$abc - ab - ac + a + bc - b - c + 1$	11309	SBC	10,86		
ZABC	$abc - ab - ac + a - bc + b + c - 1$	8465	SABC	-6,38		

Rozdíly uvnitř sloupců								
0,01	-0,28	-0,08	-0,23	-0,15	0,08	0,45	-0,14	1
0,21	-0,24	-0,04	0,09	-0,71	0,08	0,45	0,01	2
-0,19	-0,14	-0,10	-0,41	-0,75	0,02	-0,05	-0,18	3
-0,09	0,10	0,06	0,43	-0,69	0,18	-0,30	0,09	4
0,11	0,10	0,04	-0,15	-0,49	-0,12	0,05	0,03	5
0,01	0,30	0,04	0,07	-0,15	-0,02	-0,28	0,05	6
0,21	0,06	0,10	0,31	0,46	-0,12	0,05	0,01	7
-0,29	0,08	-0,02	-0,13	2,46	-0,10	-0,36	0,13	8

Testované char. F		Má Vv ýznam? 1=ano	Kvantil $F_{1-\alpha}(1, v)$
FA	0,3	0	4,012973
FB	3,9	0	
FC	33,2	1	
FAB	0,3	0	
FAC	11,4	1	
FBC	10,3	1	
FABC	3,6	0	

SR = suma čtverců residua	9,98365
v = počet stupňů volnosti	56
SR/v	0,178279
α PRAVDĚPODOBNOST	0,05

Výpočet koeficientů		
b0	0,69	
b1	0,03	0
b2	-0,10	0
b3	-0,30	1
b4	0,03	0
b5	-0,18	1
b6	0,17	1
b7	-0,10	0

Počet důležitých faktorů	
n=	3

Kombinace	Výstup modelu
1	0,98
a	1,34
b	0,64
c	0,39
ab	1,00
ac	0,04
bc	0,73
abc	0,38

x1	x2	x3	x12	x13	x23	x123
-1	-1	-1	1	1	1	-1
1	-1	-1	-1	-1	1	1
-1	1	-1	-1	1	-1	1
-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	-1	1	-1	-1	-1
1	-1	1	-1	1	-1	-1
-1	1	1	-1	-1	1	-1
1	1	1	1	1	1	1

Rozdíly od modelu								
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
0,22	-0,27	-0,34	-0,29	-0,14	0,28	0,50	-0,29	1
0,42	-0,23	-0,30	0,03	-0,70	0,28	0,50	-0,14	2
0,02	-0,13	-0,36	-0,47	-0,74	0,22	0,00	-0,33	3
0,12	0,11	-0,20	0,37	-0,68	0,38	-0,24	-0,06	4
0,32	0,11	-0,22	-0,21	-0,48	0,08	0,10	-0,12	5
0,22	0,31	-0,22	0,01	-0,14	0,18	-0,22	-0,10	6
0,42	0,07	-0,16	0,25	0,46	0,08	0,10	-0,14	7
-0,08	0,09	-0,28	-0,19	2,46	0,10	-0,30	-0,02	8

Součet čtverců odchylek naměřených hodnot od modelu	SS	11,43388
Podmínka $d^*r > n+1$	64	>
$d^*r - n - 1$	60	
$SS / (d^*r - n - 1)$	0,190565	

Testová charakteristika F pro model	< nebo >	Kritická hodnota F-rozdělení
1,068909333	<=	1,549112862

Popisuje model hodnoty s dostatečnou přesností?	ANO!
---	------

Faktorové experimenty, Permacol 2369/2, Cu přípojovací plošky, naměřená nelinearita VA charakteristiky

A1 = 168 hodin				A2 = 400 hodin				
B1 = 25°C		B2 = 85°C		B1 = 25°C		B2 = 85°C		
C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	C1 = 50 %	C2 = 85%	
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
0,52	0,10	0,13	0,26	0,22	0,14	0,24	0,64	1
0,64	0,10	0,10	0,25	0,28	0,32	0,14	0,68	2
0,58	0,10	0,08	0,29	0,18	0,26	0,08	0,66	3
0,60	0,10	0,06	0,21	0,28	0,42	0,21	0,32	4
0,72	0,10	0,07	0,46	0,22	0,12	0,15	0,82	5
0,48	0,10	0,09	0,82	0,48	0,22	0,09	0,94	6
0,80	0,10	0,08	0,76	0,24	0,12	0,08	0,98	7
0,76	0,10	0,09	0,48	0,22	0,14	0,06	0,82	8
5,10	0,80	0,70	3,53	2,12	1,74	1,05	5,86	
R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	

0,64	0,10	0,09	0,44	0,27	0,22	0,13	0,73	Průměry sloupců
------	------	------	------	------	------	------	------	-----------------

ZA	$abc + ab + ac + a - bc - b - c - 1$	0,64	SA	0,0064	d = počet sloupců	8
ZB	$abc + ab - ac - a + bc + b - c - 1$	1,38	SB	0,029756	r = počet řádků	8
ZC	$abc - ab + ac - a + bc - b + c - 1$	2,96	SC	0,1369	N = celkový počet experimentů	64
ZAB	$abc + ab - ac - a - bc - b + c + 1$	4,72	SAB	0,3481	m = odhad střední hodnoty	0,327
ZAC	$abc - ab + ac - a - bc + b - c + 1$	5,9	SAC	0,543906		
ZBC	$abc - ab - ac + a + bc - b - c + 1$	12,32	SBC	2,3716		
ZABC	$abc - ab - ac + a - bc + b + c - 1$	-1,94	SABC	0,058806		

Rozdíly uvnitř sloupců								
-0,12	0,00	0,04	-0,18	-0,05	-0,08	0,11	-0,09	1
0,00	0,00	0,01	-0,19	0,02	0,10	0,01	-0,05	2
-0,06	0,00	-0,01	-0,15	-0,09	0,04	-0,05	-0,07	3
-0,04	0,00	-0,03	-0,23	0,02	0,20	0,08	-0,41	4
0,08	0,00	-0,02	0,02	-0,05	-0,10	0,02	0,09	5
-0,16	0,00	0,00	0,38	0,22	0,00	-0,04	0,21	6
0,16	0,00	-0,01	0,32	-0,03	-0,10	-0,05	0,25	7
0,12	0,00	0,00	0,04	-0,05	-0,08	-0,07	0,09	8

Testované char. F		Má Vvýznam? 1=ano	Kvantil $F_{1-\alpha}(1, v)$
FA	0,370	0	4,012973
FB	1,719	0	
FC	7,910	1	
FAB	20,114	1	
FAC	31,428	1	
FBC	137,034	1	
FABC	3,398	0	

SR = suma čtverců residua	0,969175
v = počet stupňů volnosti	56
SR/v	0,017307
α PRAVDĚPODOBNOST	0,05

Výpočet koeficientů		
b0	0,33	
b1	0,01	0
b2	0,02	0
b3	0,05	1
b4	0,07	1
b5	0,09	1
b6	0,19	1
b7	-0,03	0

Počet důležitých faktorů	
n=	3

Kombinace	Výstup modelu
1	0,639
a	0,307
b	0,106
c	0,162
ab	0,069
ac	0,199
bc	0,399
abc	0,731

x1	x2	x3	x12	x13	x23	x123
-1	-1	-1	1	1	1	-1
1	-1	-1	-1	-1	1	1
-1	1	-1	-1	1	-1	1
-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	-1	1	-1	-1	-1
1	-1	1	-1	1	-1	-1
-1	1	1	-1	-1	1	-1
1	1	1	1	1	1	1

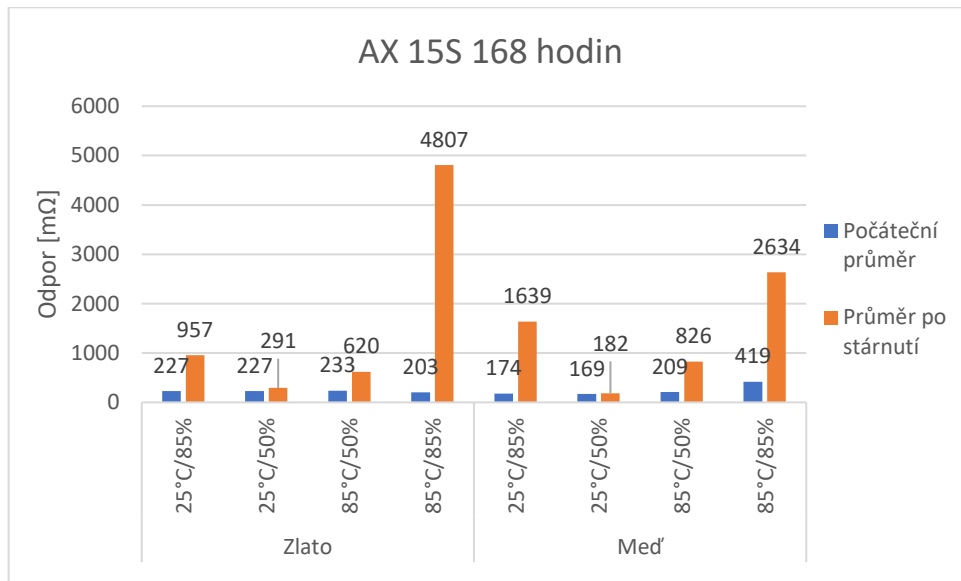
Rozdíly od modelu								
1	c	b	bc	a	ac	ab	abc	
-0,12	-0,06	0,02	-0,14	-0,09	-0,06	0,17	-0,09	1
0,00	-0,06	-0,01	-0,15	-0,03	0,12	0,07	-0,05	2
-0,06	-0,06	-0,03	-0,11	-0,13	0,06	0,01	-0,07	3
-0,04	-0,06	-0,05	-0,19	-0,03	0,22	0,14	-0,41	4
0,08	-0,06	-0,04	0,06	-0,09	-0,08	0,08	0,09	5
-0,16	-0,06	-0,02	0,42	0,17	0,02	0,02	0,21	6
0,16	-0,06	-0,03	0,36	-0,07	-0,08	0,01	0,25	7
0,12	-0,06	-0,02	0,08	-0,09	-0,06	-0,01	0,09	8

Součet čtverců odchylek naměřených hodnot od modelu	SS	1,064138
Podmínka $d^*r > n+1$	64	>
$d^*r - n - 1$	59	
$SS / (d^*r - n - 1)$	0,018036	

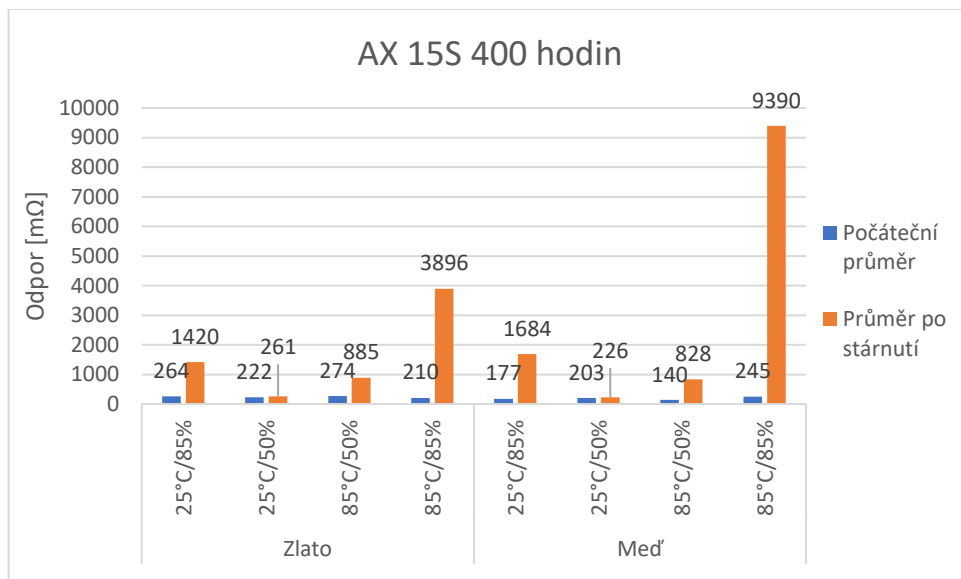
Testová charakteristika F pro model	< nebo >	Kritická hodnota F-rozdělení
1,042153186	<=	1,551217827

Popisuje model hodnoty s dostatečnou přesností?	ANO!
---	------

Příloha 9

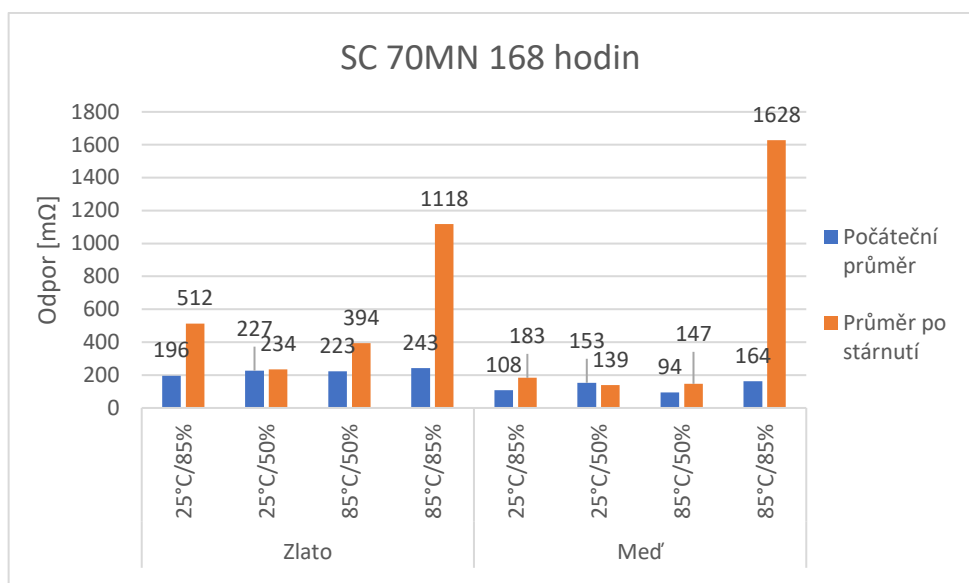


Obr. 37: Porovnání průměrů odporů ELPOX AX 15S 168 hodin

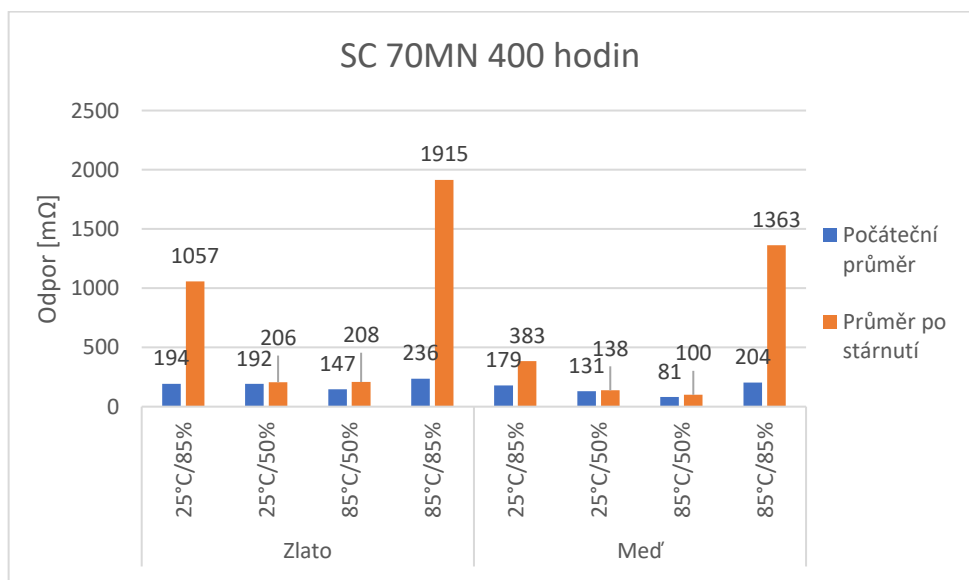


Obr. 38: Porovnání průměrů odporů ELPOX AX 15S 400 hodin

Příloha 10

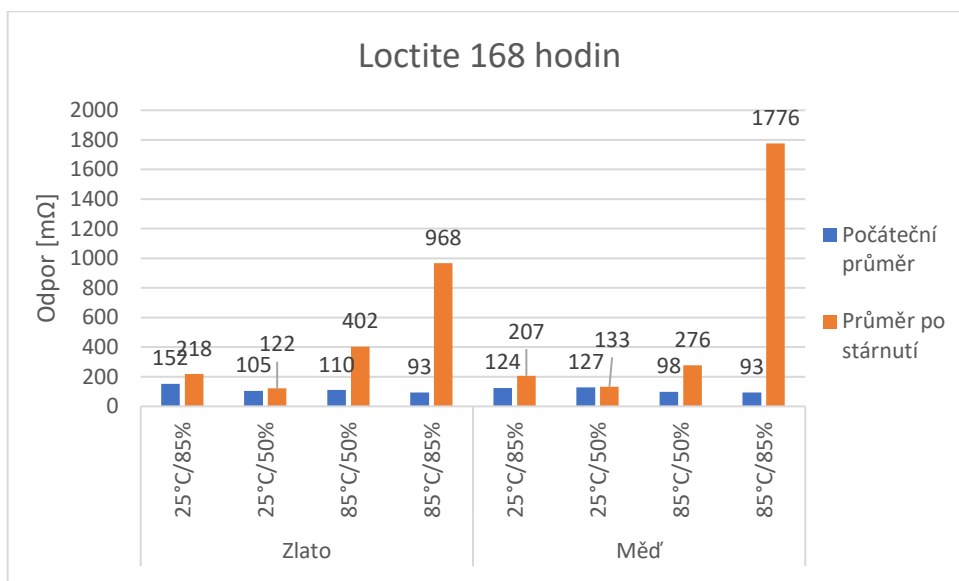


Obr. 39: Porovnání průměrů odporů ELPOX SC 70MN 168 hodin

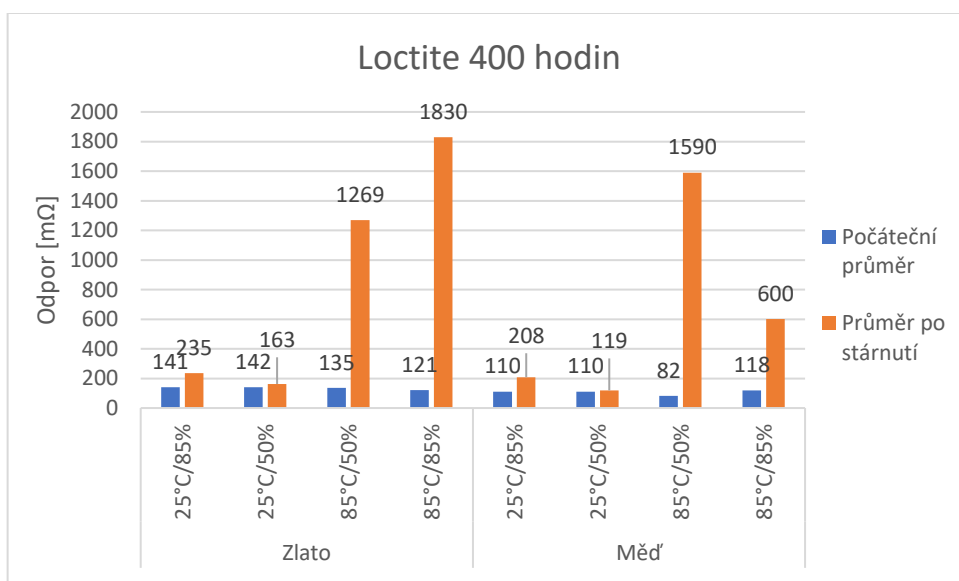


Obr. 40: Porovnání průměrů odporů ELPOX SC 70MN 400 hodin

Příloha 11

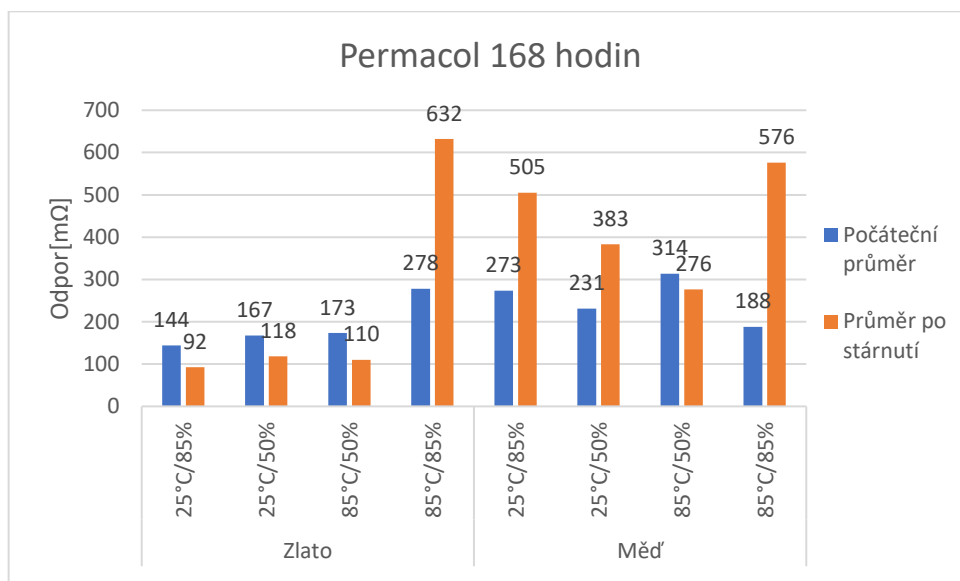


Obr. 41: Porovnání průměrů odporů Loctite 3888 168 hodin

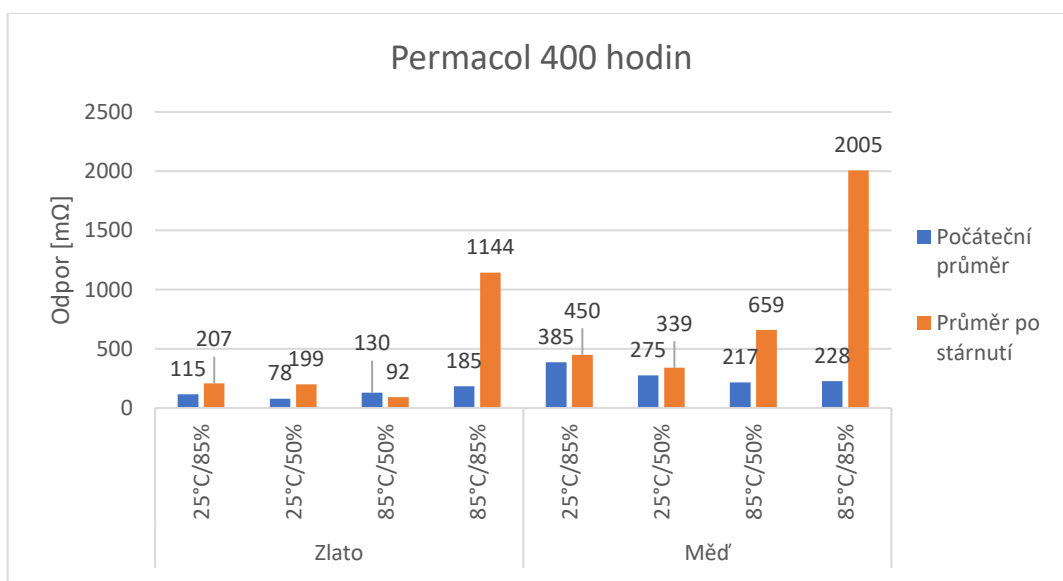


Obr. 42: Porovnání průměrů odporů Loctite 3888 400 hodin

Příloha 12

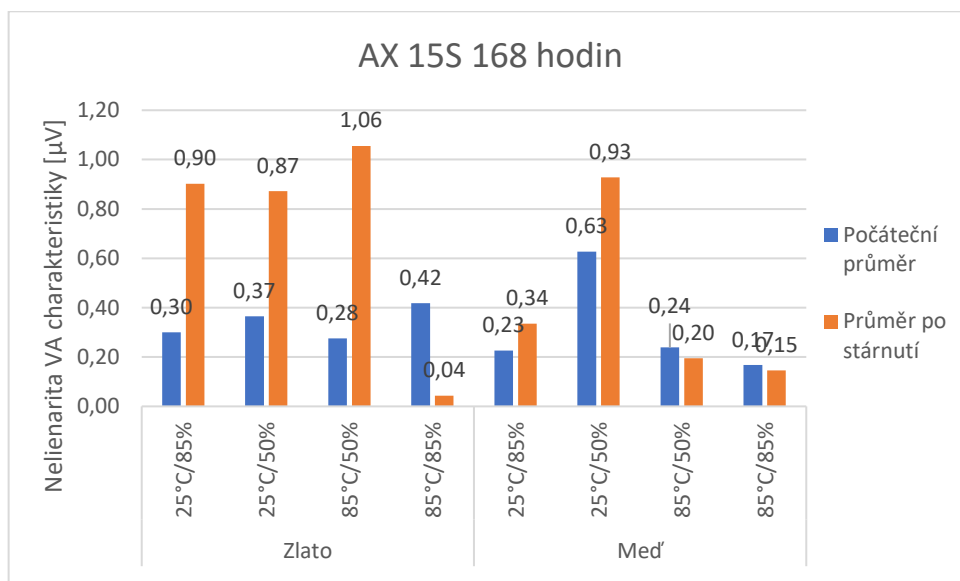


Obr. 43: Porovnání průměrů odporů Permacol 2369/2 168 hodin

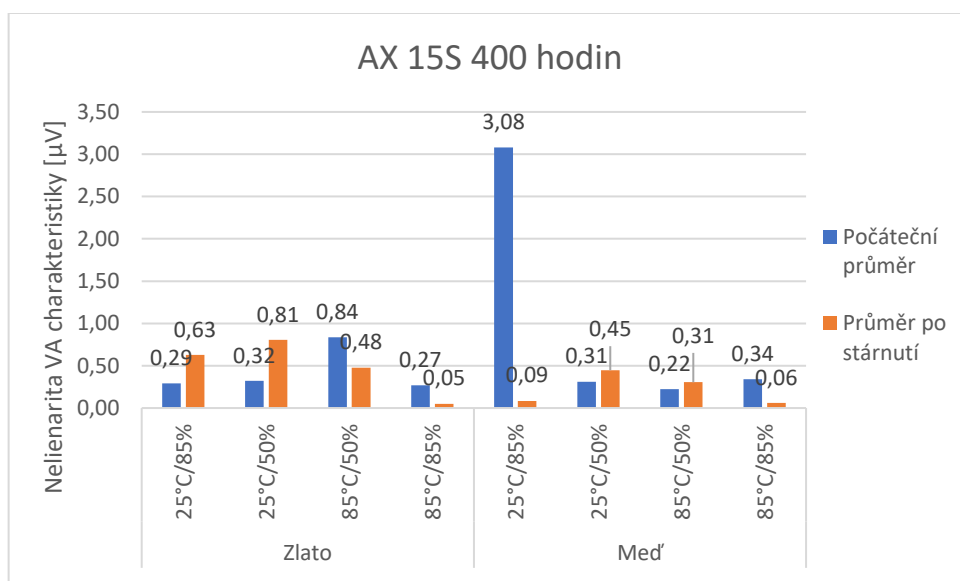


Obr. 44: Porovnání průměrů odporů Permacol 2369/2 400 hodin

Příloha 13

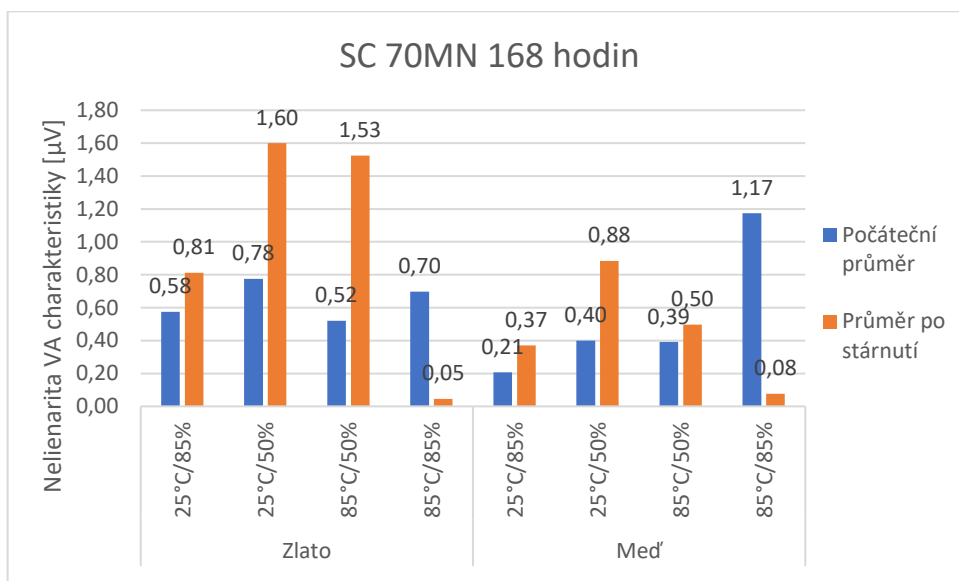


Obr. 45: Porovnání průměrů nelinearity VA charakteristiky ELPOX AX 15S 168 hodin

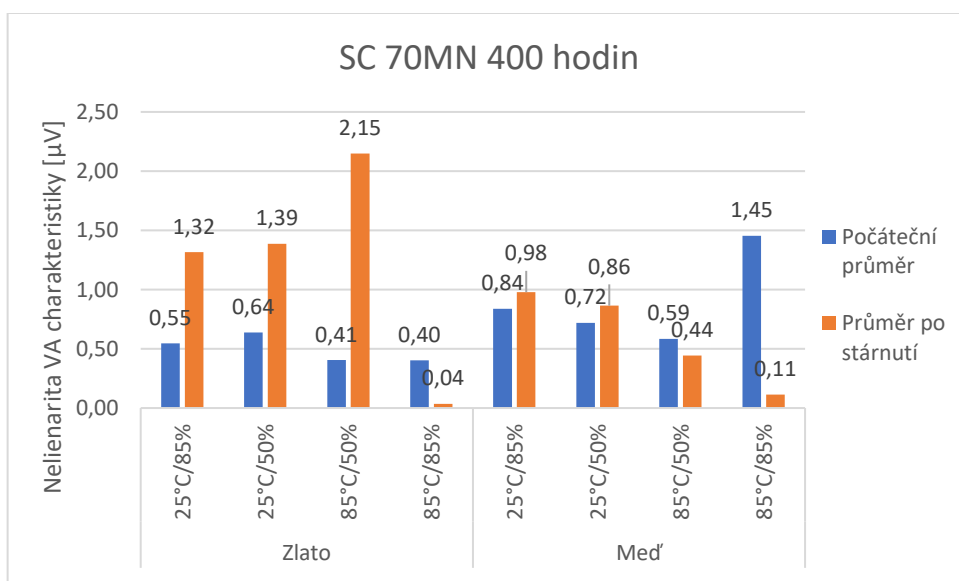


Obr. 46: Porovnání průměrů nelinearity VA charakteristiky ELPOX AX 15S 400 hodin

Příloha 14

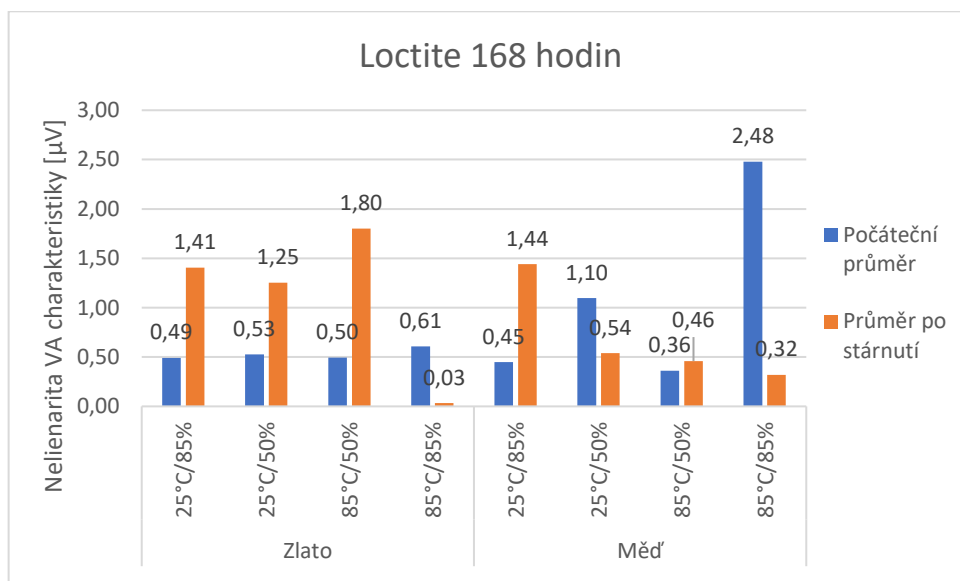


Obr. 47: Porovnání průměrů nelinearity VA charakteristiky ELPOX SC 70MN 168 hodin

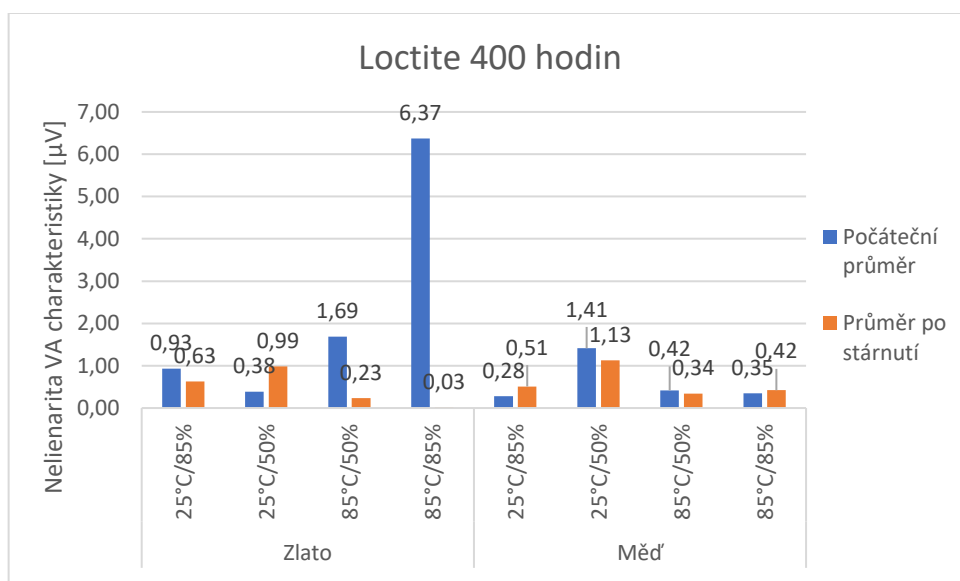


Obr. 48: Porovnání průměrů nelinearity VA charakteristiky ELPOX SC 70MN 400 hodin

Příloha 15

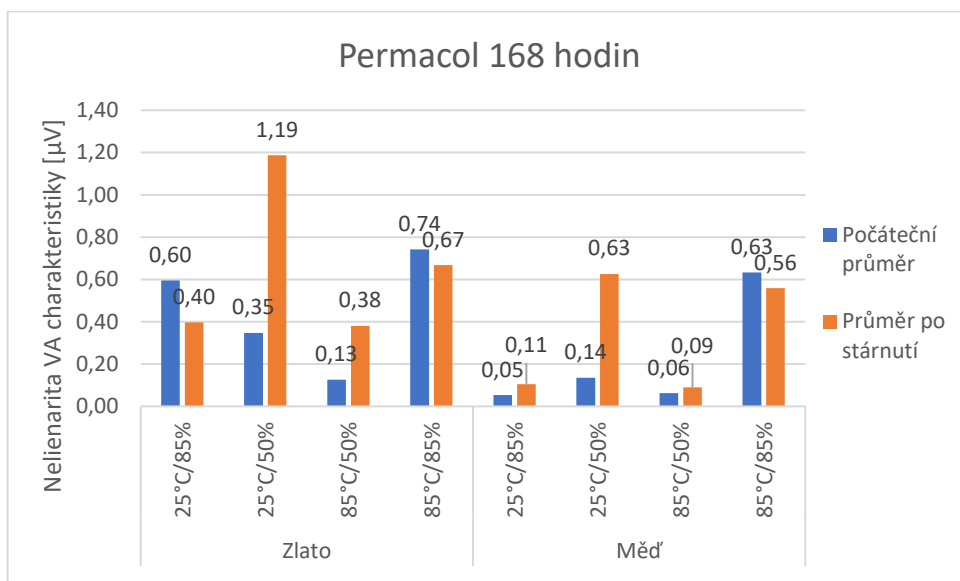


Obr. 49: Porovnání průměrů nelinearity VA charakteristiky Loctite 3888 168 hodin

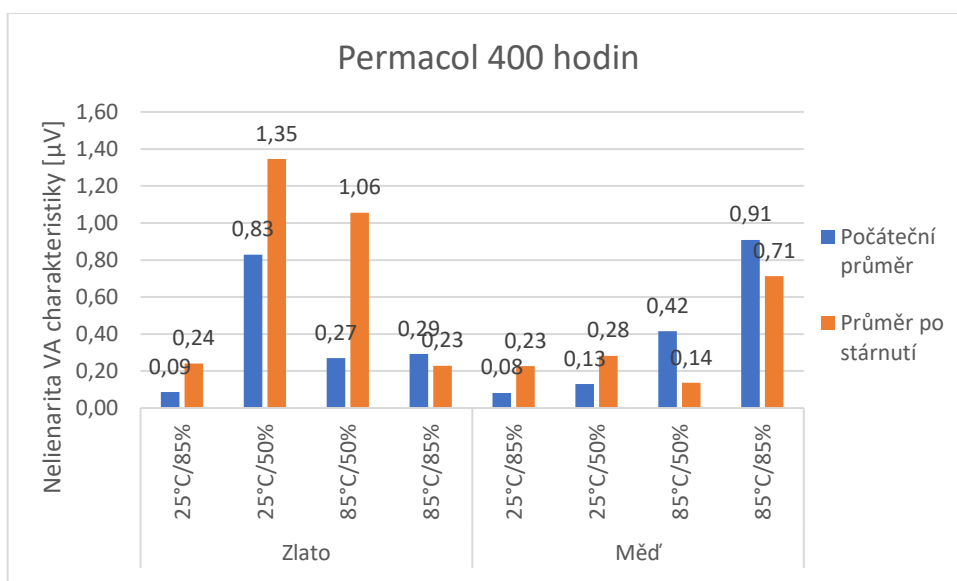


Obr. 50: Porovnání průměrů nelinearity VA charakteristiky Loctite 3888 400 hodin

Příloha 16



Obr. 51: Porovnání průměrů nelinearity VA charakteristiky Permacol 2369/2 168 hodin



Obr. 52: Porovnání průměrů nelinearity VA charakteristiky Permacol 2369/2 400 hodin