



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

## POROVNÁNÍ TAVIDEL PRO STROJNÍ PÁJENÍ VLNOU

WAVE SOLDERING FLUXES COMPARISON

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Stoklásek

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Starý, Ph.D.

BRNO 2017

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

**Student:** Lukáš Stoklásek

**ID:** 173747

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2016/17

## NÁZEV TÉMATU:

### Porovnání tavidel pro strojní pájení vlnou

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou tavidel a tavidlových zbytků pro strojní pájení vlnou.

Navrhněte metodiku a proveďte měření povrchového izolačního odporu tavidlových zbytků vybraných tavidel. Sledujte povrchový izolační odpor po izotermálním ohřevu a po elektromigraci. Dle možností proměřte průběh kapacity a ztrátového činitele v závislosti na frekvenci.

Vyhodnoťte vzhled pájených spojů pomocí rozdílných tavidel a počet vad u vybraných produkčních DPS.

Proveďte měření ionizovatelných nečistot konduktometrickou metodou po pájení a po izotermálním ohřevu.

Proměřte smáčivost měděného drátu s rozdílnými tavidly v bezolovnaté pájce metodou smáčecích vah.

Vyhodnoťte dosažené výsledky, porovnejte je s dodanými technickými listy tavidel a diskutujte vhodnost pro firmu Honeywell.

Spolupráce s firmou Honeywell Brno.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 8.6.2017

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Starý, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**

*předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce seznamuje s problematikou tavidel pro pájení vlnou, tavidlovými zbytky a problémy elektromigrace. V praktické části je popsáno zjišťování množství ionizovatelných nečistot konduktometrickou metodou, měření smáčivosti metodou smáčecích vah, povrchového odporu, test na měděné zrcadlo a četnost chyb na deskách plošných spojů zapájených vlnou s těmito tavidly. Hlavním cílem je porovnat chování vlastnosti tavidel navzájem.

## **Klíčová slova**

Tavidlo, ionizovatelné nečistoty, pájení vlnou, elektromigrace, SIR

## **Abstract**

Bachelors thesis introduces the problematics of wave soldering fluxes, flux residues and problems of electromigration. Practical part describes measuring of ionic contamination by using conductometric method, measuring the wettability by the wetting balance test method, surface insulation resistance, copper mirror test and amount of failures on wave soldered printed circuit boards with these fluxes. The main object is to compare quality of the fluxes.

## **Key words**

Flux, ionic contamination, wave soldering, electromigration, SIR

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Porovnání tavidel pro strojní pájení vlnou“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 6. června 2017

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování práce. Dále děkuji Ing. Zdeňku Jurčíkovi a Tomáši Olšaníkovi za odbornou pomoc se zpracováním praktické části a poskytnutí technických zařízení firmy Honeywell.

**Bibliografická citace**

STOKLÁSEK, L. *Porovnání tavidel pro strojní pájení vlnou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2017. 47 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

## Obsah

Úvod.....	7
1. Pájení.....	8
1.1. Strojní pájení vlnou .....	8
1.1.1. Popis procesu.....	8
2. Tavidla.....	9
2.1. Složení tavidel.....	9
2.1.1. Tavidlové nosiče .....	9
2.1.2. Aktivátory.....	10
2.1.3. Aditiva.....	10
2.1.4. Rozpouštědla .....	11
2.2. Základní požadavky na tavidla.....	11
2.3. Tavidlové zbytky.....	11
3. Elektromigrace .....	12
3.1. Rozdělení elektromigrace.....	13
3.1.1. Vlhká elektromigrace .....	14
3.1.2. Mokrý elektromigrace .....	15
3.1.3. Suchá elektromigrace .....	15
4. Metody používané pro porovnání vlastností tavidel .....	16
4.1. Zjišťování ionizovatelných nečistot konduktometrickou metodou.....	16
4.1.1. ROSE metoda.....	16
4.1.2. SEC metoda.....	17
4.2. Měření povrchového izolačního odporu .....	17
4.3. Testování smáčivosti .....	18
4.4. Test na měděné zrcadlo .....	19
5. Praktická část s diskuzí dosažených výsledků .....	20
5.1. Definované cíle .....	20
5.2. Tavidla použitá pro testování .....	20
5.3. Testování tavidel při pájení vlnou .....	21
5.4. Měření kontaminace desky.....	24
5.5. Měření ionizovatelných nečistot ROSE metodou .....	25
5.6. Testování smáčivosti .....	28
5.7. Příprava desek pro měření SIR, C a $\text{tg } \delta$ .....	30
5.8. Měření povrchového izolačního odporu a elektromigrace.....	31
5.9. Měření frekvenční závislosti kapacity a ztrátového činitele .....	34
5.10. Test na měděné zrcadlo .....	39
6. Závěr.....	41

Použitá literatura .....	42
Seznam obrázků .....	44
Seznam tabulek .....	45
Seznam grafů.....	46
Seznam použitých zkratek.....	47

## Úvod

S neustálým zmenšováním izolačních vzdáleností mezi vodiči a rostoucí hustotou zástavby na deskách plošných spojů je neustále potřeba sledovat nežádoucí vlivy tavidlových zbytků a procesů elektromigrace, jejíž průběh můžeme ovlivnit zajištěním určitých okolních podmínek.

Teoretická část stručně seznamuje s pájením vlnou, dále poté s problematikou tavidel, jejich hlavními složkami a krátce pojednává o tavidlových zbytcích. Co se týče elektromigrace, v práci je uvedeno její rozdělení a rozbor jednotlivých typů. V další části následuje seznámení s měřicími metodami zjišťování nečistot na deskách plošných spojů a smáčivosti povrchů.

Praktická část je zaměřena na porovnání kvality zapájení desek plošných spojů s různými typy tavidel, měření ionizovatelných nečistot konduktometrickými metodami, smáčivost vývodu v různých typech pájek, proměření povrchového izolačního odporu, kapacity a ztrátového činitele a testování tavidel na měděné zrcadlo.

# 1. Pájení

Pájení je fyzikálně chemický proces, při kterém dochází k metalurgickému spojení dvou a více kovových částí roztavenou pájkou. Pro předpoklad kvalitního pájeného spoje je nutná metalurgická kompatibilita pájeného materiálu s pájkou a co největší čistota při pájení.[3]

## 1.1. Strojní pájení vlnou

Strojní pájení vlnou se používá pro zapájení vývodových součástek vsunutých do otvorů desky nebo při kombinované montáži, kde vývody klasické součástky jsou zasunuty z horní strany a na spodní straně jsou přilepeny SMD komponenty. Dochází však ke kontaminaci pájecí lázně, jelikož povrch DPS a pouzdra součástek bývají omyta roztavenou pájkou, která díky vysoké teplotě rozpouští povrchy a jejich úpravy a sebe sama tak kontaminuje. Díky oxidaci povrchu pájky probíhá proces pájení většinou v ochranné dusíkové atmosféře, případně za přítomnosti pájecích olejů. [12]

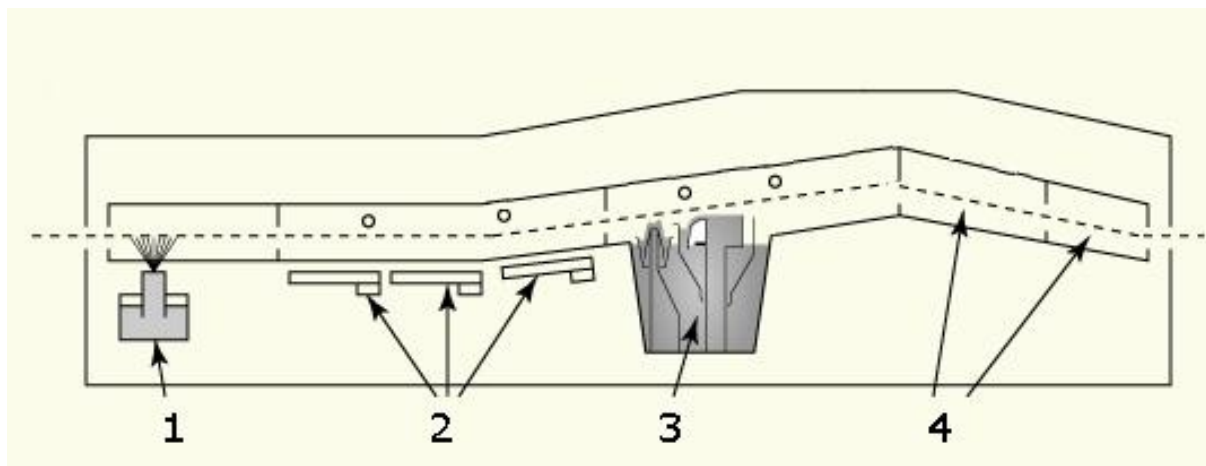
### 1.1.1. Popis procesu

**Aplikace tavidla** - nanese tavidlo na pájenou stranu DPS. Nejčastěji bývá tavidlo nanášeno sprejovou tryskou (obr. 1 – část 1), někdy za pomoci ultrazvuku. Výhoda sprejového nanášení je jednoduchá reprodukovatelnost procesu, menší spotřeba tavidla a minimální odpad. Mezi další možnosti patří např. pěnové, případně kartáčové nanášení. [12]

**Předehřev desky** - deska na dopravníku projede několika zónami předehřevu (obr. 1 - část 2) kvůli minimalizaci teplotního šoku, vyprchání rozpouštědel a aktivaci naneseného tavidla. Využívá se několik typů předehřevu, např. infračervený, horkovzdušný zespod desky, případně i z horní strany. [12]

**Pájení** - dopravník s DPS přejezdí po vlně roztavené pájky (obr. 1 – část 3). Vlna je tvořena čerpadlem, které tlačí roztavenou pájku z vyhřáté nádrže skrz trysku s mřížkou. Pájka se nesmí dostat na horní stranu DPS, proto bývá výška vlny nastavena převážně do 2/3 tloušťky DPS. Vlna bývá buď jednoduchá pro vývodovou a jednoduchou kombinovanou montáž nebo dvojí - čipová (turbulentní) + klidná pro kombinovanou montáž. Pájka v turbulentní vlně proudí vysokou rychlostí, aby smočila i těžko dostupná místa na desce. Doba pájení na turbulentní vlně je přibližně 0,5 - 0,8 s. Klidná vlna poté zajistí dokonalý meniskus s dostatkem pájky na ploškách. Pájení na klidné vlně probíhá 2 - 5 s. [12]

**Chlazení** - dostatečné ochlazení DPS po zapájení zajistí vznik požadované mikrostruktury pájeného spoje (obr. 1 – část 4). Nesmí docházet k otřesům během chladnutí, pájený spoj by mohl být narušen. [12]



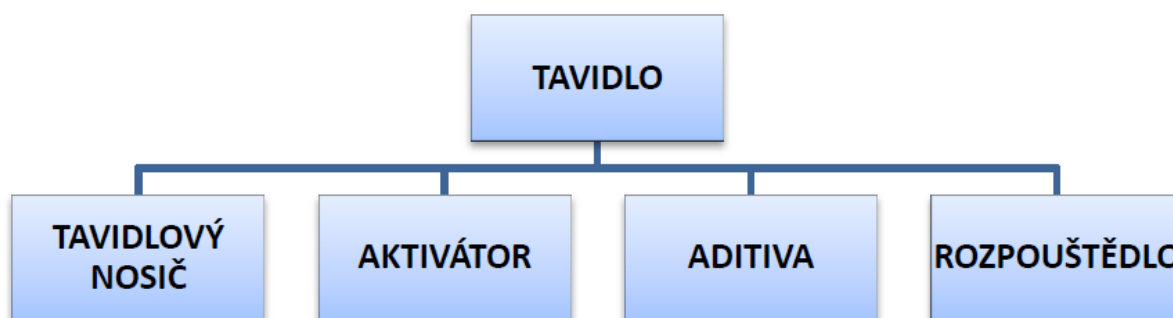
Obr. 1 Schematické naznačení pájecí vlny [11]

## 2. Tavidla

Tavidla jsou převážně kapalné, plynné, případně pevné směsi, které po ohřevu zlepšují smáčecí proces při tvrdém nebo měkkém pájení. Za zvýšené teploty odstraňují oxidy a v určitém rozsahu brání jejich opětovnému vzniku, nečistoty a pomáhají chránit povrch pájeného materiálu při pájení. Při reakci s oxidy tavidla zvýší povrchové napětí pájeného povrchu a tím dojde ke zlepšení smáčivosti. [1]

### 2.1. Složení tavidel

Tavidla se zpravidla skládají z několika složek, viz obr. 2.



Obr. 2 Složky tavidla [1]

Tavidlo bývá složeno z pevné složky (solidu) a kapaliny. Do tuhé fáze tavidla řadíme tavidlový nosič, aktivátory a aditiva. Kapalnou složku tvoří rozpouštědlo.

#### 2.1.1. Tavidlové nosiče

Tavidlových nosičů je několik typů. Zřejmě nejstarší a dodnes používaná je pryskyřice z borovic, kalafuna (Rosin). Kalafunové tavidlo je agresivní v kapalném stavu, po zatuhnutí je inertní. I přesto se kalafunové tavidlo po pájení čistí, při zahřátí desky by mohlo začít znovu reagovat a poškodit vodivé cesty. Dalším typem jsou tavidla na bázi syntetických případně modifikovaných přírodních pryskyřic (Resin).

V tavidlech s organickými kyselinami (Organic Acid) bývá zastoupena například kyselina citronová, mléčná, stearová.

Agresivnější varianta je využití anorganické kyseliny (Inorganic Acid) jako tavidlového nosiče. Používají se hlavně pro pájení oceli a slitin, které je obtížné pájet. V elektrotechnickém průmyslu nemají využití.

Tavidla na bázi kyselin jsou korozivní a po zapájení je nutný oplach. [3]

### 2.1.2. Aktivátory

Aktivátory jsou chemické sloučeniny, které zajišťují narušení a odstranění oxidů z povrchu pájeného spoje. Plní úlohu vytvoření snadno smáčitelného povrchu. Agresivnější aktivátory jsou např. soli minerálních kyselin, kyselina chlorovodíková. Ty ale podporují korozivní jevy, proto je nežádoucí, aby po pájení na desce zůstaly jejich zbytky. Méně agresivní jsou potom karboxylové, dikarboxylové kyseliny nebo aminokyseliny. Ty reagují s oxidy za zvýšené teploty, např. při předehřevu před pájením. Převážně se aktivátory dělí na anorganické a organické s určitou úrovní halogenidů. Přehledné rozdělení tavidel dle nosiče a úrovně aktivace lze vidět na Obr.3. [1]

Flux Composition	Flux/Flux Residue Activity Levels	% Halide <sup>1</sup> (by weight)	Flux Type <sup>2</sup>	Flux Designator
Rosin (RO)	Low	<0.05%	L0	ROL0
		<0.5%	L1	ROL1
	Moderate	<0.05%	M0	ROM0
		0.5-2.0%	M1	ROM1
	High	<0.05%	H0	ROH0
		>2.0%	H1	ROH1
Resin (RE)	Low	<0.05%	L0	REL0
		<0.5%	L1	REL1
	Moderate	<0.05%	M0	REM0
		0.5-2.0%	M1	REM1
	High	<0.05%	H0	REH0
		>2.0%	H1	REH1
Organic (OR)	Low	<0.05%	L0	ORL0
		<0.5%	L1	ORL1
	Moderate	<0.05%	M0	ORM0
		0.5-2.0%	M1	ORM1
	High	<0.05%	H0	ORH0
		>2.0%	H1	ORH1
Inorganic (IN)	Low	<0.05%	L0	INL0
		<0.5%	L1	INL1
	Moderate	<0.05%	M0	INM0
		0.5-2.0%	M1	INM1
	High	<0.05%	H0	INH0
		>2.0%	H1	INH1

Obr. 3 Rozdělení tavidel dle J-STD-004 [2]

### 2.1.3. Aditiva

Aditiva v tavidlech upravují jejich vlastnosti pro určité využití, např. rheologické modifikátory do pájecích past, stabilizátory pěny a antishlukovací činidla pro pájení vlnou. [4]

#### **2.1.4. Rozpouštědla**

Rozpouštědla usnadňují proces nanášení tavidla před pájením. Během přehřevu by se však měla odpařit. Pokud by se neodpařila, došlo by k odpařování tavidla při pájení, což by mohlo mít za následek rozstříkání pájky po desce pájeného spoje. Dělí se na organická na alkoholové bázi (VOC) a anorganická na bázi vody (VOC free). [4]

### **2.2. Základní požadavky na tavidla**

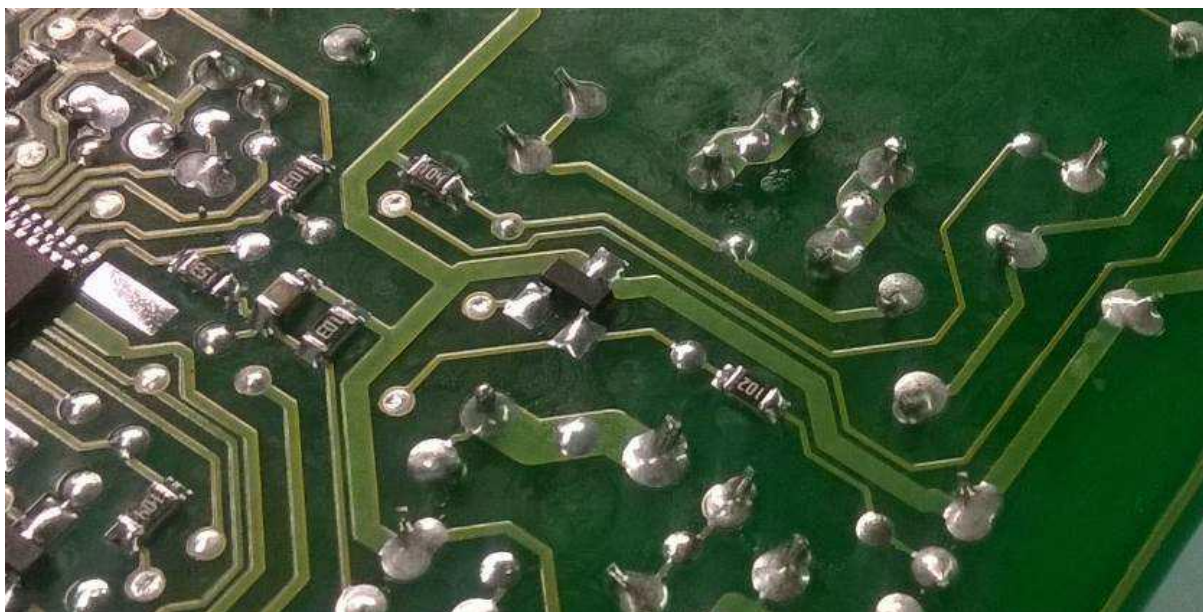
Tavidlo by tedy mělo v co největší míře podporovat smáčení materiálu pájkou, v maximální míře a co nejrychleji rozpouštět oxidy z pájeného spoje a pájky. Dále by mělo mít co nejstálější fyzikální a chemické vlastnosti jak při skladování, tak při pájení, např. příznivá viskozita, povrchové napětí, hustota. Důležitým faktorem je také minimální tvorba zdraví škodlivých sloučenin, kovových par a plynů při pájení. Velkou roli také hraje snadná odstranitelnost zbytků po vychladnutí spoje. [5]

### **2.3. Tavidlové zbytky**

Tavidlové zbytky zůstávají na povrchu desky s plošnými spoji i na povrchu pájených spojů po pájecím procesu jako výsledek fyzikálně-chemických reakcí. Pozůstatky tavidla mohou způsobit na desce problémy. Mohou zvýšit rychlost koroze pájeného materiálu nebo způsobit svou vodivostí zkraty na desce plošných spojů. Tyto zbytky je nutné odstranit vhodným rozpouštědlem doporučeným výrobcem.

Nejběžnější tavidlové zbytky jsou chloridy a méně agresivní organické kyseliny - hexandiová (adipová) a butandiová (jantarová). Při plném zreagování a vytěkání z povrchu jsou neškodné, problém nastává, pokud je na desku nanášeno nepřiměřené množství tavidla, poté je teplo při přehřevu využito k vyprchání rozpouštědla a tavidlové zbytky nestihnou plně zreagovat. Zvláštní skupinu poté tvoří takzvaná NoClean tavidla, která se teoreticky čistit nemusí, jelikož jsou méně agresivní, jen lehce podporují korozi a na desce zanechávají pouze bílé stopy tvořené kovovými solemi, viz Obr. 4. [4]

V současné době se však čistí i NoClean tavidla, z estetických důvodů, dále kvůli celkovému zmenšování obvodů na deskách, vodivých cest i izolačních vzdáleností. Zvýšením zástavbové hustoty roste riziko, že tavidlové zbytky nějakým způsobem poškodí důležité části obvodu. Při kondenzování vlhkosti a přiloženém napětí se na neočištěné desce prudce zvyšuje riziko elektromigrace a proudových svodů. Tavidlové zbytky se také mohou podílet na změně povrchového izolačního odporu. [6]



Obr. 4 Tavidlové zbytky po pájení

### 3. Elektromigrace

Elektromigraci můžeme definovat jako přenesení hybnosti elektronů, které se pohybují v elektrickém poli, na ionty tvořící mřížku propojovacího materiálu. U kovového vodiče dochází k interakci mezi elektrony a krystalovými poruchami mřížky. Interakce mřížku rozvibrují a tím se začne produkovat teplo. S teplotou roste také odpor vodiče. Aby elektromigrace vznikla, je potřeba velké množství elektronů. Projevuje se u všech vodičů. K elektromigraci nedochází v polovodivých materiálech, výjimečně potom, když je polovodivý materiál dopovaný tak silně, že se vodivostí blíží kovům. [9]

Existuje tzv. Blackova rovnice, udávající průměrnou dobu do poruchy (MTTF - Mean time to failure):

$$MTTF = \frac{A}{J^N} * e^{\frac{E_a}{k*T}} \quad (1)$$

A - konstanta závislá na vnitřním propojení a geometrii

J - proudová hustota ( $A \cdot m^{-2}$ )

N - koeficient volený mezi 1 - 7

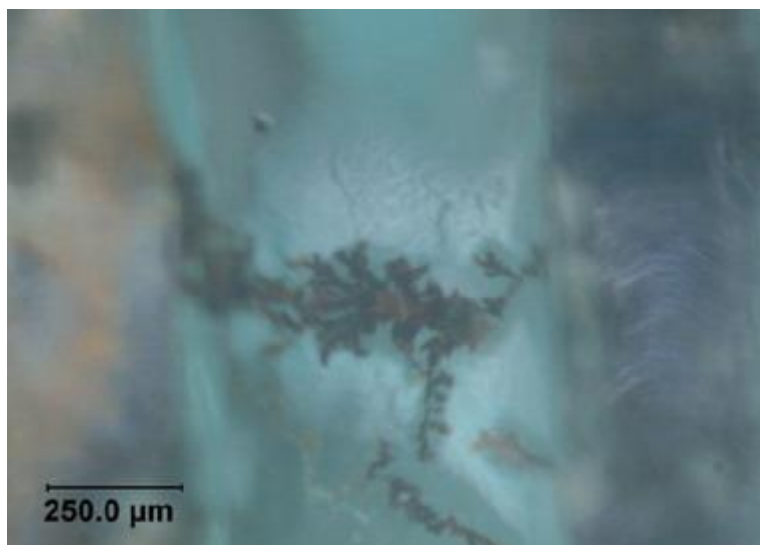
$E_a$  - aktivační energie (J)

k - Boltzmannova konstanta ( $1,38 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$ )

T - termodynamická teplota (K)

Elektromigrace je hlavní hrozba pro elektronické obvody, vzhledem k riziku tvoření dendritů a následnému vyzkratování obvodu. Dendrity vznikají z důvodu ukládání iontů na katodě. Mají svůj specifický tvar, který vzniká počátečním uložením zárodka. Po vzniku zárodka dochází v jeho místě k navýšení proudové hustoty a zároveň roste pravděpodobnost dalšího ukládání iontů a tedy i nárůstu dendritu. Při růstu dochází k větvení a vzniku typické struktury

dendritu, viz obr. 5. S růstem dendritu klesá odpor obvodu. Při vzniku a nárůstu dalších dendritů již hrozí riziko zkratu.



Obr. 5 Struktura dendritu [7]

### 3.1. Rozdělení elektromigrace

Elektromigraci lze rozdělit na elektrolytickou (iontovou) a suchou (přesun hybnosti elektronů).

**Iontová elektromigrace** probíhá při normálních okolních podmínkách ( $\vartheta < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), nižší proudové hustotě ( $J < 1\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ). Má tři fáze: Rozpouštění (dissolution), pohyb iontů (ion transport) a ukládání (deposition). [10]

Voda ze vzdušné vlhkosti při přiložení elektrického napětí ionizuje:



Mechanismus iontové migrace stříbra:



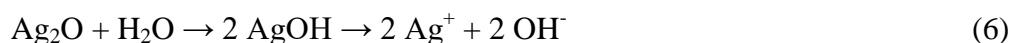
Vodíkový iont putuje ke katodě, kde se redukuje a uvolňuje se v plynném stavu, kdežto hydroxidový anion se při cestě k anodě setká s kationtem stříbra  $\text{Ag}^+$ .



$\text{AgOH}$  je nestabilní a proto se rozkládá na  $\text{Ag}_2\text{O}$  v okolí anody podle rovnice:

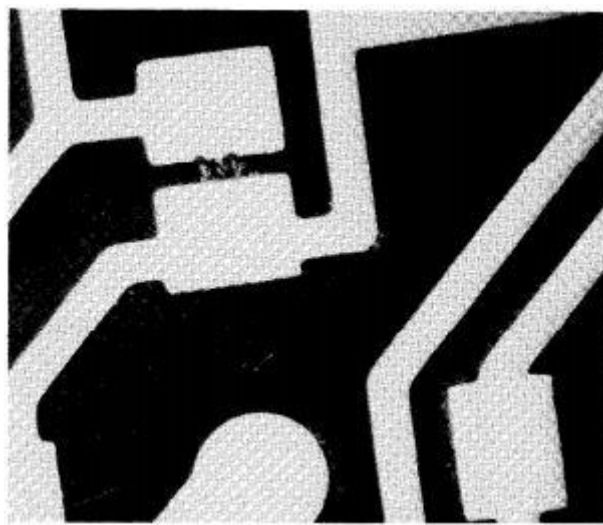


Hydratační reakce probíhá takto:



Elektrolytická migrace je podmíněna vlhkostí na izolátoru oddělujícím vodiče musí být dostatečně vysoká, aby umožnila vodivost při přiloženém napětí. Vyskytuje se hlavně u stejnosměrného vedení proudu, směr se však může otočit obrácením polarity elektrického pole. Při běžném kmitočtu střídavého proudu (50 Hz) je projev elektromigrace podstatně menší a u vysokofrekvenčních aplikací již téměř žádná elektromigrace není zaznamenána. [8]

Elektromigrace v nekondenzujícím, vlhkém prostředí probíhá pouze u stříbra (viz obr. 6) a v malé míře u cínu a mědi. U ostatních kovů je potřeba viditelná vrstva vody (např. zkondenzované kapky), aby mohla migrace probíhat za normální pokojové teploty. Z toho důvodu se dělí na mokrou elektromigraci (wet electromigration), se znatelnou kondenzovanou vlhkostí na povrchu a vlhkou neboli stříbrnou elektromigraci (humid electromigration), při které není na povrchu viditelná vlhkost.



Obr. 6 Elektromigrace stříbra na PC desce

Pojem stříbrná elektromigrace se ujal právě díky jedinečným schopnostem elektromigrace stříbra, bez větší vlhkosti a relativně nízkých teplotách. [8]

### 3.1.1. Vlhká elektromigrace

Při přiloženém napětí se na anodě (kladnějším vodiči) začínají tvořit oxidy stříbra, ve kterých vznikají ionty putující vlhkými oblastmi směrem ke katodě (zápornějšímu vodiči), kde se opět uloží. V případě rovnoměrného rozložení migrace by byl přenos iontů při malých proudech tak malý, že by nijak významně neovlivnil mezery mezi kontakty a tudíž by nedošlo k zásadní změně funkčnosti obvodu. Hlavní faktory ovlivňující vlhkou elektromigraci jsou:

- Relativní vlhkost
- Čistota povrchu
- Rozdíl napětí mezi vodiči
- Rozteč mezi vodivými cestami
- Teplota [8]

### 3.1.2. Mokrý elektromigrace

K mokré elektromigraci dochází v případě viditelné vysrážené vlhkosti na ploškách DPS. S přítomností kapek na ploškách se rychlost elektromigrace zrychlí o několik řádů, například na vodičích s mezerou 0,38 mm při napětí 10 V, teplotě 45 °C a 90 % vlhkosti dochází ke vzniku dendritů cca za týden, o pár dní později k přemostění mezery. Po přidání kapky jsou ke vzniku dendritu a následnému přemostění pouze minuty. Takové přemostění lze zaznamenat například u mědi, cínu, olova (obr. 7), zlata. Nedochozí k němu u chromu a hliníku, zřejmě kvůli ochrannému filmu oxidů. [8]

S problémem mokré elektromigrace se potýkají zejména desky s integrovanými obvody a malými mezerami mezi vodiči. Kvůli kondenzované vlhkosti nebo přítomnosti chloridů často dochází k přemostění blízkých pozlacených kontaktů (MGRS - migrated gold resistive shorts). [8]

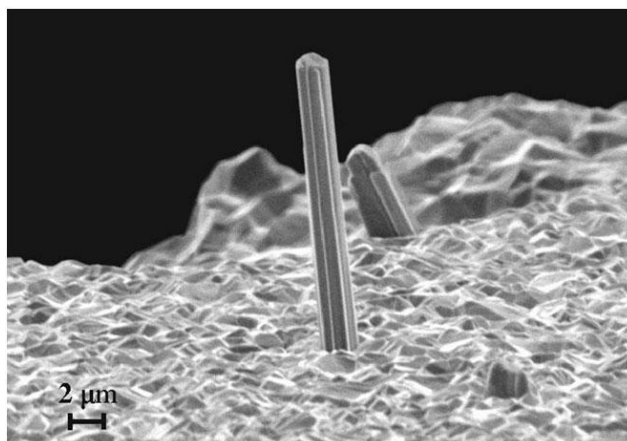


Obr. 7 Cín-olovnatá elektromigrace v kapce DI vody

Kvůli závažnému vlivu vlhkosti na elektromigraci je nutné ji omezit nebo alespoň zpomalit. Toho lze docílit aplikováním vodu-odpujících povlaků, které jsou méně hydrofilní, než samotný laminát složený z epoxidové pryskyřice a skelné tkaniny (e-sklo). Ukázalo se, že aplikace je však vhodná pouze pro určité systémy a záleží na velikosti připojeného napětí, teplotě a vlhkosti, které je systém vystaven. Další možná metoda je pokovení stříbrných kontaktů méně "aktivními" kovy, např. zlatem nebo cínem. To může v některých případech i zlepšit chování při vystavení roztavené pájce. [8]

### 3.1.3. Suchá elektromigrace

Při suché elektromigraci jde především o přesun částic velkou proudovou hustotou. Atomový tok vodičem není rovnoměrný kvůli nehomogenitě vodiče (zrna na hranách vodičů). V důsledku toho se materiál přesunuje a usazuje jinde. Výsledek přesunu materiálu jsou díry ve vodičích nebo naopak vznik pahorků, tzv. whiskerů (obr. 8), které mohou způsobovat zkraty. [8]



Obr. 8 Cínový whisker [13]

Podmínky pro suchou elektromigraci se výrazně liší od podmínek pro elektrolytickou. Zatímco elektrolytická migrace probíhá již při pokojových teplotách, suchá migrace potřebuje pro svůj průběh teploty vyšší než 150 °C a podstatně větší proudovou hustotu ( $J > 10^4 \text{ A.cm}^{-2}$ ). Suchá elektromigrace se vyskytuje především u tenkovrstvé technologie a integrovaných obvodů. Nicméně vysoká teplota a vysoká proudová hustota zabraňují elektrolytické migraci, která by způsobila selhání obvodu mnohem rychleji. Suchá elektromigrace se nejvíce vyskytuje u hliníkových kontaktů, může však probíhat i u jiných materiálů. Například u cínu dochází k suché elektromigraci při teplotě blízké teplotě tání. [8]

## 4. Metody používané pro porovnání vlastností tavidel

### 4.1. Zjišťování ionizovatelných nečistot konduktometrickou metodou

Konduktometrických metod je více typů, například SEC - Solvent Extract Conductivity, metoda ROSE - Resistivity Of Solvent Extract, která se dále dělí na statickou a dynamickou. Pro měření se využívá různých zařízení - ionograf, omegametr, kontaminometr.

#### 4.1.1. ROSE metoda

Nečistoty na vzorku se zjišťují pomocí vyluhování znečištěné desky v roztoku izopropylalkoholu a deionizované vody v poměru 3:1. Počáteční hodnota vodivosti čistého měřicího roztoku by neměla přesáhnout  $0,05 \mu\text{S.cm}^{-1}$ . Kontaminace desky se udává v mikrogramech chloridu sodného na centimetr čtverečný plochy desky a vypočte se podle následující rovnice: [14]

$$Z_{PS} = \frac{(\gamma_1 - \gamma_0) * V}{S * k_g} \quad (7)$$

kde:

$Z_{PS}$  - kontaminace DPS ( $\mu\text{gNaCl.cm}^{-2}$ )

$\gamma_0$  - počáteční vodivost roztoku ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )

$\gamma_1$  - konečná vodivost roztoku ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )

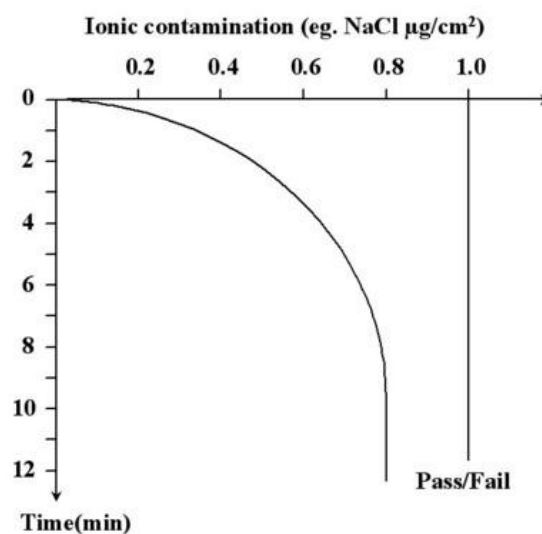
V - objem roztoku ( $\text{cm}^3$ )

S - plocha desky ( $\text{cm}^2$ )

$k_9$  - směrnice vodivosti roztoku při naměřené teplotě

#### 4.1.2 SEC metoda

Tato metoda také využívá roztok izopropanolu a deionizované vody. Ke zlepšení citlivosti tohoto měření se využívá výluhu v 80 °C po dobu jedné hodiny. Nicméně konduktometrickými metodami nezaznamenáme rozdílnou kontaminaci na různých místech desky, proto se upřednostňuje metoda měření SIR popsaná níže. Velkou výhodou těchto metod je cenová dostupnost a nedestruktivnost. [14]



Obr. 9 Vyhodnocení kontaminace NaCl pomocí SEC [14]

Tato metoda je vhodná pro:

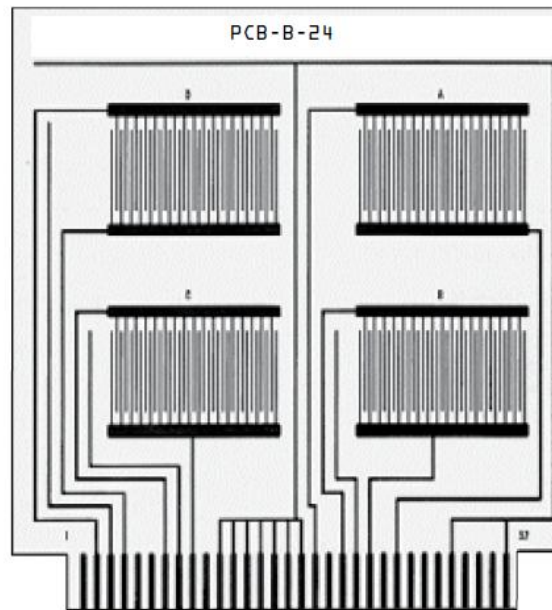
- kontrolu procesu čištění linek
- testování čistoty např. podle normy IPC
- testování čistících procesů

#### 4.2. Měření povrchového izolačního odporu

Nedestruktivní metoda měření povrchového izolačního odporu (Surface Insulation Resistance - SIR) zajišťuje odhalit a minimalizovat rizika elektrochemických mechanismů jako koroze a migrace kovů. SIR je vždy vztažen na plochu testovaného materiálu, zpravidla  $\text{cm}^2$ .

Samotné měření SIR by mělo probíhat při zvýšené vlhkosti, teplotě a přiloženém určitém napětí, obvykle 85 °C, 85 % RH (relativní vlhkost) a při stejnosměrném napětí 45 – 50 V po dobu 7 dní. Dle aktualizované normy J-STD-004B testování probíhá při 40 °C, 95 % RH a stejnosměrném napětí 10 V. Měří se kontinuálně každých cca 20 minut po dobu 7 dní. Pro nová tavidla na vodní bázi je překážkou právě vysoká vlhkost, tavidla se tím stávají polárnější. Nižší napětí bylo zvoleno z toho důvodu, že při vyšším napětí dendrity prakticky ihned po vytvoření vyhořely. Proto by měl být testovaný vzorek proměřen po každých 20

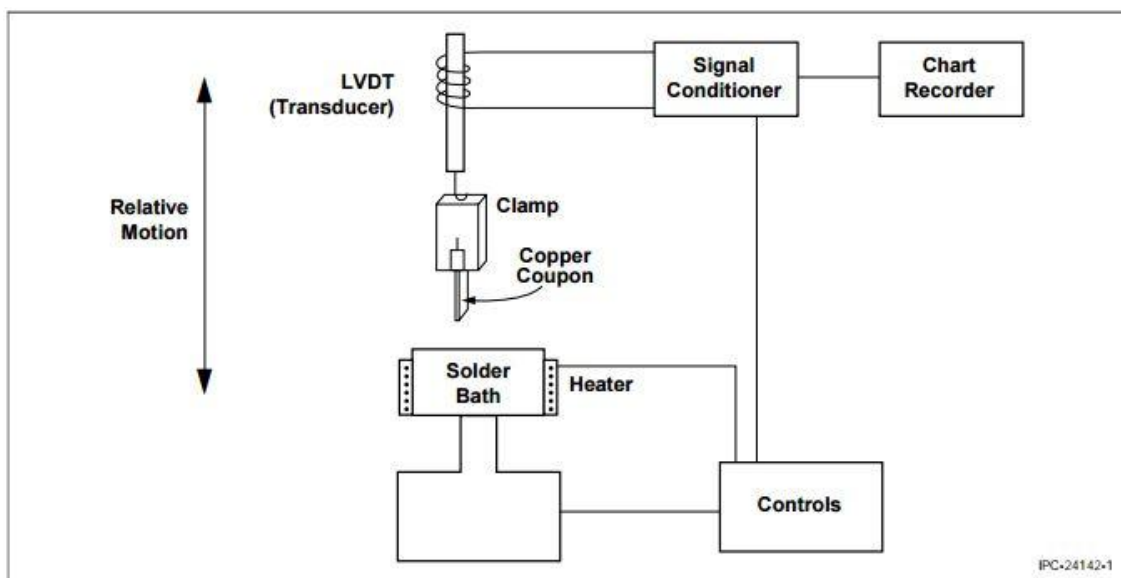
minutách, zvyšuje se tím pravděpodobnost zachycení vzniku dendritů. Pro měření SIR se většinou používá obrazec dle IPC -B-24 (viz obr. 10)



Obr. 10 Motiv dle IPC-B-24

### 4.3. Testování smáčivosti

Testování smáčivosti probíhá na meniskografu metodou smáčecích vah. Tato metoda je vhodnější pro testování smáčení vývodových součástek, nicméně je možné ji využít i pro SMD. Průběh měření spočívá v ponoření vývodu s naneseným tavidlem do nádoby s roztavenou pájkou. Vzorek je zavěšený na citlivých mikrováhách a nádoba s pájkou se k němu přibližuje na zdvihacím mechanismu, dokud nedojde k ponoření vývodu do definované hloubky. Schéma meniskografu je naznačeno na obr. 11. [16]



Obr. 11 Meniskograf [16]

Při styku vzorku s roztavenou pájkou je teplota vzorku nízká, aby mohlo dojít k dobrému smáčení, proto musí být vzorek vtlačen větší silou. Po prohřátí vzorku začne pájka smáčet vzorek a s postupem času začne táhnout vzorek do sebe, proto je poté nutné vyvinout určitou

sílu na jeho vytažení. Protože na ponořený vývod do pájky působí také vztlaková (Archimédova) síla, která vytlačuje vývod z roztavené pájky, proto je nutné ji odečíst podle rovnice:

$$F = \gamma * p * \cos\varphi - g * \rho * V \quad (8)$$

kde:

F - smáčecí síla (N)

$\gamma$  - povrchové napětí roztavené pájky ( $\text{N.m}^{-1}$ )

p - obvod vzorku (m)

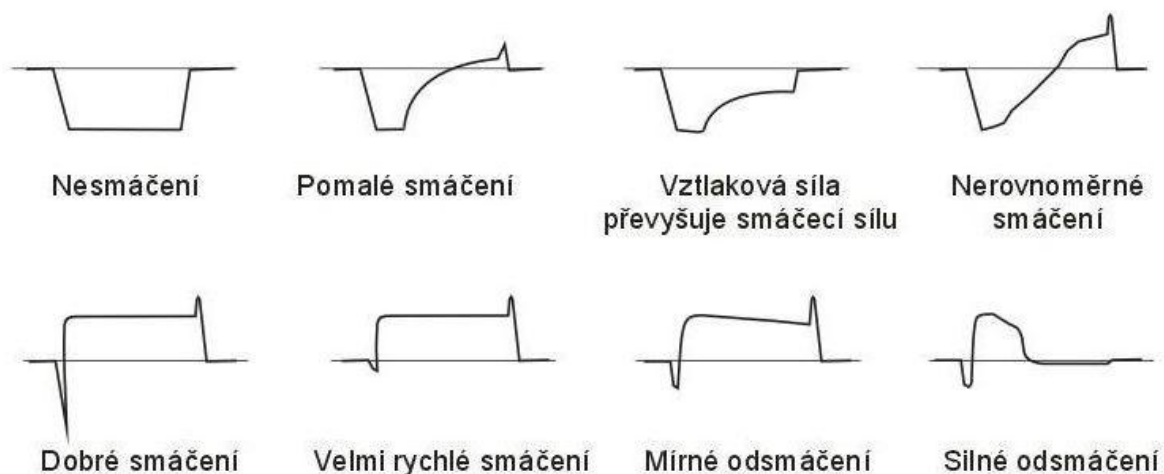
g - gravitační zrychlení ( $\text{m.s}^{-2}$ )

V - objem ponořené části vzorku ( $\text{m}^3$ )

$\rho$  - hustota pájky ( $\text{kg.m}^{-3}$ )

$\varphi$  - smáčecí úhel ( $^\circ$ ) [16]

Průběhy smáčení mohou nabývat různých podob - viz obr. 12



Obr. 12 Závislost smáčecí síly na čase [16]

#### 4.4. Test na měděné zrcadlo

Testování na měděné zrcadlo se provádí dle normy IPC-TM-650 z důvodu zjištění agresivity tavidla. Test bývá proveden na čistou měděnou vrstvu vakuově napařenou na sklo. Zrcadla je nutné před nanesením tavidla vizuálně zkontrolovat, zda na nich nejsou žádné nečistoty, případně vytvořené oxidy. Poté se na zrcadlo položené na vodorovné podložce nanese kapka testovaného tavidla (přibližně 50  $\mu\text{l}$ ), případně pájecí pasta o objemu odpovídajícímu 0,5 mm tloušťky a 8 mm průměru. Dále se na zrcadlo nanese kapka referenčního tavidla, přičemž se nesmí dotknout kapky tavidla testovaného. Takto připravená zrcadla se na 24 hodin umístí do klimatické komory s podmínkami 23  $^\circ\text{C}$  a 50 % RH. Po uplynulé době je nutné zrcadla z komory vyjmout a zkontrolovat odstranění či změnu zabarvení mědi. Vyhodnocení testu se provádí dle kritérií normy J-STD-004. Pokud referenční tavidlo nevyhovuje kategorii L, je nutné celý test zopakovat s novou sadou zrcadel.

## 5. Praktická část s diskuzí dosažených výsledků

### 5.1. Definované cíle

- Seznámení se s problematikou tavidel
- Otestování při pájení a vyhodnocení počtu chyb
- Proměření ionizovatelných nečistot
- Proměření smáčivosti v různých typech pájky
- Změření povrchového izolačního odporu po znečištění tavidlem a po elektromigraci
- Změření frekvenční závislosti kapacity a ztrátového činitele na čistých deskách a na deskách s naneseným tavidlem
- Testování agresivity na měděné zrcadlo

### 5.2. Tavidla použitá pro testování

#### **Kester 979**

V praktické části označováno jako tavidlo 1.

VOC-free no-clean tavidlo na vodní bázi, které zanechává minimální množství zbytků po pájení. Zbytky by neměly být korozivní ani vodivé a dle technického listu výrobce nemusejí být čištěny. Tavidlo není doporučeno pro pájecí procesy bez přehřevu. Doporučené nanášení tavidla je sprejem nebo namáčením. [17]

#### **AIM NC-277**

V praktické části označováno jako tavidlo 2

VOC tavidlo na vodní bázi, které se dle technického listu vyrovná některým tavidlům na alkoholové bázi. Doporučené nanášení je sprejem, ponořením, případně kartáčem, pěnové nanášení výrobce nedoporučuje. Tavidlo je klasifikováno jako no-clean, žádné zbytky by neměly mít kritický efekt na funkčnost desky. [18]

#### **AIM NC-275-B**

V praktické části označeno jako tavidlo 3

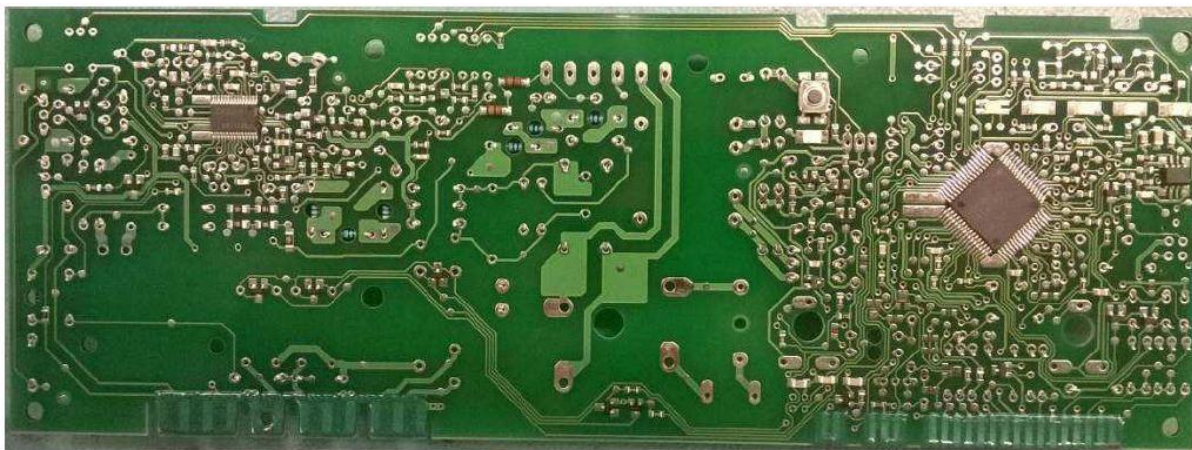
Tavidlo NC-275-B je také klasifikováno jako VOC-free no-clean. Tavidlo je rovněž na vodní bázi a doporučené nanášení je sprejem. Doporučení nanášení je sprejem, kartáčem, případně ponořením. Tavidlo je klasifikováno jako no-clean, v případě kritických aplikací je doporučený oplach deionizovanou vodou. Tavidlo nemá zveřejněný technický list, byla zajištěna pouze pracovní verze z firemních zdrojů.

Tabulka 1: Porovnání specifikací tavidla.

	Tavidlo 1	Tavidlo 2	Tavidlo 3
Rozpouštědlo	DI voda	DI voda	DI voda
Klasifikace podle J-STD-04	ORL0	ORL0	ORL0
Těkavé organické látky	VOC-free	VOC-free	VOC-free
Čištění	No-clean	No-clean	No-clean
Hustota	1,02	1,02	1,0117
Množství pevných látek	4,5 %	5,8 %	2,84 %
Číslo kyselosti	40mg KOH/g tavidla	50,16mg KOH/g tavidla	27,37mg KOH/g tavidla
Doporučené množství nanesení	750-1500 $\mu\text{g}$ solidu/in <sup>2</sup>	500-1500 $\mu\text{g}$ solidu/in <sup>2</sup>	500-1500 $\mu\text{g}$ solidu/in <sup>2</sup>
Doporučené množství nanesení (jednotky SI)	116–232 $\mu\text{g}$ solidu/cm <sup>2</sup>	77-232 $\mu\text{g}$ solidu/cm <sup>2</sup>	77-232 $\mu\text{g}$ solidu/cm <sup>2</sup>
Doporučená teplota přehřevu (horní strana desky)	95-115 °C	100-135 °C	85-110 °C
Doporučená doba setrvání v pájce	Olovnatá 2-4 s Bezolvnatá 4-8 s	4-7 s	4-7 s
Skladovatelnost	12 měsíců 4-25 °C	9 měsíců 4-40 °C	12 měsíců 4-40 °C

### 5.3. Testování tavidel při pájení vlnou

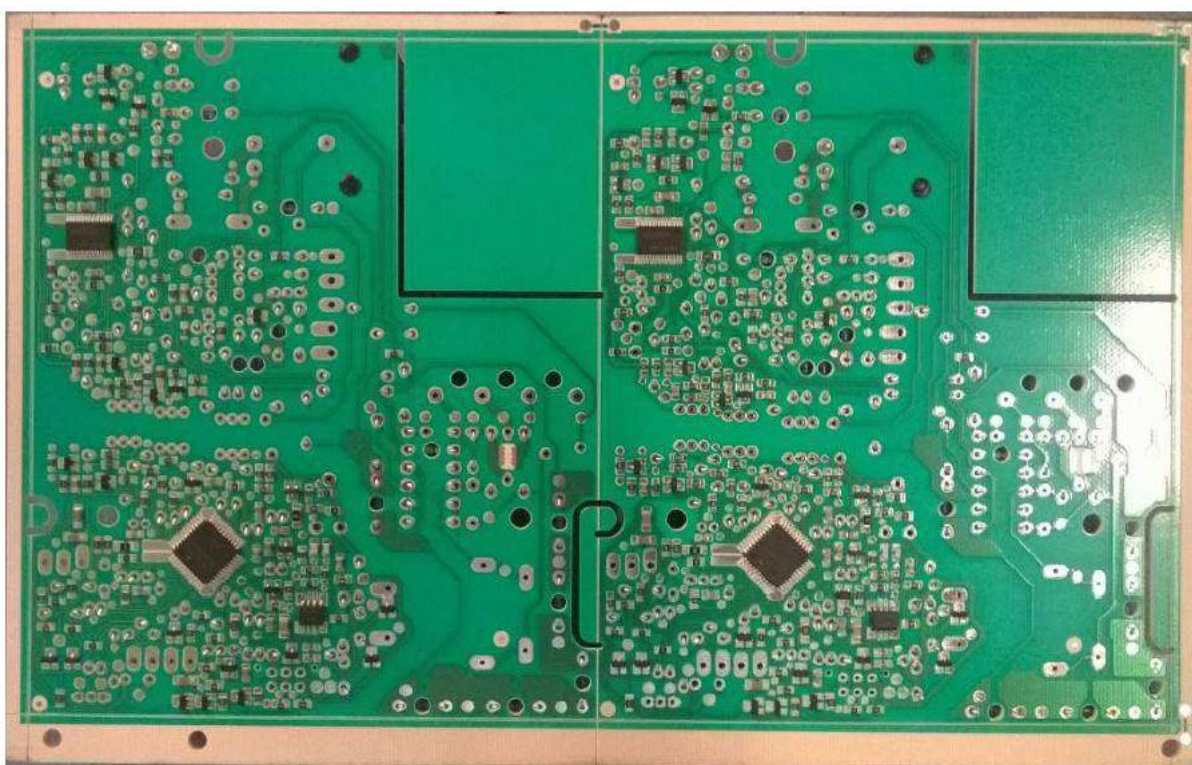
Všechna 3 tavidla byla otestována v olovnaté pájecí vlně (Sn63Pb37, teplota pájecí slitiny 250 °C) v zařízení Electrovert VectraElite bez ochranné dusíkové atmosféry. Pro každé tavidlo bylo zvoleno 50 vzorků osazených DPS s kombinovanou montáží na materiálu FR-4 desky (obr. 13) a 50 vzorků osazených DPS s kombinovanou montáží na desky z materiálu CEM-1 (obr. 14). Tyto desky byly zvoleny kvůli velké hustotě vývodů a malých SOIC pouzder s velkým množstvím vývodů, které znamenají riziko zkratu při nesprávném zapájení. Pro nanesení tavidla bylo užito ultrazvukového beztryskového systému s proudem vzduchu.



Obr. 13 Spodní strana FR-4 desky před ručním doosazením

Tabulka 2 Parametry vlny pro FR-4 desku

Vzorek	Tavidlo 1	Tavidlo 2	Tavidlo 3
Objem tavidla [%]	38	38	43
1. IR přehřev ( $T_{set}$ ) [°C]	370	370	370
2. přehřev ( $T_{set}$ ) [°C]	110	110	110
3. přehřev ( $T_{set}$ ) [°C]	120	120	120
Čipová vlna [ot/min]	770	770	770
Klidná vlna [ot/min]	660	660	660
Rychlost dopravníku [m/min]	1,25	1,25	1,25

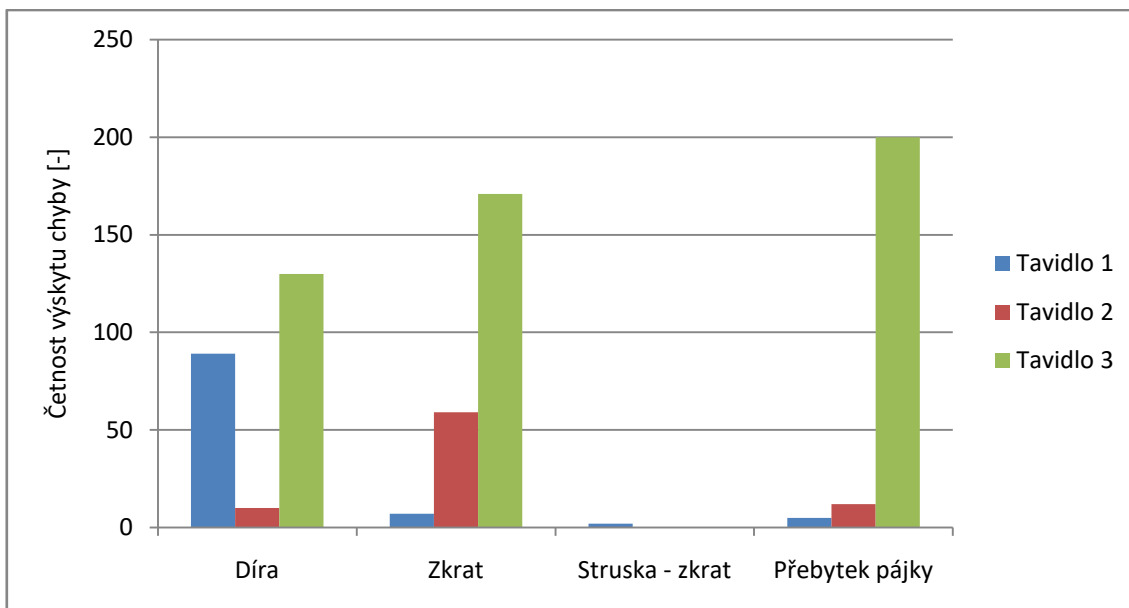


Obr. 14 Spodní strana CEM-1 desky před ručním doosazením

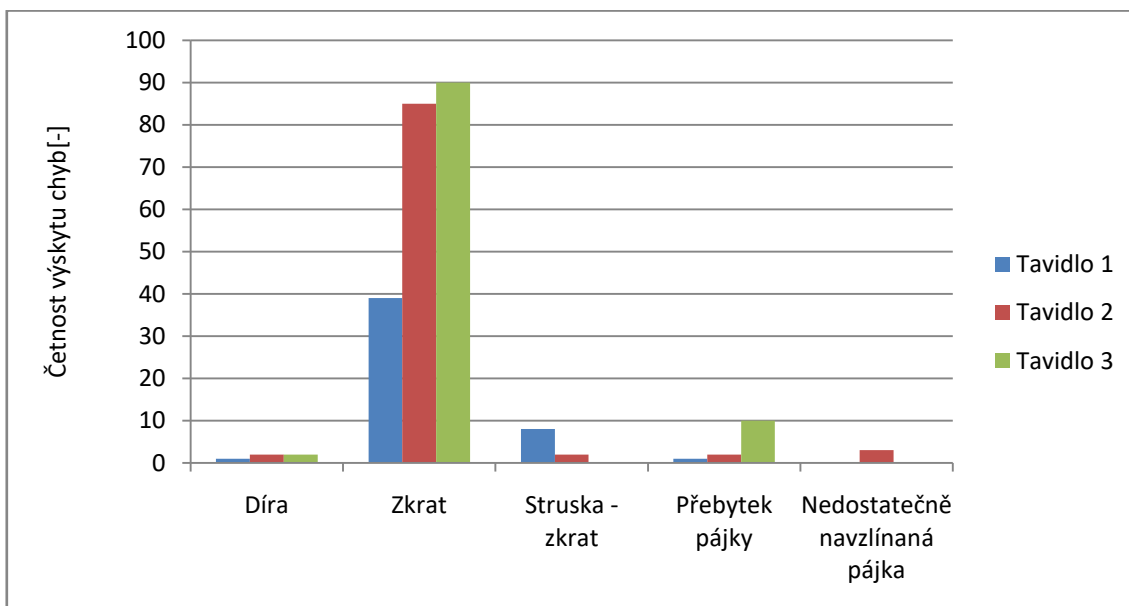
Tabulka 3 Parametry vlny pro desku CEM-1

Vzorek	Tavidlo 1	Tavidlo 2	Tavidlo 3
Objem tavidla [%]	34	34	42
1. IR přehřev ( $T_{set}$ ) [°C]	250	250	250
2. přehřev ( $T_{set}$ ) [°C]	135	135	135
3. přehřev ( $T_{set}$ ) [°C]	145	145	145
Čipová vlna [ot/min]	750	750	750
Klidná vlna [ot/min]	650	650	650
Rychlost dopravníku [m/min]	1,25	1,25	1,25

Špatné výsledky pájení na začátku testu vykazovalo tavidlo 3, proto bylo během testování zvýšené množství tavidla aplikovaného na desku. To mělo negativní dopad na tavidlové zbytky na desce po zapájení.



Graf 1 Chyby na CEM-1 deskách po zapájení vlnou



Graf 2 Chyby na FR-4 deskách po zapájení vlnou

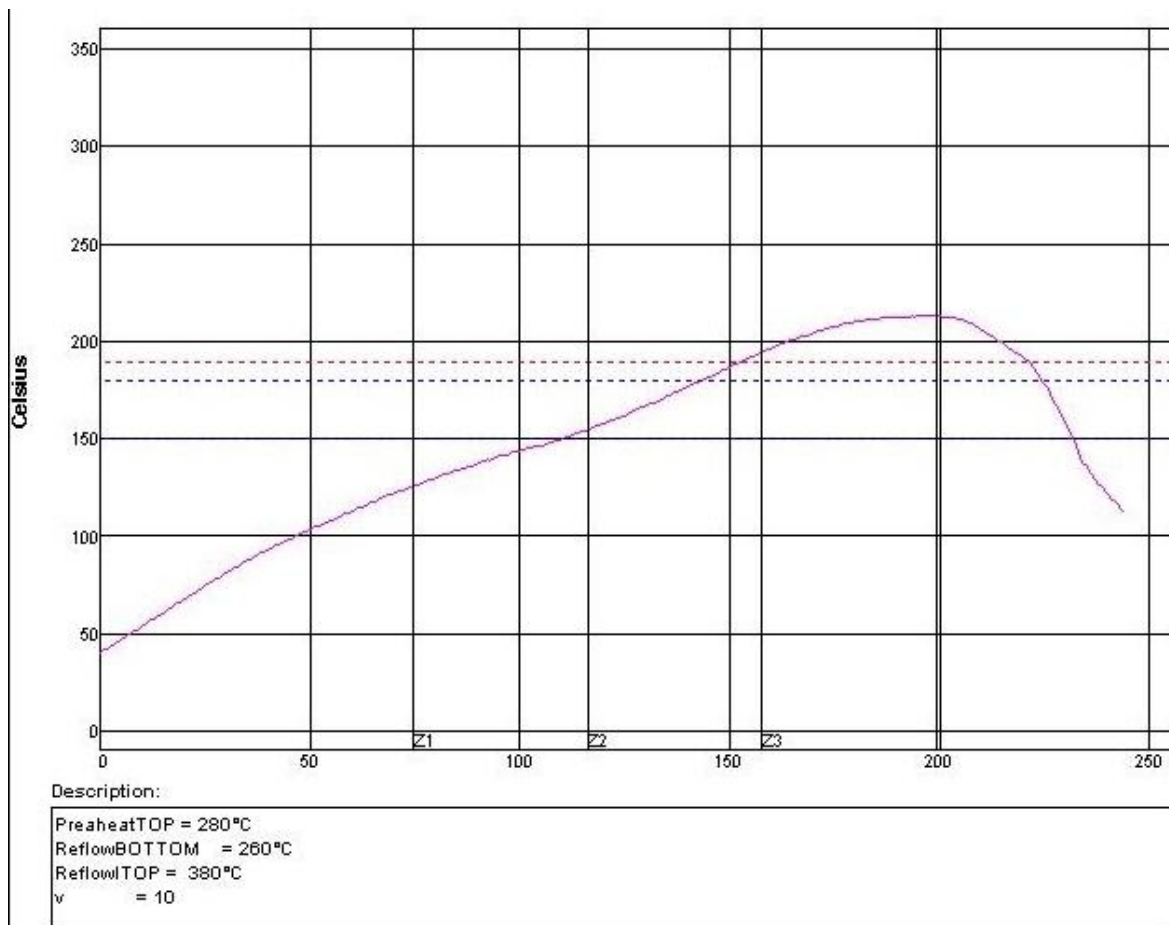
Četnost chyb je vztažena na celkové množství 50 ks DPS pro každé tavidlo. V prvním grafu lze u tavidla 1 a 3 pozorovat velké množství nezapájených děr. To může být ovlivněno špatnou aktivací tavidla. Aktivace tavidla souvisí například s nevhodně zvoleným předehřevem. Teplota předehřevu byla v horních mezích doporučené teploty těchto tavidel, která mohla zreagovat více, než je žádoucí, což má za následek špatné smáčení pájkou. Zkratky na deskách lze přičíst nedokonalosti pájecího procesu a malým roztečím vývodů u pouzdra integrovaného obvodu.

## 5.4. Měření kontaminace desky

Orientační kontaminace tavidlovými zbytky na DPS byla sledována po pájení přetavením a po izotermálním ohřevu. Ionizovatelné nečistoty na desce byly zjišťovány pomocí zjednodušené statické metody ROSE. V prvním kroku byla změřena vodivost očištěné desky v definovaném množství roztoku tvořeného ze 75 % IPA a 25 % deionizovanou vodou. Vodivost by se měla pohybovat v hodnotách okolo  $0,05 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . V případě výrazně vyšší vodivosti by deska musela být znovu očištěna a měření opakováno, aby nedošlo ke zkreslení výsledků. Druhým krokem měření bylo kápnutí  $2*2 \mu\text{l}$  tavidla do měřícího roztoku a následné změření vodivosti. Tím se simulovala kontaminace desky tavidlem před procesem pájení přetavením. Následně byla deska vložena do průběžné pece a prošla přetavovacím cyklem s naměřeným teplotním profilem pro olovnatou pájecí slitinu Sn63Pb37 (obr. 15).

Poslední měření probíhalo po kápnutí  $2*2 \mu\text{l}$  tavidla na různá místa na desce a izotermálním ohřevu na  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 30 minut, tím se simuloval přehřev desky. Veškeré hodnoty vodivosti, teplot a objemů měřících kapalin byly zaznamenány a z nich vypočtena kontaminace desky podle vzorce:

$$Z_{PS} = \frac{(\gamma_1 - \gamma_0) * V}{S * k_g} \quad (9)$$



Obr. 15 Naměřený profil přetavovací pece

Tabulka 4 Hodnoty naměřené konduktometrickou metodou - tavidlo 1

Operace	Tavidlo	Reflow		$\gamma_0$	$\gamma_1$	V	S	Z
č.	$\mu\text{l}$	ano/ne	Tb/Tu <sub>1</sub> /Tu <sub>2</sub> /v	$\mu\text{S}/\text{cm}$	$\mu\text{S}/\text{cm}$	$\text{cm}^3$	$\text{cm}^2$	$\mu\text{gNaCl}/\text{cm}^2$
1	0	ne		0,05	0,07	18,00	13,34	0,06
2	2x2	ne		0,05	0,90	19,00	13,34	2,54
3	2x2	ano	280/260/380/10	0,05	0,10	19,00	13,34	0,15
4	2x2	izoterm. ohřev 110 °C/30 min		0,05	0,36	19,00	13,34	0,93

Tabulka 5 Hodnoty naměřené konduktometrickou metodou - tavidlo 2

Operace	Tavidlo	Reflow		$\gamma_0$	$\gamma_1$	V	S	Z
č.	$\mu\text{l}$	ano/ne	Tb/Tu <sub>1</sub> /Tu <sub>2</sub> /v	$\mu\text{S}/\text{cm}$	$\mu\text{S}/\text{cm}$	$\text{cm}^3$	$\text{cm}^2$	$\mu\text{gNaCl}/\text{cm}^2$
1	0	ne		0,05	0,07	18,00	13,34	0,06
2	2x2	ne		0,05	0,78	18,00	13,34	2,05
3	2x2	ano	280/260/380/10	0,05	0,11	18,00	13,34	0,18
4	2x2	izoterm. ohřev 110 °C/30 min		0,05	0,22	18,00	13,34	0,48

Tabulka 6 Hodnoty naměřené konduktometrickou metodou - tavidlo 3

Operace	Tavidlo	Reflow		$\gamma_0$	$\gamma_1$	V	S	Z
č.	$\mu\text{l}$	ano/ne	Tb/Tu <sub>1</sub> /Tu <sub>2</sub> /v	$\mu\text{S}/\text{cm}$	$\mu\text{S}/\text{cm}$	$\text{cm}^3$	$\text{cm}^2$	$\mu\text{gNaCl}/\text{cm}^2$
1	0	ne		0,05	0,07	18,00	13,34	0,06
2	2x2	ne		0,05	0,67	18,00	13,34	1,76
3	2x2	ano	280/260/380/10	0,05	0,09	17,00	13,34	0,11
4	2x2	izoterm. ohřev 110 °C/30 min		0,05	0,20	18,00	13,34	0,43

V tabulkách jsou vidět vypočtené hodnoty kontaminace desky. Všechna tavidla po procesu pájení přetavením vykazovala malou míru kontaminace desky. Po izotermálním ohřevu lze pozorovat u tavidla 1 výrazně vyšší kontaminaci desky než u zbylých dvou.

## 5.5. Měření ionizovatelných nečistot ROSE metodou

Měření ionizovatelných nečistot bylo provedeno ve třech krocích celkem na 18 deskách, 3 kusy DPS pro každé tavidlo s procesem zasušení a 3 kusy DPS pro každé tavidlo po zapájení vlnou. Z naměřených hodnot byly vypočteny průměry zapsané v tabulkách níže. Před měřením bylo potřeba desky důkladně opláchnout a vysušit. Po vysušení a vychladnutí byla proměřena vodivost a odečten objem roztoku s čistou deskou, následně byla deska zvážena na analytických vahách.

Ve druhém kroku následovalo ponoření desky do tavidla, okapání přes roh DPS po dobu přibližně 15 vteřin. Desky s takto naneseným tavidlem byly umístěny do sušičky na vysušení v 60 °C na 1 hodinu a zasušené zváženy. Následně byly desky jedna po druhé vloženy

do uzpůsobené nádoby, ponechány 15 minut v roztoku navíc s probubláváním dusíku a opět změřena vodivost tohoto roztoku společně s odečtením jeho objemu.

V posledním kroku bylo na desky stejným způsobem nanášeno tavidlo, okapáno 15 vteřin přes roh, zasušeno v 60 °C po dobu jedné hodiny a zvážena hmotnost sušiny. Nakonec byly desky pájeny na laboratorní pájecí vlně s parametry uvedenými níže. Po zapájení vlnou a vychladnutí desek byly opět umístěny do roztoku a ponechány probublávat 15 minut dusíkem. Poté byla změřena vodivost a odečten objem měřicího roztoku.

Pro měření ionizovatelných nečistot je třeba znát přesný objem nanášeného tavidla. Ten byl vypočten z procentuálního množství sušiny a hustoty tavidla uvedené v TDS tavidla a následně vztažen na 1 cm<sup>2</sup> plochy DPS podle vzorce:

$$V_{tav} = \frac{m_{suš} * 100}{\%_{suš} * \rho_{tav} * S} * 1000 \quad (10)$$

Kde:

$m_{suš}$  – hmotnost sušiny (g)

$\%_{suš}$  – procentuální podíl sušiny v tavidle (%)

$\rho_{tav}$  – hustota tavidla (kg.m<sup>-3</sup>)

S – plocha DPS (cm<sup>2</sup>)

Dále byl vypočten poměr ionizovatelných nečistot v 1g sušiny.

Pro lepší přehlednost a porovnatelnost byly hodnoty kontaminace desky a množství nečistot v sušině vyneseny do grafů.

Parametry pájecí vlny:

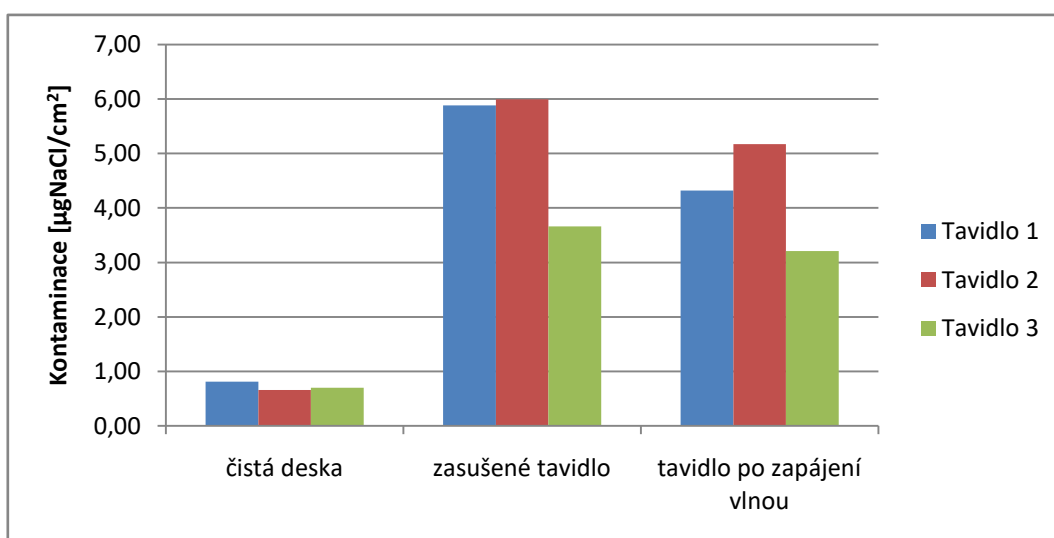
- Teplota přehřevu: 125 °C
- Teplota pájky: 250 °C
- Rychlost dopravníku: 75 cm/min
- Pájecí slitina: eutektická pájka Sn63Pb37

Tabulka 7 Hodnoty pro desky se zasušným tavidlem

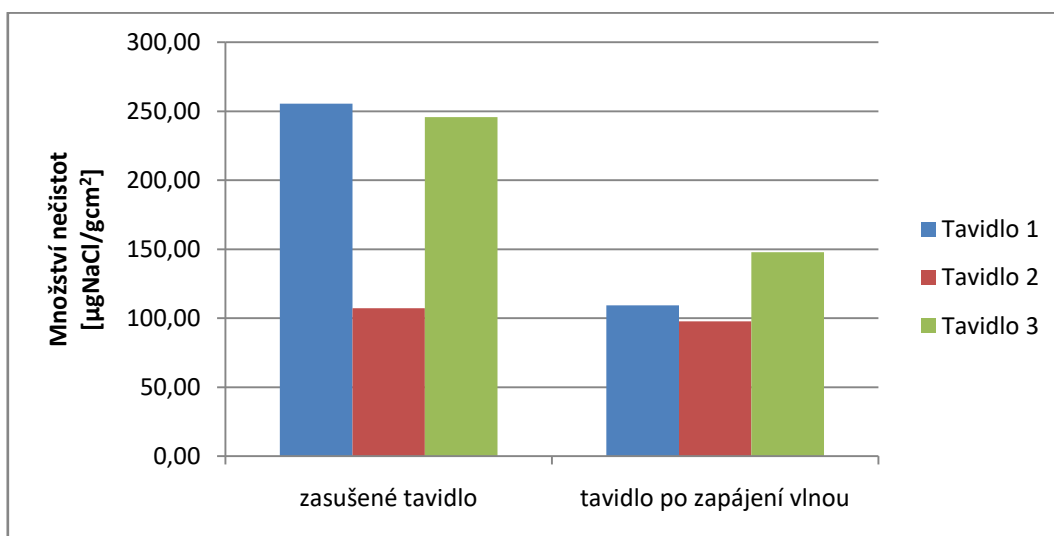
	tavidlo	$\gamma_0$	$\gamma_1$	V	S	Z	$m_{sušiny}$	$V_{tavidla}$	$Z/m_{sušiny}$
		μS/cm	μS/cm	cm <sup>3</sup>	cm <sup>2</sup>	μgNaCl/cm <sup>2</sup>	g	μl/cm <sup>2</sup>	μgNaCl/g.cm <sup>2</sup>
Tavidlo 1	ne	0,05	0,22	860,00	407,50	0,81	/	/	/
	ano	0,07	1,38	823,33	407,50	5,88	0,02	1,23	255,36
Tavidlo 2	ne	0,05	0,19	870,00	407,50	0,66	/	/	/
	ano	0,07	1,39	836,67	407,50	5,99	0,06	2,32	107,26
Tavidlo 3	ne	0,05	0,20	860,00	407,50	0,70	/	/	/
	ano	0,07	0,90	810,00	407,50	3,66	0,01	1,27	245,80

Tabulka 8 Hodnoty pro desky zapájené vlnou

	tavidlo	$\gamma_0$	$\gamma_1$	V	S	Z	$m_{\text{sušiny}}$	$V_{\text{tavidla}}$	$Z/m_{\text{sušiny}}$
		$\mu\text{S/cm}$	$\mu\text{S/cm}$	$\text{cm}^3$	$\text{cm}^2$	$\mu\text{gNaCl/cm}^2$	g	$\mu\text{l/cm}^2$	$\mu\text{gNaCl/g.cm}^2$
Tavidlo 1	ne	0,07	0,27	820,00	407,50	0,85	/	/	/
	ano	0,06	1,07	823,33	407,50	4,32	0,04	2,12	109,17
Tavidlo 2	ne	0,07	0,24	833,33	407,50	0,75	/	/	/
	ano	0,07	1,26	836,67	407,50	5,17	0,05	2,20	97,70
Tavidlo 3	ne	0,07	0,25	833,33	407,50	0,81	/	/	/
	ano	0,06	0,82	810,00	407,50	3,21	0,02	1,86	147,77



Graf 3 Porovnání míry kontaminace desky



Graf 4 Porovnání množství nečistot v sušině

Vysoká míra znečištění je zčásti dána velkým množstvím naneseného tavidla. Měřením bylo nasimulováno znečištění DPS tavidlem před zapájením a zjištěno množství zbylých ionizovatelných nečistot po projití DPS procesem pájení vlnou. Z grafu č. 4 je patrné, že u tavidel 1 a 3 velké množství nečistot při pájecím procesu zreaguje a vypaří se. Mírné

znečištění opláchnutých desek (viz graf č. 3) vzniká pravděpodobně uvolňováním nečistot ze základního materiálu FR-4.

## 5.6. Testování smáčivosti

Smáčivost byla testována v meniskografu na vývodech součástek o průměru 0,75 mm. Rychlost ponoru byla nastavena na 10 mm/s a hloubka ponoru byla 3 mm do pájek SAC305, SN100C – teplota 250 °C a eutektické pájky Sn63Pb37 – teplota 245 °C. Pro každou pájku a každé tavidlo bylo provedeno 10 měření a z nich vypočten aritmetický průměr, následně vyneseny do grafů. Dále byla určena hodnota vztlakové síly podle vztahu:

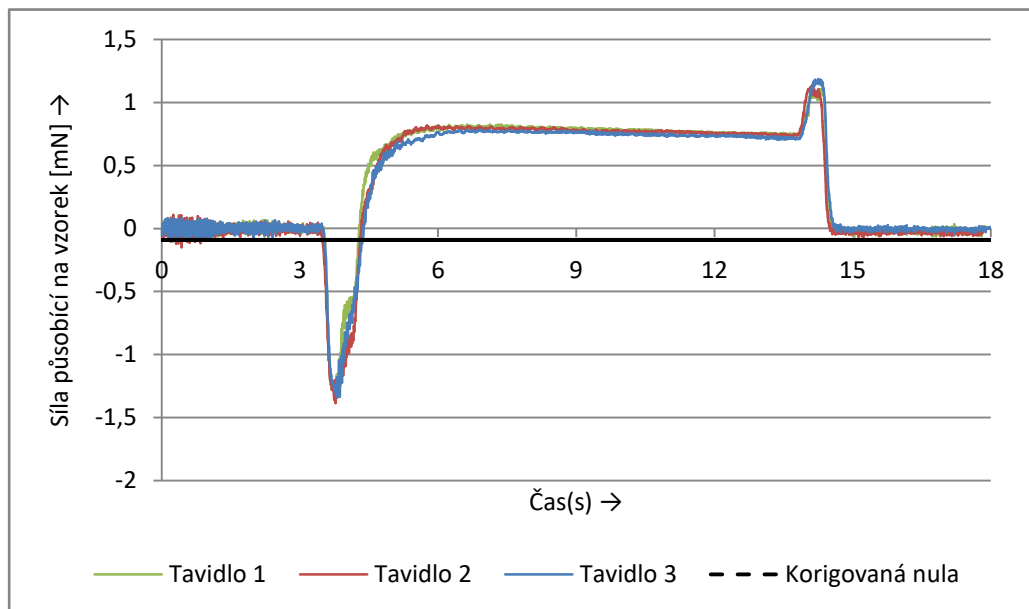
$$F_{vz} = V * \rho_{pájky} * g \quad (11)$$

$$\rho_{SAC305} = 7,37 \text{ g.cm}^3$$

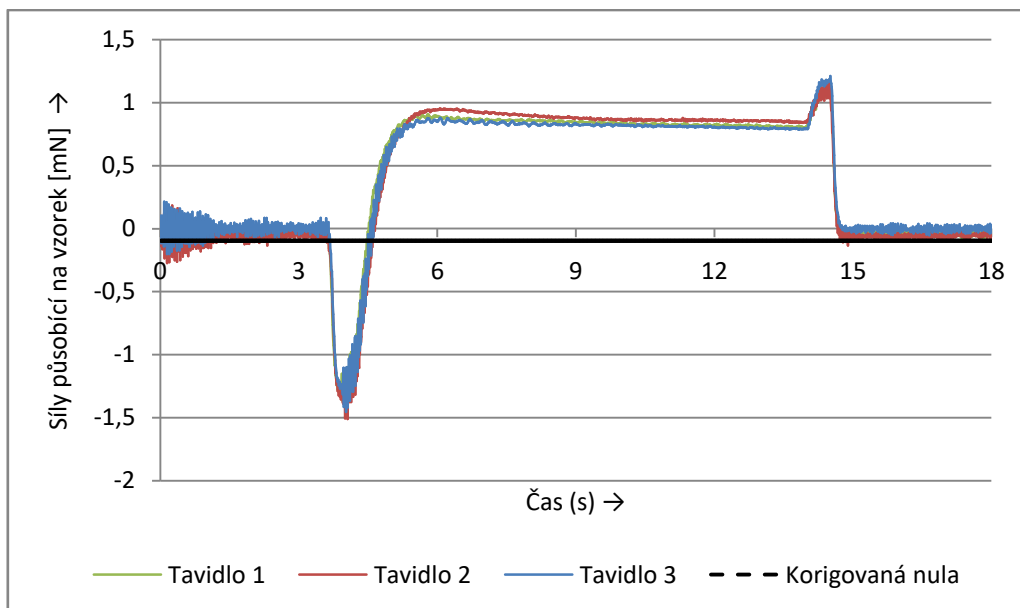
$$\rho_{SN100C} = 7,4 \text{ g.cm}^3$$

$$\rho_{Sn63Pb37} = 8,4 \text{ g.cm}^3$$

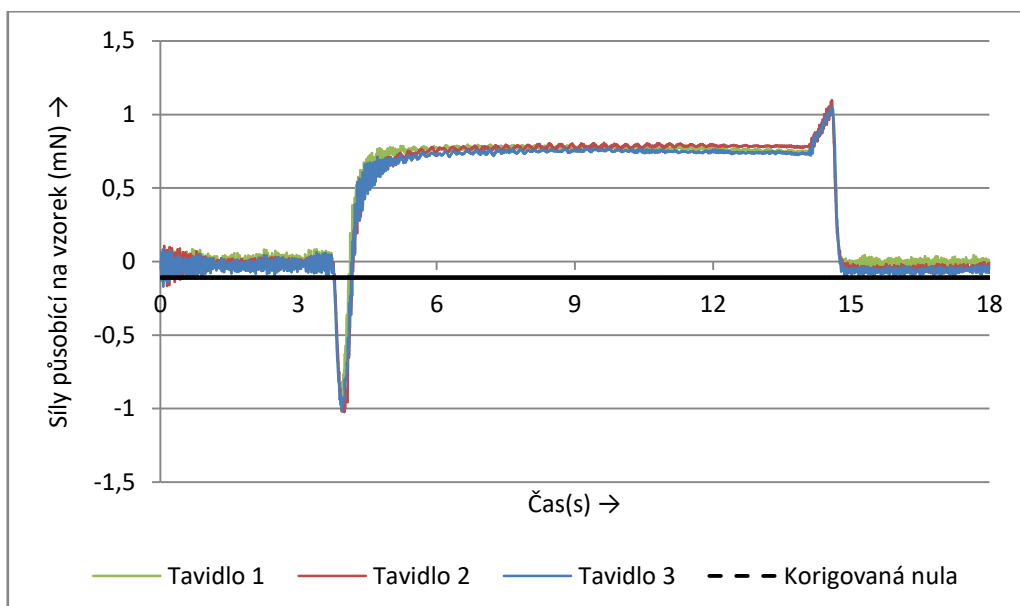
Tato hodnota byla zapsána do tabulky, odečtena od nulové osy a tím vznikla tzv. korigovaná nula.



Graf 5 Smáčivost tavidel v pájce SAC305



Graf 6 Smáčivost tavidel v pájce SN100C



Graf 7 Smáčivost tavidel v pájce Sn63Pb37

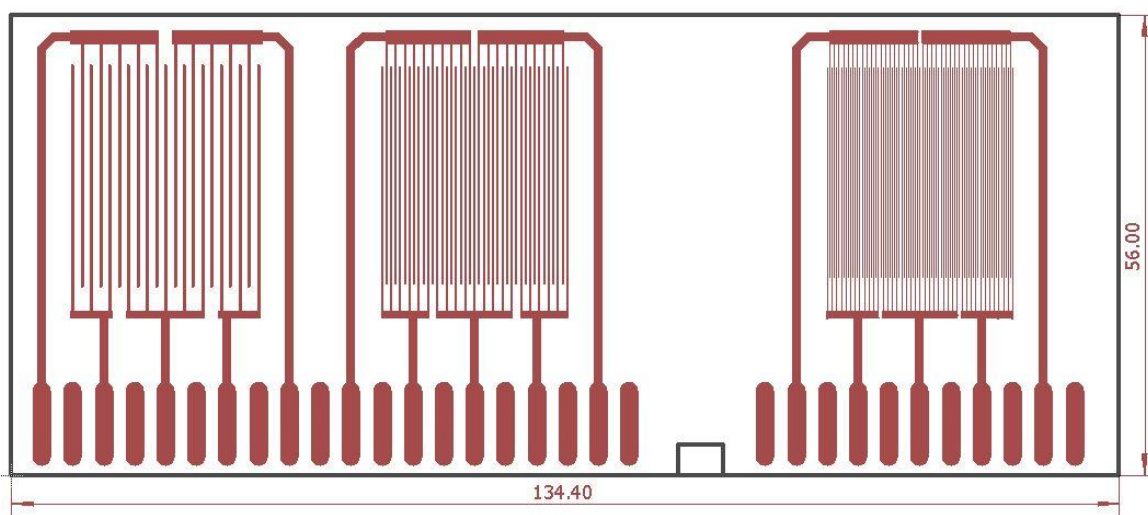
Tabulka 9 Vypočtené hodnoty sil a výsledných poměrů

Vzorek	SAC305			SN100C			Sn63Pb37		
	Tav. 1	Tav. 2	Tav. 3	Tav. 1	Tav. 2	Tav. 3	Tav. 1	Tav. 2	Tav. 3
$F_{vz}$ [mN]	0,091	0,091	0,091	0,096	0,096	0,096	0,109	0,109	0,109
$F_{max}$ [mN]	0,824	0,816	0,782	0,901	0,947	0,873	0,794	0,806	0,770
$F_{max2}$ [mN]	0,915	0,907	0,873	0,997	1,043	0,969	0,903	0,915	0,879
$F_{max2}/t_{2/3Fmax2}$ [mN.s <sup>-1</sup> ]	0,769	0,700	0,647	0,761	0,708	0,729	1,309	1,144	1,221

Průběhy jsou u všech tavidel velmi podobné, proto byla z grafu odečtena maximální hodnota  $F_{\max}$ , ze které byla dopočtena korigovaná hodnota  $F_{\max 2}$ , z ní  $F_{2/3\max 2}$  a z grafu následně odečten čas  $t_{2/3F_{\max 2}}$  dosažení této síly. Tento čas je brán od doby, kdy došlo ke styku pájky a vývodu. Smáčivost byla určena z poměru hodnot maximální síly  $F_{\max 2}$  a času  $t_{2/3F_{\max 2}}$ . U všech tavidel u bezolovnatých pájek je zřetelné velmi mírné odsmáčení. Rozkmity v průběhu jsou způsobeny vysokou citlivostí meniskografu a jemnými otřesy při pohybu nádoby s pájkou.

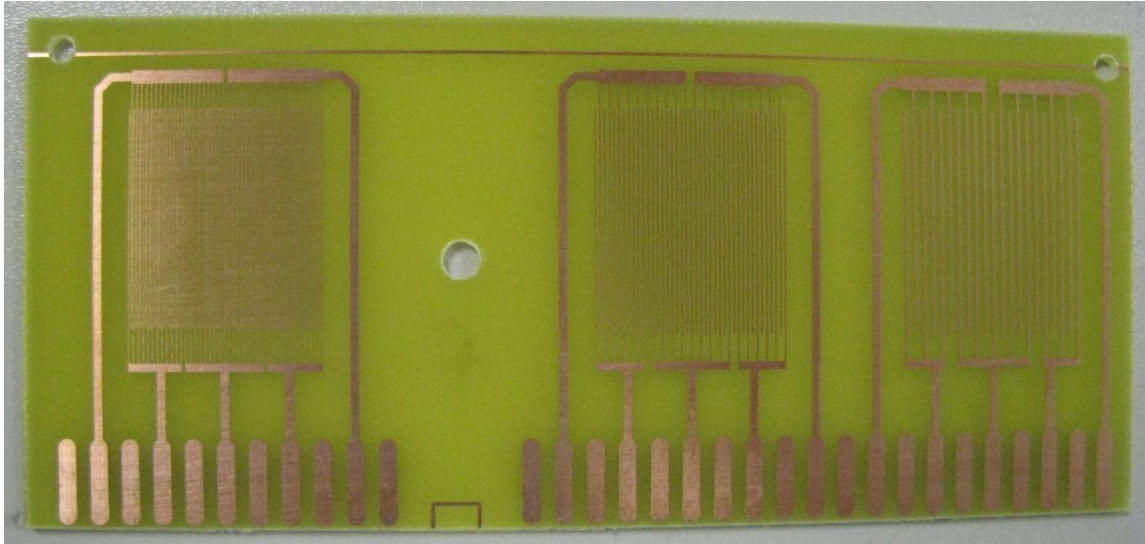
## 5.7. Příprava desek pro měření SIR, C a $\text{tg } \delta$

Pro měření SIR byla zvolena deska podle normy IPC-B-25, která je více preferována pro sledování elektromigrace. Návrh desky byl proveden v programu Eagle. Vodivé cesty mají šířku 0,75, 0,38 a 0,22 mm. Z navrženého motivu byla ve vyvolávacím studiu vytvořena negativní předloha pro osvit fotorezistu.



Obr. 16 Navržený motiv

Pro výrobu byly použity destičky ze sklolaminátu FR-4 s 18  $\mu\text{m}$  vrstvou mědi. Destičky byly okartáčovány, omyty a osušeny. Po vysušení byl nalaminován negativní fotorezist. Po laminaci následovala 21 s expozice přes vytvořenou negativní filmovou předlohu. Filmovou předlohu je nutné přiložit natištěnou stranou nebo emulzí k desce, aby nedošlo k interferencím na folii a podsvícení motivu. Po ustálení rezistu byla deska vyvolána v 1 % roztoku  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (uhlíčitánu sodného) a opláchnuta. Následovalo odleptání mědi v roztoku kyseliny chlorovodíkové, peroxidu vodíku a vody (poměr roztoku  $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$  1:1:3) a další oplach. Další krok byl odstranění fotorezistu (tzv. stripování) v 10 % roztoku hydroxidu sodného ( $\text{NaOH}$ ) a následný oplach vodou. Poté byly desky přemístěny do sušičky na vysušení v 70  $^\circ\text{C}$  po dobu cca 10 minut. Dodatečně byly do desek vyvrtány otvory pro upevnění distančních sloupků a umístění do klimatické komory, opláchnuty v roztoku izopropylalkoholu a deionizované vody a vysušeny. Takto připravené desky (obr. 17) byly uskladněny a připraveny na měření povrchového izolačního odporu, kapacity a ztrátového činitele.



Obr. 17 Hotová testovací deska

## 5.8. Měření povrchového izolačního odporu a elektromigrace

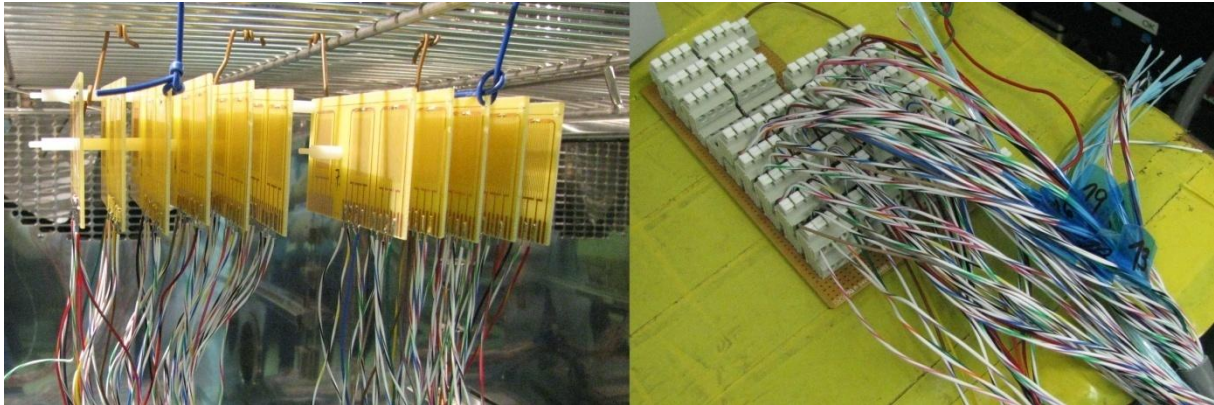
Měření povrchového izolačního odporu bylo provedeno pomocí megohmmetru IM6 (obr. 18). Megohmmetr má rozsah měření od  $10^6 \Omega$  do  $10^{15} \Omega$  a interní zdroj s rozsahem měřicího napětí od 0 do 999 V. Přístroj je vhodný ke stejnosměrnému měření velmi vysokých hodnot odporů a proudů v rozsahu 1 mA až 1 pA. Vzhledem k citlivosti přístroje je doporučeno veškeré měřicí kabely stínit pro potlačení výchylek.



Obr. 18 Megohmmetr IM6 [19]

Měření probíhalo dle normy IPC-TM-650 na 3 deskách pro každý typ tavidla a na 2 deskách ponechaných bez tavidla, které sloužily jako referenční. Z naměřených hodnot byly vypočítány průměry zapsané v tabulce č. 8 a vyneseny do grafů. Pro měření byl použit střední a velký motiv, malý motiv byl vzhledem k nevyužitelnosti pro firmu Honeywell a kvůli úspoře měřicích kabelů vynechán. Před samotným měřením byly uskladněné desky opláchnuty a vysušeny. Poté byla na motivy pipetou nanášena a rozetřena kapka tavidla.

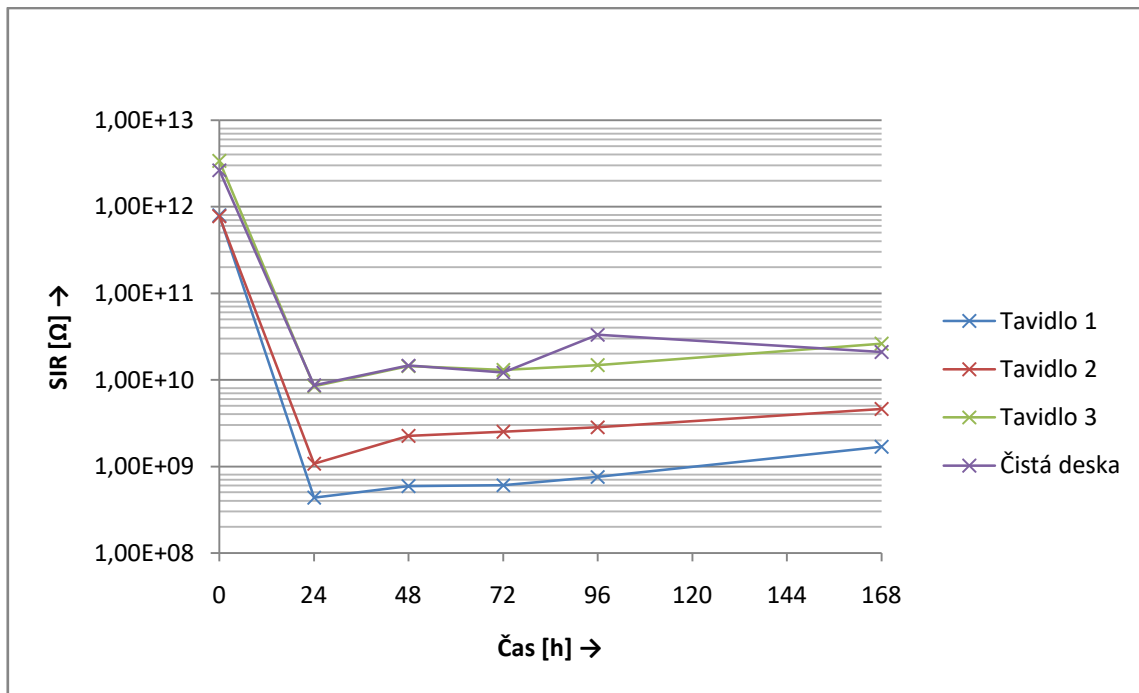
Desky s takto naneseným tavidlem přešly přes pájecí vlnu motivem nahoru. Následovalo připájení měřicích a napájecích kabelů na kontakty na deskách a umístění takto připravených vzorků do klimatické komory. Stárnutí desek probíhalo po dobu 7 dní při teplotě 40 °C, relativní vlhkosti 90 % a napájecím napětí 10 V. Měření probíhalo ihned po umístění do klimatické komory, dále po 24, 48, 72, 96 a 168 hodinách. Při měření bylo odpojeno napájecí napětí a desky změřeny megohmmetrem při testovacím napětí 100 V. Desky byly ponechány v komoře i při měření, z důvodu zachování klimatických podmínek. Po posledním měření byly vyjmuty z komory, zasušeny a nafoceny.



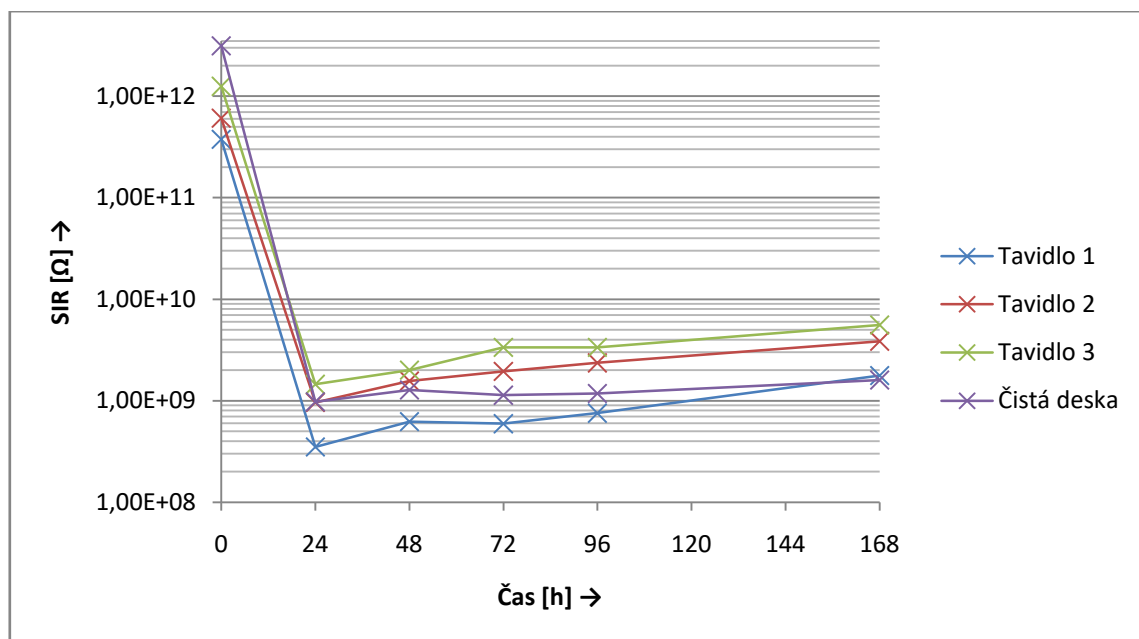
Obr. 19 Desky umístěné v klimatické komoře a napájecí deska

Tabulka 10: Průměrné hodnoty SIR jednotlivých motivů

			Čas [h]					
			0	24	48	72	96	168
SIR [ $\Omega$ ]	Velký motiv	Čistá deska	2,65E+12	8,65E+09	1,47E+10	1,22E+10	3,33E+10	2,10E+10
		Tavidlo 1	7,95E+11	4,35E+08	5,92E+08	6,08E+08	7,58E+08	1,68E+09
		Tavidlo 2	7,73E+11	1,07E+09	2,24E+09	2,51E+09	2,84E+09	4,60E+09
		Tavidlo 3	3,37E+12	8,40E+09	1,45E+10	1,30E+10	1,48E+10	2,62E+10
	Střední motiv	Čistá deska	3,13E+12	9,75E+08	1,28E+09	1,14E+09	1,18E+09	1,60E+09
		Tavidlo 1	3,77E+11	3,52E+08	6,22E+08	5,95E+08	7,55E+08	1,78E+09
		Tavidlo 2	6,08E+11	9,65E+08	1,57E+09	1,95E+09	2,36E+09	3,85E+09
		Tavidlo 3	1,25E+12	1,45E+09	2,01E+09	3,35E+09	3,35E+09	5,58E+09

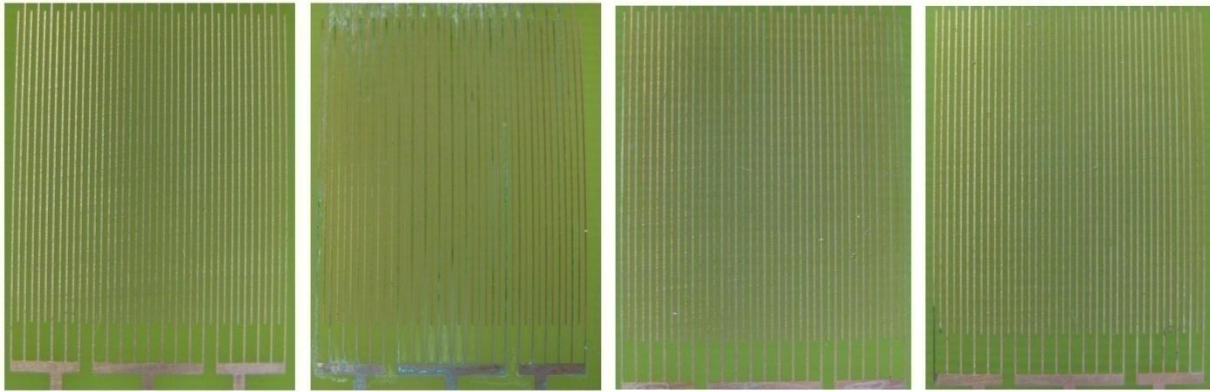


Graf 8 Hodnoty povrchového izolačního odporu pro velký motiv



Graf 9 Hodnoty povrchového izolačního odporu pro střední motiv

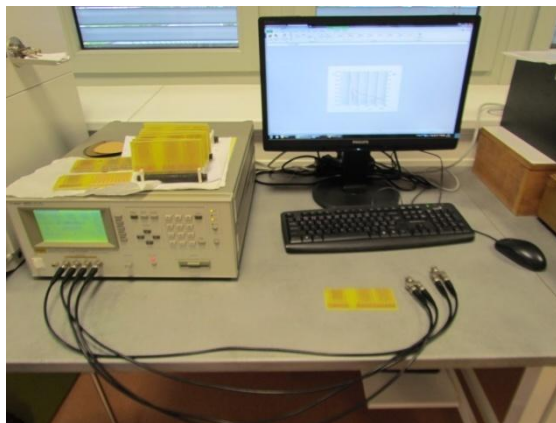
Z grafů je patrné, že povrchový izolační odpor výrazně klesl až po 24 hodinách. To lze přisoudit působení vlhkosti a navlhavosti materiálu FR-4. Největší degradaci povrchového izolačního odporu prokazovalo tavidlo 1. Navíc u něj byly zpozorovány mírné korozivní účinky a velké množství viditelných tavidlových zbytků (viz obr. 20). Postupné zvyšování SIR je pravděpodobně způsobeno tvorbou měděných oxidů, které mohou částečně působit jako izolace.



Obr. 20 Snímky středních motivů po stárnutí (zleva čistá deska, tavidlo 1, tavidlo 2, tavidlo 3)

### 5.9. Měření frekvenční závislosti kapacity a ztrátového činitele

Měření frekvenčních závislostí kapacity  $C$  a ztrátového činitele  $\text{tg } \delta$  bylo provedeno pomocí LCR mostu Agilent 4284A. Zařízení slouží k měření kapacit, indukancí, činitelů ztrát a jakosti apod. v závislosti na frekvenci v rozsahu od 20 Hz do 1 MHz. Přístroj byl propojen s počítačem, kde zapisoval naměřené hodnoty do programu Excel.



Obr. 21 Snímek pracoviště pro měření  $C$  a  $\text{tg } \delta$

Měření probíhalo na čistých deskách, následně s nanesenými 10  $\mu\text{l}$  tavidla na každém motivu a nakonec byly proměřeny desky z předchozího měření SIR po elektromigraci. Desky byly před každým měřením 1 hodinu kondicionovány v 60  $^{\circ}\text{C}$ . Pro každé tavidlo byly použity 3 desky se 4 segmenty pro každý motiv, z naměřených hodnot byly vypočteny průměry a vyneseny do grafů. Pro přehlednost jsou přidány tabulky s hodnotami kapacity a ztrátového činitele v dekadách frekvence.

Tabulka 11 Hodnoty C a tg  $\delta$  na malém motivu

f [Hz]	Čistá deska		Tavidlo 1		Tavidlo 2		Tavidlo 3	
	C [F]	tg $\delta$ [-]	C [F]	tg $\delta$ [-]	C [F]	tg $\delta$ [-]	C [F]	tg $\delta$ [-]
100	1,19E-11	0,027	1,34E-11	0,141	1,34E-11	0,425	1,28E-11	0,272
1000	1,14E-11	0,006	1,25E-11	0,028	1,2E-11	0,089	1,19E-11	0,043
10000	1,13E-11	0,008	1,23E-11	0,014	1,15E-11	0,026	1,17E-11	0,015
100000	1,11E-11	0,014	1,2E-11	0,016	1,12E-11	0,020	1,15E-11	0,016
1000000	1,07E-11	0,023	1,16E-11	0,025	1,08E-11	0,025	1,11E-11	0,025

Tabulka 12 Hodnoty C a tg  $\delta$  na středním motivu

f [Hz]	Čistá deska		Tavidlo 1		Tavidlo 2		Tavidlo 3	
	C [F]	tg $\delta$ [-]	C [F]	tg $\delta$ [-]	C [F]	tg $\delta$ [-]	C [F]	tg $\delta$ [-]
100	6,97E-12	0,043	7,22E-12	0,119	7,36E-12	0,250	7,28E-12	0,190
1000	6,55E-12	0,007	6,67E-12	0,021	6,68E-12	0,049	6,66E-12	0,030
10000	6,47E-12	0,007	6,55E-12	0,011	6,48E-12	0,018	6,53E-12	0,012
100000	6,37E-12	0,013	6,43E-12	0,014	6,34E-12	0,017	6,42E-12	0,014
1000000	6,19E-12	0,020	6,24E-12	0,020	6,14E-12	0,021	6,24E-12	0,020

Tabulka 13 Hodnoty C a tg  $\delta$  na velkém motivu

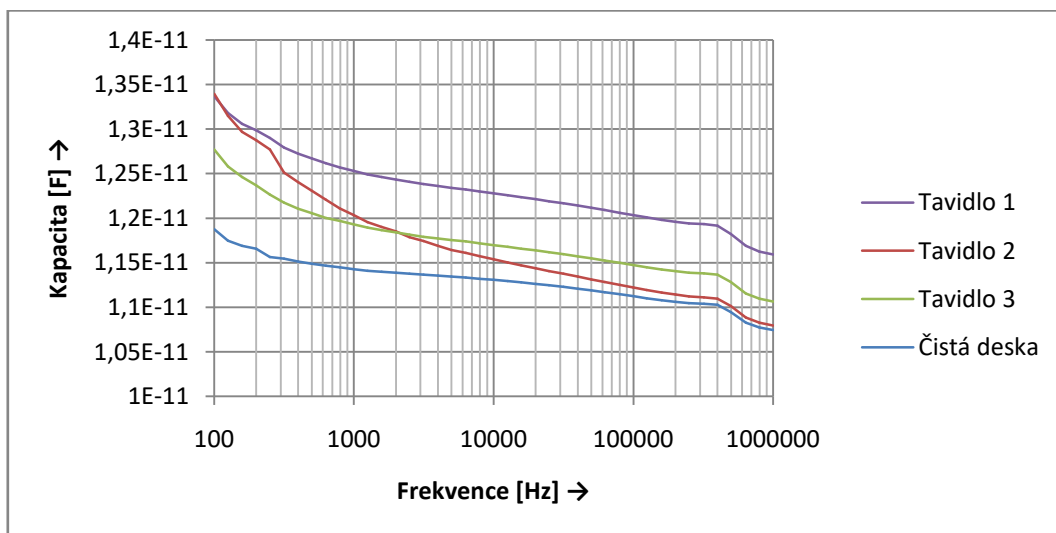
f [Hz]	Čistá deska		Tavidlo 1		Tavidlo 2		Tavidlo 3	
	C [F]	tg $\delta$ [-]	C [F]	tg $\delta$ [-]	C [F]	tg $\delta$ [-]	C [F]	tg $\delta$ [-]
100	4,21E-12	0,068	4,28E-12	0,059	4,43E-12	0,057	4,33E-12	0,061
1000	3,82E-12	0,008	3,85E-12	0,009	3,87E-12	0,009	3,88E-12	0,009
10000	3,76E-12	0,007	3,78E-12	0,009	3,75E-12	0,009	3,81E-12	0,009
100000	3,7E-12	0,013	3,72E-12	0,015	3,68E-12	0,016	3,75E-12	0,015
1000000	3,6E-12	0,018	3,63E-12	0,019	3,58E-12	0,020	3,65E-12	0,020

Tabulka 14 Hodnoty C a tg  $\delta$  na středním motivu po elektromigraci

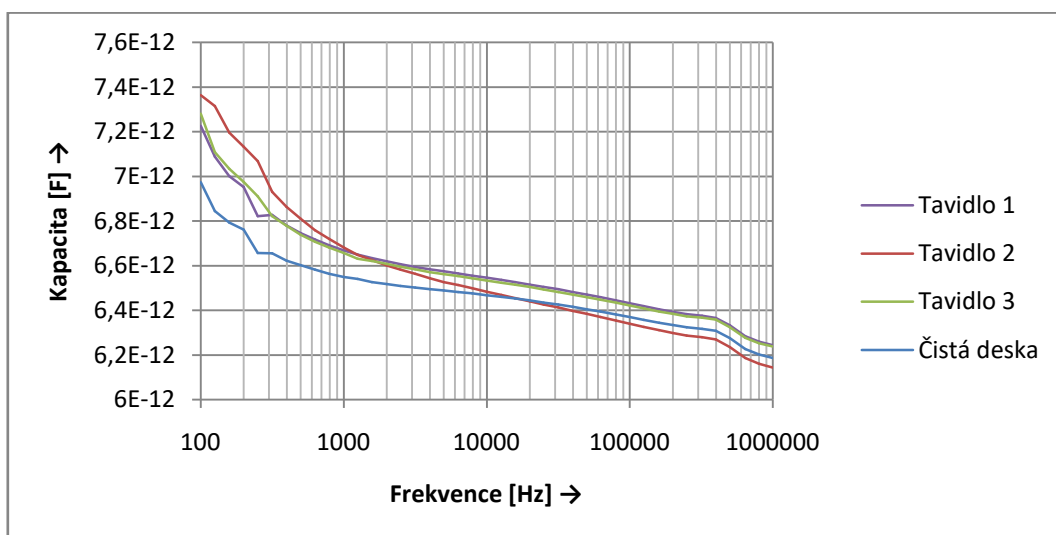
f [Hz]	Čistá deska		Tavidlo 1		Tavidlo 2		Tavidlo 3	
	C [F]	tg $\delta$ [-]	C [F]	tg $\delta$ [-]	C [F]	tg $\delta$ [-]	C [F]	tg $\delta$ [-]
100	6,97E-12	0,043	8,15E-12	0,037	8,36E-12	0,036	8,12E-12	0,036
1000	6,55E-12	0,007	7,72E-12	0,007	7,94E-12	0,008	7,71E-12	0,008
10000	6,47E-12	0,007	7,62E-12	0,009	7,83E-12	0,010	7,6E-12	0,010
100000	6,37E-12	0,013	7,48E-12	0,015	7,67E-12	0,016	7,46E-12	0,016
1000000	6,19E-12	0,020	7,25E-12	0,020	7,43E-12	0,022	7,22E-12	0,022

Tabulka 15 Hodnoty C a tg δ na velkém motivu po elektromigraci

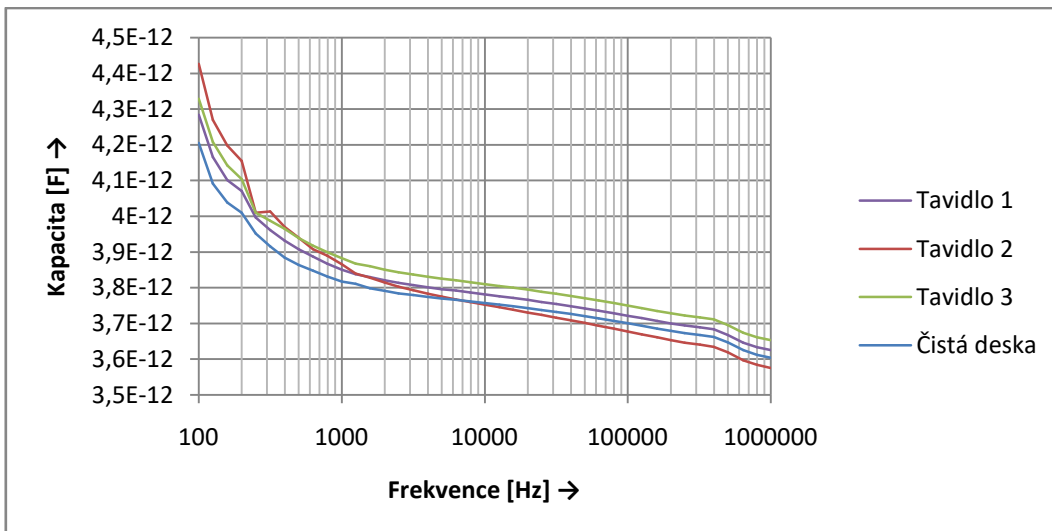
f [Hz]	Čistá deska		Tavidlo 1		Tavidlo 2		Tavidlo 3	
	C [F]	tg δ [-]	C [F]	tg δ [-]	C [F]	tg δ [-]	C [F]	tg δ [-]
100	4,21E-12	0,068	4,82E-12	0,059	4,88E-12	0,057	4,81E-12	0,061
1000	3,82E-12	0,008	4,42E-12	0,009	4,48E-12	0,009	4,41E-12	0,009
10000	3,76E-12	0,007	4,34E-12	0,009	4,4E-12	0,009	4,34E-12	0,009
100000	3,7E-12	0,013	4,26E-12	0,015	4,32E-12	0,016	4,26E-12	0,015
1000000	3,6E-12	0,018	4,14E-12	0,019	4,19E-12	0,020	4,13E-12	0,020



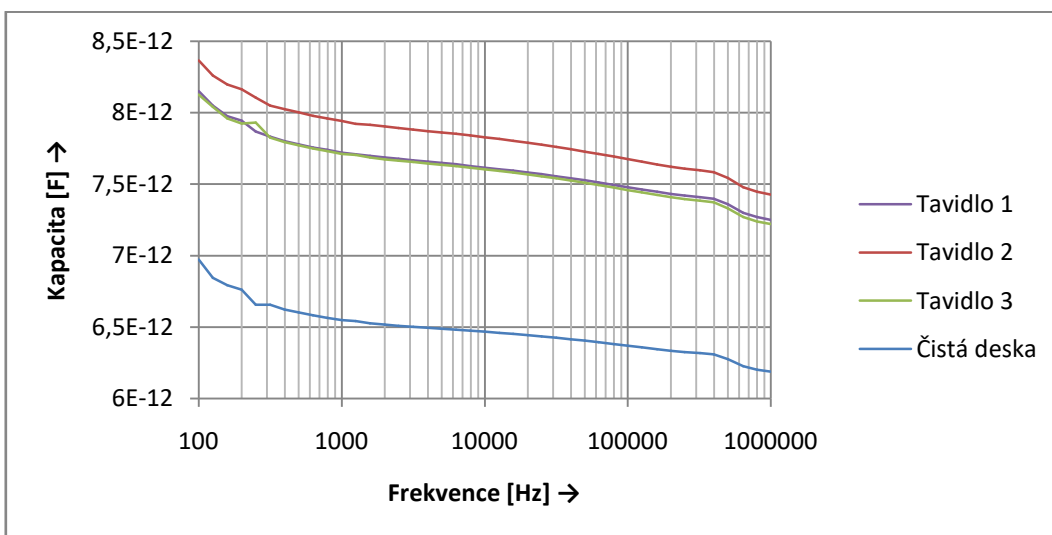
Graf 10 Frekvenční závislost kapacity - malý motiv



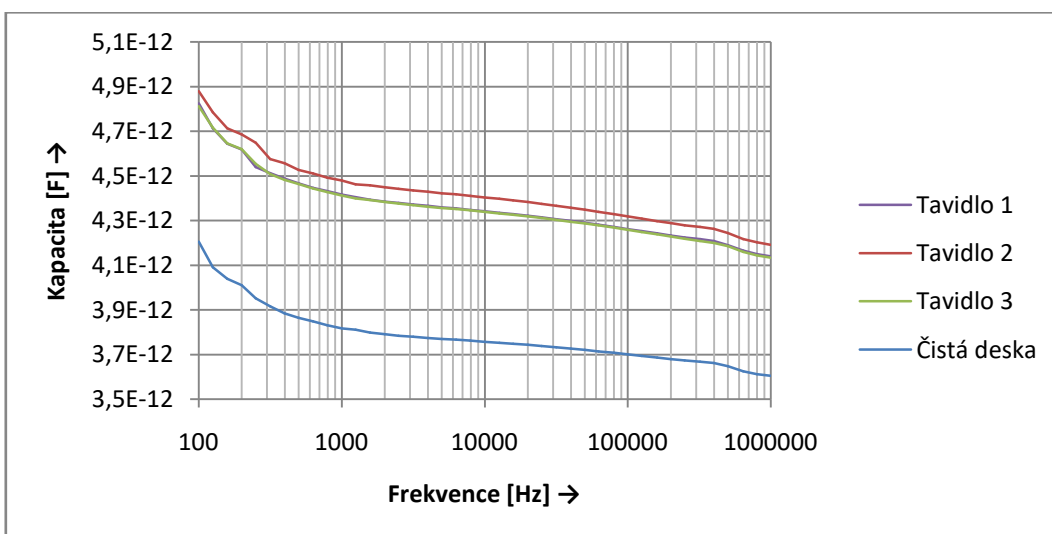
Graf 11 Frekvenční závislost kapacity - střední motiv



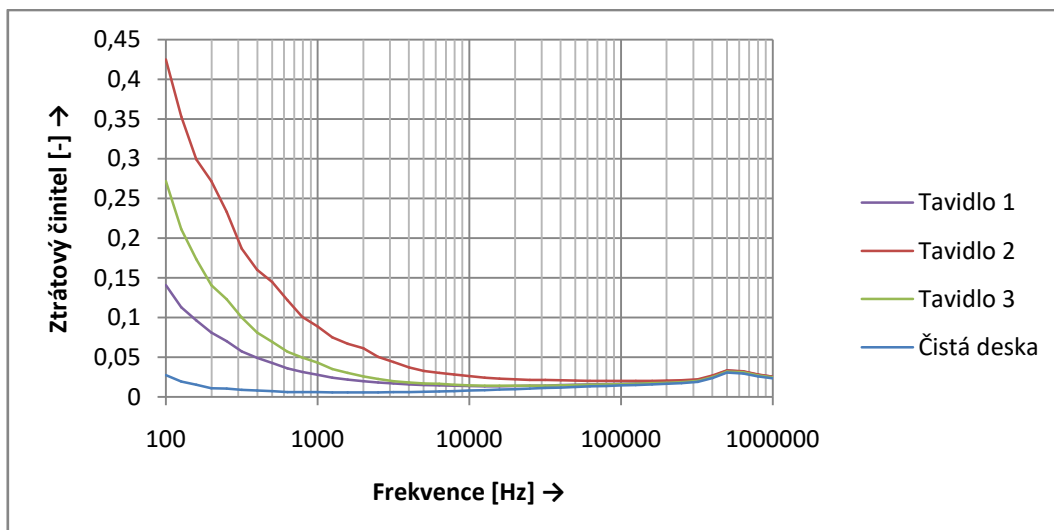
Graf 12 Frekvenční závislost kapacity - velký motiv



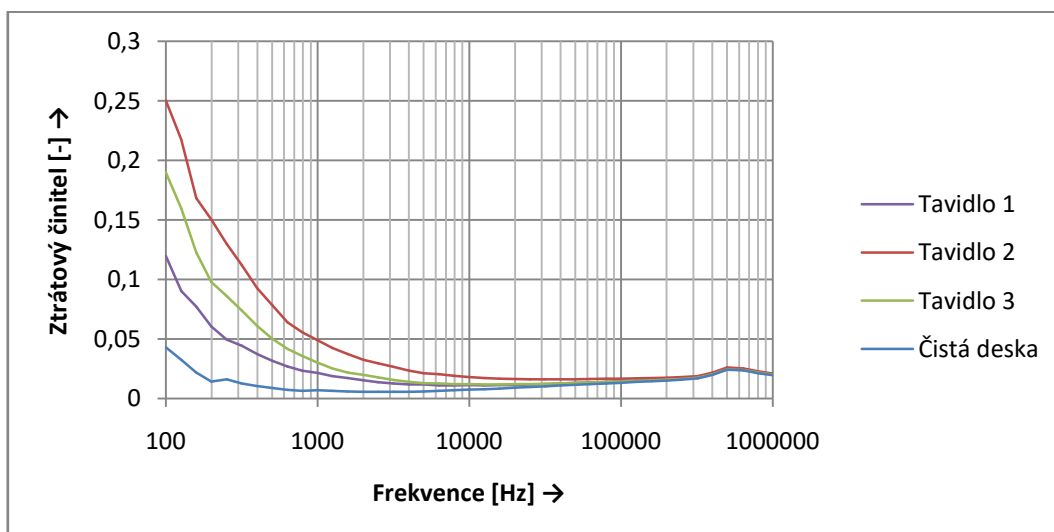
Graf 13 Frekvenční závislost kapacity - střední motiv po elektromigraci



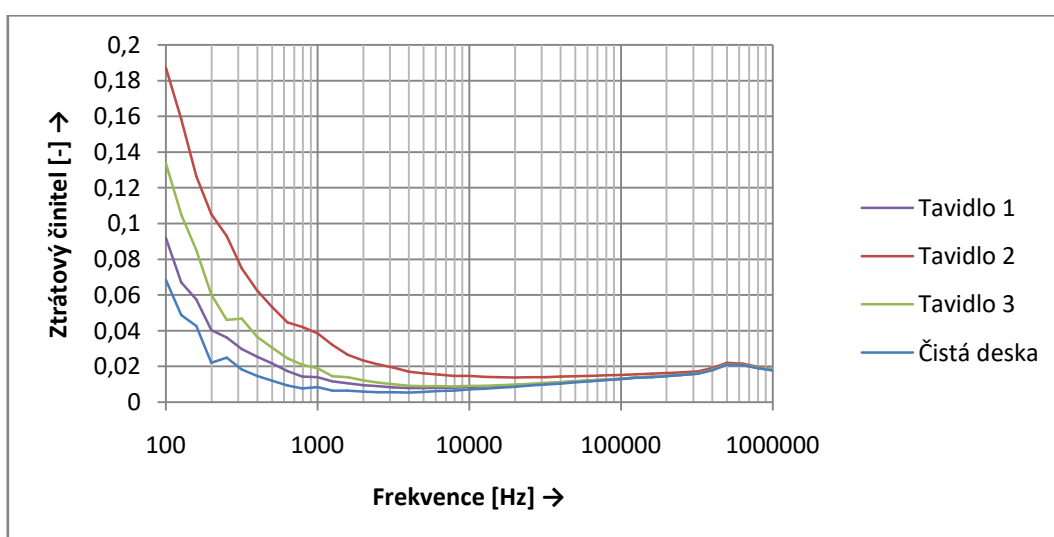
Graf 14 Frekvenční závislost kapacity - velký motiv po elektromigraci



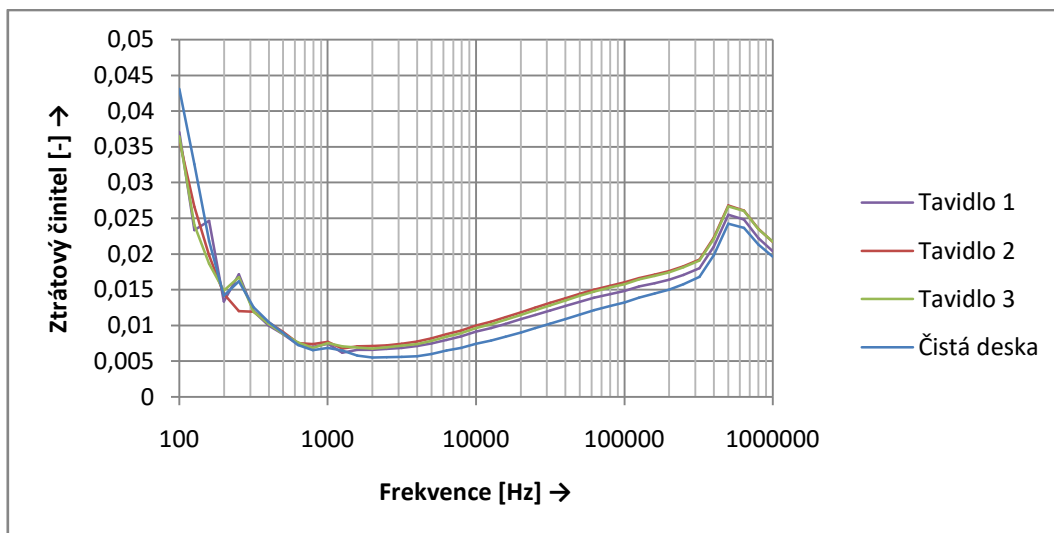
Graf 15 Frekvenční závislost ztrátového činitele - malý motiv



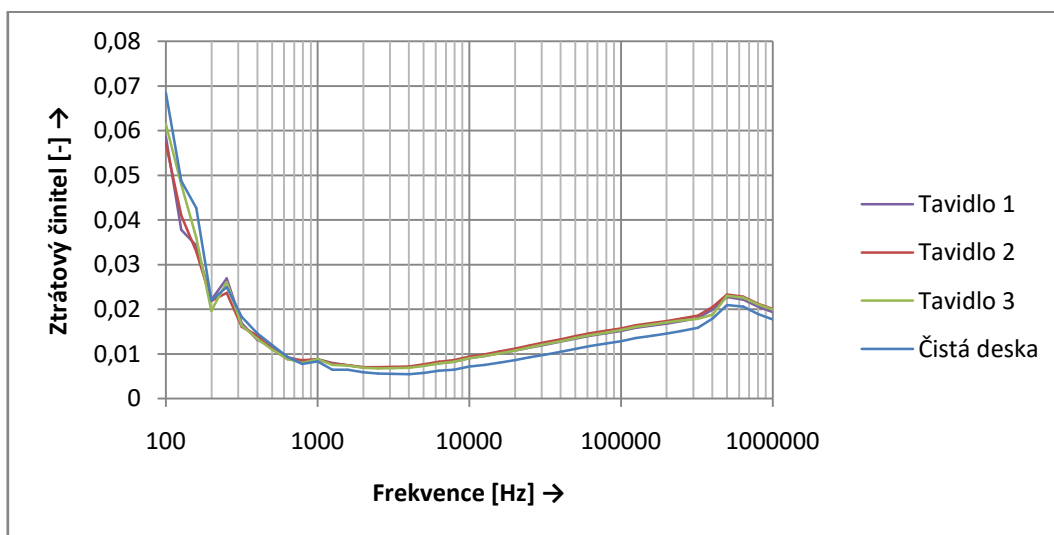
Graf 16 Frekvenční závislost ztrátového činitele - střední motiv



Graf 17 Frekvenční závislost ztrátového činitele - velký motiv



Graf 18 Frekvenční závislost ztrátového činitele - střední motiv po elektromigraci



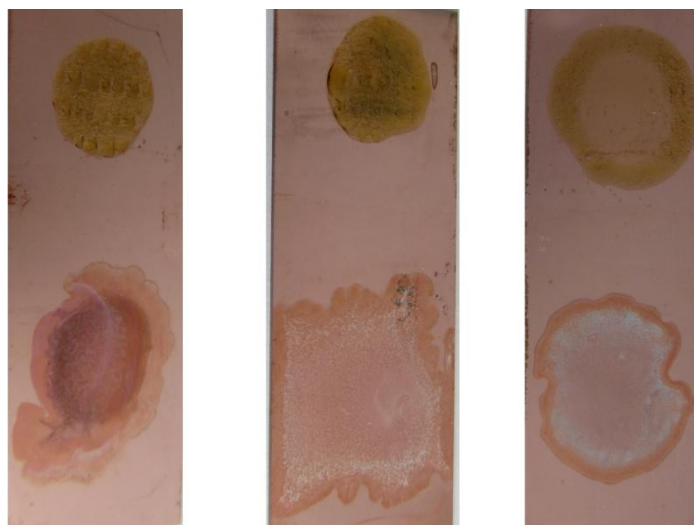
Graf 19 Frekvenční závislost ztrátového činitele - velký motiv po elektromigraci

Tavidlo 2 vykazovalo nejvyšší hodnoty kapacity jak po elektromigraci, tak v zasušeném stavu při nízkých kmitočtech. Celková kapacita je závislá na geometrických rozměrech vzorku a relativní permitivitě  $\epsilon_r$ . Relativní permitivitu ovlivňuje mnoho faktorů jako je teplota, tlak, ale hlavně polarizační mechanismy v dielektriku. Vyrovnané a velmi podobné průběhy měla tavidla 1 a 3. U všech tavidel i čistých desek byl pozorován nárůst ztrátového činitele při vysokých frekvencích. Nejvyšší hodnoty ztrátového činitele byly naměřeny pro tavidlo 2 při nižších kmitočtech, s navyšováním kmitočtu však tento rozdíl zanikl. Po elektromigraci byly rozdíly hodnot ztrátového činitele minimální.

## 5.10. Test na měděné zrcadlo

Pro ověření úrovně aktivace tavidla byl proveden test na měděné zrcadlo. Testování probíhalo dle normy IPC-TM-650. Celkem bylo použito 9 zrcadel s napařenou vrstvou mědi o tloušťce 50 nm, pro každé tavidlo 3 ks, aby se zamezilo zkreslení výsledků. Na každé zrcadlo bylo mikropipetou nanášeno 40  $\mu\text{l}$  testovaného tavidla a 40  $\mu\text{l}$  tavidla referenčního, kvůli vyřazení

chybně vyrobených zrcadel. Pokud by referenční tavidlo nevyhovovalo hodnocení L, musel by být test opakován. Jako referenční tavidlo byla zvolena kalafuna rozpuštěná v izopropylalkoholu. Takto připravená zrcátka putovala do klimatické komory, kde byla ponechána 24 hodin ve 23 °C a 50 % relativní vlhkosti.



Obr. 22 Copper mirror test (zleva tavidlo 1, tavidlo 2, tavidlo 3)

U všech tavidel bylo zpozorováno minimální poškození mědi, mohou tedy být klasifikována jako typ L. Dále u tavidla 2 byla pozorována nejlepší roztékavost, naopak nejhorší vykazalo tavidlo 1. Špatná roztékavost může být na škodu při pájení DPS s vyšší hustotou zástavby, tavidlo nemusí navzlínat do všech požadovaných míst.

## 6. Závěr

V bakalářské práci byla řešena problematika tavidel pro pájení vlnou, tavidlových zbytků a následné elektromigrace, která může elektrické obvody poškodit, i když nemusí být lehce odhalitelná.

V praktické části bylo sledováno chování jednotlivých tavidel při pájení vlnou na dvou typech desek plošných spojů z různých materiálů. V další části je vyhodnocené zjišťování ionizovatelných nečistot. Měření proběhlo po procesu pájení v přetavovací peci, po kterém tavidla vykazovala relativně nízkou míru znečištění a po izotermálním ohřevu, kde bylo, podle očekávání, znečištění mnohonásobně vyšší. U tavidla 1 na testované desce zůstalo po ohřevu podstatně vyšší množství nečistot. Tavidlo 3 mělo při testování nečistot nejlepší výsledky, naproti tomu při testování ve vlně se u něj objevilo největší množství chyb.

V dalším měření bylo přidáno probublávání desek v měřicím roztoku dusíkem a simulování znečištění desky jak před procesem pájení, tak desky zapájené vlnou. Tímto měřením bylo potvrzeno velké množství nečistot u tavidla 1 pouze v zasušeném stádiu. Část nečistot však při pájecím procesu zreagovala a odpařila se.

Hodnoty naměřené testováním konduktometrickými metodami spočívajícími ve výluhu nejsou až tak směrodatné, měřením zjistíme pouze kontaminaci celé desky proměřením roztoku. Nepřijdeme tak však na případnou vysokou koncentraci nečistot v dané oblasti DPS. Při testování v meniskografu byly naměřeny velmi podobné charakteristiky, žádné tavidlo se nevyznačovalo výrazně nižší smáčivostí.

Na vyrobených deskách byl proměřen povrchový izolační odpor s naneseným tavidlem a v průběhu elektromigrace. Výrazný vliv na hodnoty odporu měla navlhavost materiálu FR-4. Izolační odpor motivů byl nejvíce ovlivněn tavidlem 2, po vizuální stránce však nejhorší výsledky vykazovalo tavidlo 1.

Při měření kapacity a ztrátového činitele byly největší výchylky relativní permitivity  $\epsilon_r$  a ztrátového činitele  $\tan \delta$  zjištěny u tavidla 2, po elektromigraci však rozdíly již nebyly tak patrné.

Testováním na měděné zrcadlo byla ověřena agresivita tavidel. U všech tavidel došlo k minimálnímu poškození mědi, z hlediska aktivity jsou tavidla označena jako typ L. U tavidla 2 byla zpozorována nejlepší roztékavost, nejspíše díky nižšímu povrchovému napětí.

Na předloženou práci je možné navázat například testováním tavidel v ochranné dusíkové atmosféře, případně kombinací s různými konformními povlaky, jež mohou částečně potlačit vliv vlhkosti na elektromigraci na deskách plošných spojů.

## Použitá literatura

- [1] STARÝ, J., KAHLE, P., *Plošné spoje a povrchová montáž*, Vysoké učení technické v Brně, 2005, 208 stran
- [2] *Requirements for soldering fluxes: IPC J-STD-004B* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://www.ipc.org/TOC/IPC-J-STD-004B.pdf>
- [3] *Types of Solder flux* [online]. [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <https://www.lifewire.com/types-of-solder-flux-818849>
- [4] JACOBSON, David M. a GILES HUMPSTON. *Principles of soldering* [online]. 1. Materials Park, Ohio: ASM International, c2004, s. 245 [cit. 2016-12-14]. ISBN 0871707926. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=cQ6khQScBF4C&pg=PA116&dq=solder+flux+rosin&hl=cs#v=onepage&q&f=true>
- [5] RUŽA, Viliam. *Pájení*. Vyd. 2., uprav. a dopl. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988. 452 s.
- [6] *Foresite flux residues* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: [www.foresiteinc.com/resources/what-is-a-flux-residue](http://www.foresiteinc.com/resources/what-is-a-flux-residue)
- [7] *ECM, CAF and SIR testing* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: [http://www.corrosionclinic.com/corrosion\\_courses/electrochemical\\_migration\\_ECM\\_conductive\\_anodic\\_filament\\_CAF\\_surface\\_insulation\\_resistance\\_SIR\\_testing.htm](http://www.corrosionclinic.com/corrosion_courses/electrochemical_migration_ECM_conductive_anodic_filament_CAF_surface_insulation_resistance_SIR_testing.htm)
- [8] KRUMBEIN, S. J. *Metallic electromigration phenomena* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://www.te.com/documentation/whitepapers/pdf/p313-89.pdf>
- [9] BRADLEY GEDEN, *Understand and Avoid Electromigration(EM) & IR-drop in custom IP blocks* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.443.498&rep=rep1&type=pdf>
- [10] KIM, Vu. *Silver Migration – The Mechanism and Effects on Thick-Film Conductors* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.516.6359&rep=rep1&type=pdf>
- [11] *Wave soldering* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: [http://www.mtarr.co.uk/courses/topics/0225\\_wave/](http://www.mtarr.co.uk/courses/topics/0225_wave/)
- [12] STARÝ, J., ZATLOUKAL, M. *Montážní a propojovací technologie*. Brno: 2015. s. 1-272.
- [13] *Tin Whiskers* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: [http://www.sigcon.com/Pubs/news/10\\_01.htm](http://www.sigcon.com/Pubs/news/10_01.htm)
- [14] *Solvent Extract Conductivity (SEC) / Ionic Extraction Testing* [online]. National Physical Laboratory, Hampton Road, Teddington, Middlesex, 2009 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://www.npl.co.uk/science-technology/advanced-materials/materials-areas/electronics-interconnection/solvent-extract-conductivity>
- [15] *Practical Components: PCB-B-24* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://www.practicalcomponents.com/Cleaning-and-Conformal->

Coating/product.cfm?PCB-B-24-IPC/SMTA-Standard-Test-Board-F93D6B6213EE2E8E

- [16] *Metoda smáčekcích vah* [online]. 2010 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/pajeny-spoj-pajitelnost/metoda-smacecich-vah/>
- [17] *Kester Technical Datasheet: 979 Soldering flux* [online]. 2010 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: [http://www.kester.com/DesktopModules/Bring2mind/DMX/Download.aspx?Command=Core\\_Download&EntryId=656&language=en-US&PortalId=0&TabId=96](http://www.kester.com/DesktopModules/Bring2mind/DMX/Download.aspx?Command=Core_Download&EntryId=656&language=en-US&PortalId=0&TabId=96)
- [18] *AIM Solder Technical datasheet: NC277 liquid flux* [online]. 2010 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: [http://www.aimsolder.com/sites/default/files/nc277\\_voc-free\\_liquid\\_flux\\_tds.pdf](http://www.aimsolder.com/sites/default/files/nc277_voc-free_liquid_flux_tds.pdf)
- [19] *Wouters & Wouters: RE Instruments - IM6 Megohmmeter* [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.woutersenwouters.be/sold-products/1379/re-instruments---im6-megohmmeter>

## Seznam obrázků

Obr. 1 Schematické naznačení pájecí vlny [11] .....	9
Obr. 2 Složky tavidla [1] .....	9
Obr. 3 Snímek tabulky s rozdělením tavidel [2] .....	10
Obr. 4 Tavidlové zbytky po pájení .....	12
Obr. 5 Struktura dendritu [7] .....	13
Obr. 6 Elektromigrace stříbra na PC desce .....	14
Obr. 7 Cín-olovnatá elektromigrace v kapce DI vody .....	15
Obr. 8 Cínový whisker [13] .....	16
Obr. 9 Vyhodnocení kontaminace NaCl pomocí SEC [14] .....	17
Obr. 10 Motiv dle IPC-B-24 .....	18
Obr. 11 Meniskograf [16] .....	18
Obr. 12 Závislost smáčecí síly na čase [16] .....	19
Obr. 13 Spodní strana FR-4 desky před ručním doosazením .....	21
Obr. 14 Spodní strana CEM-1 desky před ručním doosazením .....	22
Obr. 15 Naměřený profil přetavovací pece .....	24
Obr. 16 Navržený motiv .....	30
Obr. 17 Hotová testovací deska .....	31
Obr. 18 Megohmmetr IM6 [19] .....	31
Obr. 19 Desky umístěné v klimatické komoře a napájecí deska .....	32
Obr. 20 Snímky středních motivů po stárnutí (zleva čistá deska, tavidlo 1, tavidlo 2, tavidlo 3) .....	34
Obr. 21 Snímek pracoviště pro měření C a tg $\delta$ .....	34
Obr. 22 Copper mirror test (zleva tavidlo 1, tavidlo 2, tavidlo 3) .....	40

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání specifikací tavidla .....	21
Tabulka 2 Parametry vlny pro FR-4 desku .....	22
Tabulka 3 Parametry vlny pro desku CEM-1 .....	22
Tabulka 4 Hodnoty naměřené konduktometrickou metodou - tavidlo 1.....	25
Tabulka 5 Hodnoty naměřené konduktometrickou metodou - tavidlo 2.....	25
Tabulka 6 Hodnoty naměřené konduktometrickou metodou - tavidlo 3.....	25
Tabulka 7 Hodnoty pro desky se zasušeným tavidlem .....	26
Tabulka 8 Hodnoty pro desky zapájené vlnou .....	27
Tabulka 9 Vypočtené hodnoty sil a výsledných poměrů .....	29
Tabulka 10: Průměrné hodnoty SIR jednotlivých motivů.....	32
Tabulka 11 Hodnoty C a $\text{tg } \delta$ na malém motivu .....	35
Tabulka 12 Hodnoty C a $\text{tg } \delta$ na středním motivu .....	35
Tabulka 13 Hodnoty C a $\text{tg } \delta$ na velkém motivu .....	35
Tabulka 14 Hodnoty C a $\text{tg } \delta$ na středním motivu po elektromigraci.....	35
Tabulka 15 Hodnoty C a $\text{tg } \delta$ na velkém motivu po elektromigraci .....	36

## Seznam grafů

Graf 1 Chyby na CEM-1 deskách po zapájení vlnou.....	23
Graf 2 Chyby na FR-4 deskách po zapájení vlnou.....	23
Graf 3 Porovnání míry kontaminace desky.....	27
Graf 4 Porovnání množství nečistot v sušině.....	27
Graf 5 Smáčivost tavidel v pájce SAC305.....	28
Graf 6 Smáčivost tavidel v pájce SN100C.....	29
Graf 7 Smáčivost tavidel v pájce Sn63Pb37.....	29
Graf 8 Hodnoty povrchového izolačního odporu pro velký motiv.....	33
Graf 9 Hodnoty povrchového izolačního odporu pro střední motiv.....	33
Graf 10 Frekvenční závislost kapacity - malý motiv.....	36
Graf 11 Frekvenční závislost kapacity - střední motiv.....	36
Graf 12 Frekvenční závislost kapacity - velký motiv.....	37
Graf 13 Frekvenční závislost kapacity - střední motiv po elektromigraci.....	37
Graf 14 Frekvenční závislost kapacity - velký motiv po elektromigraci.....	37
Graf 15 Frekvenční závislost ztrátového činitele - malý motiv.....	38
Graf 16 Frekvenční závislost ztrátového činitele - střední motiv.....	38
Graf 17 Frekvenční závislost ztrátového činitele - velký motiv.....	38
Graf 18 Frekvenční závislost ztrátového činitele - střední motiv po elektromigraci.....	39
Graf 19 Frekvenční závislost ztrátového činitele - velký motiv po elektromigraci.....	39

## Seznam použitých zkratek

SMD	Surface mounted devices
DPS	Deska plošných spojů
VOC	Volatile organic compound
MTTF	Mean time to failure
MGRS	Migrated gold resistive shorts
DI voda	Deionizovaná voda
ROSE	Resistivity of solvent extract
SEC	Solvent extract conductivity
SIR	Surface insulation resistance
SOIC	Small outline integrated circuit
IPA	Izopropylalkohol
TDS	Technical datasheet
RH	Relative humidity