

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

KONTROLA KVALITY PÁJENÉHO SPOJE A DESIGN OF  
EXPERIMENTS U STROJNÍHO PÁJENÍ VLNOU

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. LENKA SMELIKOVÁ

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

# KONTROLA KVALITY PÁJENÉHO SPOJE A DESIGN OF EXPERIMENTS U STROJNÍHO PÁJENÍ VLNOU

SOLDER JOINT QUALITY CONTROL AND DESIGN OF EXPERIMENTS IN WAVE SOLDERING

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. LENKA SMELIKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ STARÝ, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechniky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektrotechnická výroba a management**

**Studentka:** Bc. Lenka Smeliková

**Ročník:** 2

**ID:** 111136

**Akademický rok:** 2013/2014

## NÁZEV TÉMATU:

**Kontrola kvality pájeného spoje a Design of Experiments u strojního pájení vlnou**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte odbornou literaturu a normy z oblasti kvality pájeného spoje a Design of Experiments (DOE).  
Zpracujte metodiku pro kontrolu kvality u strojního pájení vlnou.  
Prakticky aplikujte DOE na strojní pájení vlnou vybraného produktu.  
Navrhněte obecný postup pro aplikaci DOE na nový produkt i pro optimalizaci parametrů stávající produkce.

Spolupráce s firmou Honeywell Brno.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 10. 2. 2014

**Termín odevzdání:** 29. 5. 2014

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

**Konzultanti semestrální práce:** Ing. Zdeněk Jurčík, Honeywell Brno

**doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.**

*Předseda odborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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**

Tato diplomová práce se zabývá problematikou strojního pájení vlnou a aplikací metody Design of Experiments na nový produkt firmy. Shrnuje základní poznatky z technologie pájení, pájecích slitin a metody Design of Experiments. Metoda Design of Experiments byla aplikována na produkt při strojním pájení vlnou k nalezení jejího optimálního nastavení.

## **Abstract**

This master's thesis deals with problems of wave soldering and application methods Design of Experiments for the new product production. Summarizes the basic knowledge of soldering technology, of solder alloys and Design of Experiments methods. Design of Experiments method has been applied to product to find the optimal for wave soldering setting.

## **Klíčová slova**

Bezolovnatá pájecí slitina, DOE, IPC-A-610E, kontrola kvality, strojní pájení vlnou, metodika

## **Key words**

Lead-free solder alloy, DOE, IPC-A-610E, quality control, wave soldering, methodics

SMELIKOVÁ, L. *Kontrola kvality pájeného spoje a Design of Experiments u strojního pájení vlnou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 75 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Kontrola kvality pájeného spoje a Design of Experiments u strojního pájení vlnou“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího semestrální 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č.140/1961 Sb.

Město .....

.....

(podpis autora)

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za účinnou odbornou pomoc, vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Také bych ráda poděkovala firmě Honeywell, za umožnění zpracovávat tuto práci v jejich výrobě a panu Ing. Zdeňku Jurčíkovi za odbornou pomoc. Dále panu doc. Ing. Pavlu Machovi, CSc. a slečně Ing. Seba Barto za odbornou pomoc a konzultaci.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# Obsah

ÚVOD .....	9
1. TEORETICKÁ ČÁST .....	10
1.1. Pájení a pájený spoj .....	10
1.1.1. Pájecí slitiny .....	10
1.1.1.1 Olovnaté pájecí slitiny .....	11
1.1.1.2 Bezolovnaté pájecí slitiny .....	11
1.1.1.3 Ochranná atmosféra .....	13
1.1.2. Tavidla .....	14
1.1.3. Pájení vlnou a další technologie pájení .....	15
1.1.3.1 Technologie pájení vlnou „ <i>Flow Soldering</i> “ nebo „ <i>Wave Soldering</i> “ .....	15
1.1.3.2 Teplotní profil .....	18
1.1.4. Kontrola kvality .....	18
1.2. Metoda plánovaných experimentů – DOE .....	20
1.2.1. Základní pojmy u DOE .....	21
1.2.2. Jednoduché návrhy experimentů .....	23
1.2.2.1 Návrh experimentu na dvou úrovních .....	24
1.2.2.2 Návrh experimentu na třech úrovních .....	24
1.2.3. Experimentální procedura .....	25
1.2.4. Experimenty s interakcemi .....	26
1.2.5. Smíšené úrovně faktorů .....	27
1.2.5.1 Zvýšení počtu úrovní ve sloupci .....	27
1.2.5.2 Snížení počtu úrovní ve sloupci .....	27
1.2.6. Robustní návrh .....	28
1.2.7. Analýza experimentálních dat .....	30
2. METODIKA PRO KONTROLU KVALITY U STROJNÍHO PÁJENÍ VLNOU .....	31
2.1. Zásady ESD .....	31
2.2. Manipulace s deskou .....	32
2.3. Vizuální kontrola desky – pájení .....	33
2.4. Vizuální kontrola desky – osazení .....	38
2.5. Vizuální kontrola desky – součástky .....	42
3. PRAKTICKÁ ČÁST DESIGN OF EXPERIMENTS .....	44
3.1. Plánování experimentu na vybraný typ DPS .....	45

3.2.	Návrh experimentu na vybraný typ DPS .....	46
3.3.	Provedení experimentu na vybraném typu DPS .....	47
3.3.1.	Postup provedení experimentu .....	47
3.3.2.	Vyhodnocení experimentu .....	48
3.4.	Analýza experimentu na vybraný typ DPS .....	51
3.4.1.	Procentuální účinky jednotlivých faktorů podle Taguchiho metody .....	51
3.4.2.	Analýza ANOVA .....	55
3.5.	Ověřovací testy .....	58
3.5.1.	Měření tavidla .....	58
3.5.2.	Ionizovatelné nečistoty .....	60
3.5.3.	Měření teploty .....	61
3.6.	Diskuze k DOE na vybraný typ DPS .....	63
4.	METODIKA ŘEŠENÍ .....	65
4.1.	Plánování experimentu .....	65
4.2.	Navrhování experimentu .....	66
4.3.	Provedení experimentu .....	66
4.4.	Analýza experimentu .....	67
5.	ZÁVĚR .....	73

## Seznam obrázků

Obr. 1.: Nástřik tavidla na desku u strojního pájení vlnou.....	16
Obr. 2.: Dvojitá vlna [9] .....	17
Obr. 3.: Ishikawa diagram pro kontrolu kvality u strojního pájení vlnou .....	17
Obr. 4.: Teplotní profil dvojité vlny [9] .....	18
Obr. 5.: Schéma s doporučenými místy kontroly v technologickém toku výroby desek [9] ...	19
Obr. 6.: Kontrolní tester na ESD [13] .....	31
Obr. 7.: Označení prostoru ESD [14].....	31
Obr. 8.: Pracoviště zabezpečené proti ESD.....	32
Obr. 9.: ESD obuv a pásek do bot.....	32
Obr. 10.: ESD rukavice a náramek.....	32
Obr. 11.: Správné držení desky plošných spojů [10] .....	32
Obr. 12.: Správně navzlínaná pájka na vývodu součástky .....	33
Obr. 13.: Porovnání bublinek v pájce.....	33
Obr. 14.: Nedokonalé přetavení pájecí pasty [10].....	33
Obr. 15.: Nesmáčení [10] .....	33
Obr. 16.: Odsmačení [10].....	34
Obr. 17.: Praporky [10] .....	34
Obr. 18.: Ukázka nadměrného množství pájky [10] .....	34
Obr. 19.: Trhlina v pájce [10].....	34
Obr. 20.: Narušené tuhnutí [10] .....	35
Obr. 21.: Nepokovené otvory a nadměrné množství pájky.....	35
Obr. 22.: Zaplnění otvoru nesmí být menší než na obr. [10] .....	35
Obr. 23.: Pájka v ohybu vývodu – nesmí nastat [10] .....	35
Obr. 24.: Boční přesah je větší – nesmí nastat .....	36
Obr. 25.: Vývod přesahuje plošku – nesmí nastat.....	36
Obr. 26.: Nedostatečné koncové překrytí – nesmí nastat.....	36
Obr. 27.: Pájka přesahuje součástku – nesmí nastat.....	36
Obr. 28.: Tombstoning [10].....	36
Obr. 29.: Příklady závad u spoje na tupo .....	37
Obr. 30.: Příklady co nesmí nastat .....	37
Obr. 31.: Špatné zapojení součástek.....	38
Obr. 32.: Špatně osazená součástka .....	38
Obr. 33.: Vývody křížující vodiče [10] .....	38
Obr. 34.: Příklad špatného tvarování vývodů [10].....	39
Obr. 35.: Příklad horizontální montáže .....	39
Obr. 36.: Nakloněné konektory [10] .....	39
Obr. 37.: Správné přichycení součástky.....	40
Obr. 38.: Špatné přichycení součástky .....	40
Obr. 39.: Úchytka nedrží celou součástku.....	40
Obr. 40.: Hodně použitého adheziva.....	40
Obr. 41.: Adhezivum pod vývodem součástky – nesmí nastat [10].....	40
Obr. 42.: Horizontální součástky.....	41



Obr. 43.: Vertikální součástky.....	41
Obr. 44.: Zahnutí vývodu součástky .....	41
Obr. 45.: Naklonění součástky [10] .....	42
Obr. 46.: Ztráta pokovení [10] .....	42
Obr. 47.: Vyštípnutí – nesmí nastat [10] .....	42
Obr. 48.: Příklady vyštípnutí (nahore) a praskliny (dole) [10].....	42
Obr. 49.: Příklady vyštípnutí – nesmí nastat [10] .....	43
Obr. 50.: Příklad poškození konektoru [10].....	43
Obr. 51.: Znázornění výskytu častých chyb na DPS: a) primární strana, b) sekundární strana	46
Obr. 52.: a) 2D scanner, b) ukázka 2D kódů vytvořených pro měření .....	47
Obr. 53.: Oblast vad na switchi a jeho propojení správné, špatné a tolerované.....	49
Obr. 54.: Oblast vad na trimru a špatné propájení .....	49
Obr. 55.: Oblast pravidelného výskytu zkratu na 6 – ti pinovém konektoru .....	50
Obr. 56.: Součástka X7 – správné propájení .....	50
Obr. 57.: Fóliový kondenzátor .....	51
Obr. 58.: Příklad grafu procentuálního účinku jednotlivých faktorů .....	53
Obr. 59.: Teplotní profil pro nastavení předehřevu na 0%.....	62
Obr. 60.: Teplotní profil pro nastavení předehřevu na 30%.....	62
Obr. 61.: Teplotní profil pro nastavení předehřevu na 60%.....	63
Obr. 62.: Kvádr omezujících podmínek faktorů .....	72

## Seznam tabulek

Tab. 1.: Některé bezolovnaté slitiny a jejich výrobce [3][4][5][6][7][8] .....	12
Tab. 2.: Klasifikace tavidel pro měkké pájení dle ČSN EN ISO 29454-1 [2],[9].....	14
Tab. 3.: Ortogonální soustava L-4 [11] .....	23
Tab. 4.: Ortogonální soustava L-9 [11] .....	25
Tab. 5.: Nastavení strojní vlny ERSA .....	44
Tab. 6.: Faktory, jejich úrovně a nastavení hodnot .....	45
Tab. 7.: Návrh experimentu L-9 .....	46
Tab. 8.: Nastavení hodnot jednotlivých experimentů .....	48
Tab. 9.: Ukázka tabulky se sesbíranými daty .....	48
Tab. 10.: Počet jednotlivých chyb u experimentu .....	52
Tab. 11.: Výsledky procentuálních účinků jednotlivých faktorů .....	54
Tab. 12.: Upravený experiment a hodnoty pro výpočet analýzy ANOVA .....	55
Tab. 13.: Pomocné výpočty podle vzorců (15) - (18) .....	57
Tab. 14.: Analýza ANOVA .....	57
Tab. 15.: Hodnoty k porovnání vypočteného F-kritéria a statistických tabulek .....	58
Tab. 16.: Podmínky měření a pomocné hodnoty pro výpočty .....	58
Tab. 17.: Naměřené a vypočtené hodnoty měření tavidla .....	59
Tab. 18.: Naměřené a vypočítané hodnoty ionizovatelných nečistot .....	61
Tab. 19.: Doporučení pro nastavení .....	64
Tab. 20.: Naplánovaný experiment: faktor, úroveň, nastavení .....	65
Tab. 21.: Návrh experimentu .....	66
Tab. 22.: Nastavení hodnot jednotlivých experimentů .....	66
Tab. 23.: Základní schéma experimentů .....	67
Tab. 24.: Znaménková tabulka .....	68

## ÚVOD

Jeden z hlavních důvodů napsání této práce je fakt, že každá firma v oblasti technologie pájení se snaží mít za cíl, optimalizovat výrobu, zvyšovat kvalitu a zároveň snižovat náklady na výrobu. Tato práce by mohla být návodem pro firmy, které se snaží těchto cílů dosáhnout.

Jako další důvod může být, že od roku 2006 se musí přecházet ve výrobě z olovnatých pájecích slitin na bezolovnaté, což způsobuje ve firmách řadu problémů. Např. zjistit jaké používat tavidlo nebo druh bezolovnaté pájecí slitiny, ale zejména ten, že kvalita pájeného spoje na bezolovnaté pájce není taková jako na olovnaté při stejném nastavení. Dojít ke správnému nastavení ať už pájecí vlny, přehřevu nebo množství tavidla může být zdlouhavé, proto se třeba v zahraničí používá jako nástroj k optimalizaci takovéto výroby metoda DOE.

Cílem této diplomové práce je proto nastudovat odbornou literaturu k pájení vlnou, materiálům pro pájení a k DOE. Dále se seznámit s požadavky na kontrolu kvality dle požadavků firmy Honeywell i s normami k technologiím pájení. Metodu DOE poté aplikovat na výrobu desky, pro optimalizaci výroby.

# 1. TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1. Pájení a pájený spoj

Pájení je proces, při kterém dochází ke spojování dvou kovových materiálů pomocí pájky a zpravidla za přítomnosti tavidla. Při pájení dochází k účinkům adhezních a kohezních sil, a to v okamžiku spojování kovů a roztavené pájky, kdy se atomy dostávají do malých vzdáleností. Při pájení dochází také k difúzi a rozpouštění některých prvků pájky i spojovaných materiálů. Na rozhraní tak vzniká tzv. intermetalická oblast se specifickými vlastnostmi. [1]

K pájení je potřeba procesní technologie, metalurgie, termodynamických vlastností a chemie tekutého média. [1]

Pájený spoj by měl být mechanicky pevný a dlouhodobě spolehlivý. Lze toho dosáhnout vhodnými kombinacemi materiálového, procesního a environmentálního systému. Mezi materiálové kombinace patří povrchové úpravy pájených povrchů, tavidla a pájky. Mezi procesní systém zase teplota, doba, gradienty nárůstu a poklesu teploty. A do environmentálního systému patří volba mezi vzduchem, řízením atmosféry nebo vakuem. [1]

Požadavky, na kvalitní pájený spoj ve výrobě, jsou dány normami. Jednou z používaných norem je IPC-A-610E CZ „*Kritéria přijatelnosti elektronických sestav*“, další je ČSN EN 61192 „*Požadavky na provedení zapájených elektronických sestav*“ a je jich více.

### 1.1.1. Pájecí slitiny

Pájky neboli pájecí slitiny jsou slitiny vhodných kovů, které se používají na spojení pájených materiálů. Pájecí slitina musí zajistit mechanickou fixaci součástky na desce plošných spojů (dále jen DPS), elektrické propojení, odvod ztrátového tepla a funkci povrchové úpravy, což je ochrana povrchu před oxidací a zlepšení pájitelnosti.

Volba pájecí slitiny je důležitá, jak pro spolehlivost spojů, tak pro mnoho dalších parametrů. Mezi ně patří: teplotní rozsah, znalost teplotního průběhu křivky „*Solidus-liquidus*“, stav pájeného povrchu, kvalita pájeného spoje, lesklost spoje, spolehlivost a pevnost spoje, tvorba prasklin v pájeném spoji, opravitelnost, opracovatelnost a v neposlední řadě smáčivost.

Pájecí slitiny se dají rozdělit do několika skupin. V první řadě se jedná a rozlišení pájecích slitin na olovnaté a bezolovnaté pájky. Další rozdělení je podle formy slitin, ve které jsou pájky k dostání.

#### **1.1.1.1 Olovnaté pájecí slitiny**

Olovnaté pájecí slitiny se skládají z podílů cínu a olova. Nejčastěji se používá slitina, kdy cínu bývá v rozmezí 60 – 63 % a olova 40 – 37 %. Teplota tavení této pájky je poměrně nízká 183 – 189°C, proto neohrožuje teplotu součástky ani desku. Cín, který obsahuje, má velmi dobré smáčecí schopnosti a oxidy cínu lze odstranit méně agresivními tavidly. [1]

Tato pájka byla v minulosti používaná pro své dobré fyzikální a chemické vlastnosti, vyhovující spolehlivost i cenu. Pro svoji toxicitu je ale od roku 2006 její používání v elektronice zakázáno, proto musí být nahrazena bezolovnatými pájecími slitinami. Firmy tak musí přecházet na bezolovnaté pájecí slitiny, ale jsou uděleny i výjimky pro používání olovnatých pájecích slitin, protože u některých výrobců pro jejich umístění a používání je použití olovnatých pájecích slitin nutné.

#### **1.1.1.2 Bezolovnaté pájecí slitiny**

Bezolovnaté pájky se vyznačují většinou vyšší teplotou tavení, to platí o nejrozšířenější slitině SnAg resp. SnAgCu označované běžně jako SAC. Pájení probíhá v rozsahu teplot 230-260°C. Bezolovnaté pájky jsou reaktivnější než pájky olovnaté, takže samotná tvorba spoje probíhá v kratším čase, než je tomu u pájek olovnatých. [2]

##### Bezolovnatá pájecí slitina: SAC305

SAC305 je jenom označení pro slitinu kovů cínu, stříbra a mědi. Její složení je SnAg3,0Cu0,5, teplota tavení je přibližně 219°C a měrná hmotnost je 7,5 g/cm<sup>3</sup>. Tato slitina byla testována podle IPC a rozšířená jako standard. Využívá se při strojním pájení vlnou.

##### Bezolovnatá pájecí slitina: SN100C.

SN100C je jenom označení pro slitinu kovů cínu, mědi, niklu a germania. Její složení je SnCu0,7NiGe, teplota tavení je 227°C a měrná hmotnost je 7,4 g/cm<sup>3</sup>. Vytváří světlé a lesklé pájené spoje, vzhledově i tekutostí je srovnatelná s olovnatou pájkou. Hodně se využívá u strojního pájení vlnou.

**Tab. 1.: Některé bezolovnaté slitiny a jejich výrobce [3][4][5][6][7][8]**

NEJZNÁMĚJŠÍ BEZOLOVNATÉ PÁJECÍ SLITINY			
Označení	Složení	Teplota tavení [°C]	Výrobce
SAC305 nebo (SN97C, M705)	SnAg3,0Cu0,5	217-220	- AIM - ALPHA - BALVER ZINN - KESTER - KOVOHUTĚ PŘÍBRAM - SMCI
SN100C	SnCu0,7NiGe	227	- AIM - BALVER ZINN - KESTER
DALŠÍ SLITINY - OBSAHUJÍCÍ CÍN "Sn"			
Označení	Složení	Teplota tavení [°C]	Výrobce
-	In52Sn48	118	- AIM
-	SnBi57Ag1,0	138	- AIM
L20	SnBi58	138-141	- AIM - SMCI
L23	SnBi57Ag1,0	138-204	- SMCI
-	SnZn9,0	199	- AIM
-	SnZn30	200-320	- KOVOHUTĚ PŘÍBRAM
iSAC105	SnAg1,0Cu0,5CoGe	217	- BALVER ZINN
iSAC205	SnAg2,0Cu0,5CoGe	217	- BALVER ZINN
iSAC305	SnAg3,0Cu0,5CoGe	217	- BALVER ZINN
iSAC387	SnAg3,8Cu0,7CoGe	217	- BALVER ZINN
CASTIN	SnAg2,5Cu0,8Sb0,5	217	- AIM
SCAN-Ge 053	SnCu0,5Ag3,0NiGe	217-219	- BALVER ZINN
M771	SnAg1,0Cu0,7	217-224	- SMCI
SAC387 nebo (SN96C, M714)	SnAg3,8Cu0,7	217-225	- AIM - BALVER ZINN - KOVOHUTĚ PŘÍBRAM - SMCI
M715	SnG3,9Cu0,6	217-226	- SMCI
SAC+0107	SnAg0,1Cu0,7	217-228	- AIM
SAC+0307 nebo M35	SnAg0,3Cu0,7	217-228	- AIM - KOVOHUTĚ PŘÍBRAM - SMCI
SCAN-Ge0703	SnAg0,3Cu0,7NiGe	217-228	- BALVER ZINN
SAC405 nebo M710	SnAg4,0Cu0,5	217-229	- AIM - ALPHA - SMCI
M711	SnAg0,5Cu4,0	217-344	- SMCI
M709	SnAg0,5Cu6,0	217-378	- SMCI
M31	SnAg3,5	218-219	- SMCI
SN96Ce	SnAg3,8	221	- BALVER ZINN
-	SnAg4,0	221	- KOVOHUTĚ PŘÍBRAM

M30	SnAg3,5	221-223	- AIM - SMCI
SN97Ce nebo SN97AG3	SnAg3,0	221-224	- BALVER ZINN - KESTER - KOVOHUTĚ PŘÍBRAM
M731	SnAg3,9Cu0,6Sb3,0	221-226	- SMCI
-	SnAg5,0	221-240	- AIM
-	SnAg25Sb10	223-236	- AIM
K100LD	SnCu0,7	227	- AIM - KESTER - KOVOHUTĚ PŘÍBRAM
M24AP	SnCu0,6NiPGe	227-228	- SMCI
M20	SnCu0,75	227-229	- SMCI
-	SnCu3,0	227-310	- AIM - KOVOHUTĚ PŘÍBRAM
M24MT	SnCu0,7NiPGe	228-230	- SMCI
M760	SnCu5,0Ni0,15	228-365	- SMCI
-	SnSb3,0	232-238	- AIM
M10	SnSb5,0	232-243	- AIM - SMCI
M14	SnSb10	245-266	- SMCI
	Au80Sn20	281	- AIM
<b>DALŠÍ SLITINY - BEZ POUŽITÍ CÍNU</b>			
Označení	Složení	Teplota tavení [°C]	Výrobce
-	In97Ag3	143	- AIM
-	Bi95Ag5,0	262,5	- AIM
-	Bi95Sb5,0	308	- AIM
-	Au88Ge12	356	- AIM

Typů bezolovnatých pájecích slitin je více než jenom SAC305 a SN100C. V tabulce (Tab. 1.) jsou uvedeny další druhy (jenom ve formě tyčové pájky určené pro strojní pájení vlnou) a lze v ní nalézt i výrobce uvedených pájek. Jde o známé výrobce těchto slitin do elektrotechnické výroby. Z českých firem je to např. firma „Kovohutě Příbram nástupnická a.s.“, ze zahraničních firem např. BALVER ZINN, KESTER, ALPHA, AIM (AIM Metals & Alloys LP) a SMIC (Senju Metal Industry Co., Ltd). Firma ALPHA má ve své nabídce i své patentované bezolovnaté slitiny s označením „SACX“.

#### 1.1.1.3 Ochranná atmosféra

Ochranná (inertní) atmosféra se používá při pájení z důvodu lepší spolehlivosti pájeného spoje. Pájení probíhá většinou na vzduchu a tedy v oxidačním prostředí, který ovlivňuje celý proces. Použití ochranné atmosféry v procesu pájení přináší výhody, jako je snížení nákladů na údržbu a spotřeby pájky, ochrana před povrchovou oxidací pájených povrchů i pájky (lepší smáčivost) a snížení povrchového napětí na povrchu pájky (lepší

roztékavost). Další výhodou je použití bezoplachových tavidel a tavidel se sníženým obsahem pevné fáze. Nevýhodou použití ochranné atmosféry při pájení je vysoká cena zařízení a spotřeba použitých plynů.

Pro vytvoření ochranné atmosféry se používají inertní plyny, nejčastěji dusík. Ale používá se i argon, vodík nebo směsi těchto plynů. [2][9]

### 1.1.2. Tavidla

Tavidlo „*Flux*“ je látka, která podporuje smáčivost pájeného materiálu pájkou. Pomáhá odstranit z povrchu pájeného materiálu oxidy, nečistoty a chrání tento materiál proti oxidaci.

Mezi funkce tavidla patří chemická, fyzikální a tepelná funkce. Chemická funkce tavidla spočívá v tom, že za působení tepla reaguje s oxidy a nečistotami na spojovacím povrchu i pájce a brání reoxidaci povrchu. Tavidlo zvyšuje povrchovou energii spojovaných materiálů a zlepšuje tak fyzikální i chemické smáčení povrchu roztavenou pájkou a roztékání pájky po povrchu. Fyzikální funkce tavidla je, že za pomoci tepla odstraňuje reakční produkty z pájeného povrchu a umožňuje pájce se dostat do pracovní vzdálenosti s kovovými povrchy. Tepelná funkce tavidla zlepšuje přenos tepla od tepelného zdroje k pájenému místu. [9]

Tavidlo se skládá z tavidlového nosiče, aktivátoru, aditiva a rozpouštědla. Rozpouštědla jsou na organické bázi „VOC“ (*Volatile Organic Compounds*), obsahují alkohol, nebo na anorganické bázi „VOC FREE“, která jsou bezalkoholová. Mezi aditiva patří rheologické modifikátory (pájecí pasty), stabilizátory pěny (pájení vlnou) a antishlukovací činidla (pájení vlnou). [9]

**Tab. 2.:** Klasifikace tavidel pro měkké pájení dle ČSN EN ISO 29454-1 [2],[9]

Typ tavidla	Základní složka tavidla	Aktivátor tavidla	Forma tavidla
1. pryskyřice	1. kalafuna (přírodní pryskyřice) 2. bez kalafuny syntetická pryskyřice	1. bez aktivátoru 2. aktivováno halogenidy 3. aktivováno bez halogenidů	A. kapalné B. pevné C. pasta
2. organické	1. vodou rozpustné 2. vodou nerozpustné		
3. anorganické	1. soli	1. chlorid amonný 2. bez chloridu amonného	
	2. kyseliny	1. kyselina fosforečná 2. jiné kyseliny	
	3. alkálie (zásady)	1. aminy a/nebo amoniaky	



Nejznámější typ tavidla a zároveň i nejstarší je kalafuna. Ta je na bázi přírodní pryskyřice. Potom existují tavidla organická a anorganická. Tato tavidla, organická, anorganická i pryskyřicová, se poté dále ještě dělí. Toto rozdělení udává např. norma ČSN EN ISO 29454-1 (Tab. 2.).

Při výběru tavidla je základním požadavkem zajistit spolehlivý pájecí proces s reprodukovatelnou kvalitou pájených spojů a s minimálním zbytkovým obsahem hydroskopických a ionizovatelných nečistot po pájení. Ale volíme vhodný typ i s ohledem na způsob nanášení, snadnou odstranitelnost zbytků po pájení a testování. [9]

Trendem v tavidlech je používání bezoplachových tavidel „NO CLEAN“ což má ekonomické důvody, používání VOC FREE nebo nízké VOC z čehož plynou ekologické důvody a aby měla tavidla nízký obsah sušiny „*Low Residue of Solid*“ což má za následek kosmetické i funkční důvody. [9]

Mezi známé výrobce tavidel patří, stejně jak u pájecích slitin, např. KESTER, ALPHA, AIM a BALVER ZINN – COBAR.

### **1.1.3. Pájení vlnou a další technologie pájení**

Základní druhy pájení se dají rozdělit na tři typy, a to pájení přetavením, strojní pájení vlnou a ruční pájení.

K pájení přetavením se používá pájecí pasta, která obsahuje kromě pájecí směsi i tavidlo. Pájení přetavením se používá v kombinaci se strojním pájením vlnou, samostatně, ale jen pro desky s SMD (*Surface Mount Device*) součástkami anebo pro opravy.

Strojní pájení vlnou je jeden z nejužívanějších druhů hromadného pájení. Z důvodu energetické náročnosti i technologických omezení je v mnohých aplikacích nahrazováno selektivním pájením. Strojní pájení vlnou je popsáno níže.

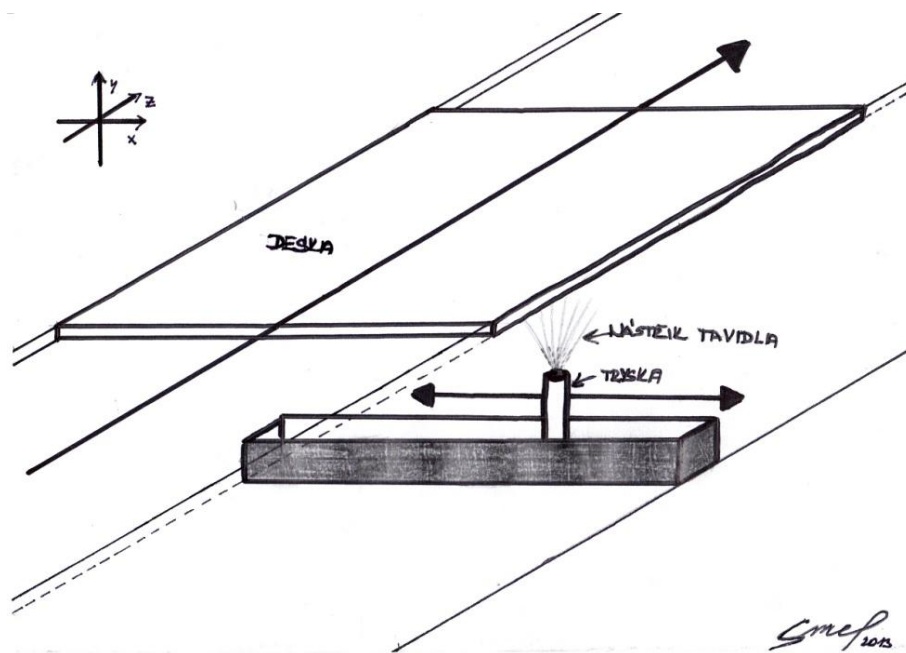
Ruční pájení se spíše používá jen pro opravy, pro prototyp desky nebo na některé speciální součástky.

#### **1.1.3.1 Technologie pájení vlnou „*Flow Soldering*“ nebo „*Wave Soldering*“**

Jeho předností je vysoký stupeň automatizace umožňující vytvářet velký počet spojů v relativně konstantních podmínkách. Osazené desky jsou uloženy na pásový dopravník většinou řešený s pomocí rámečků posouvaných řetězovým pohonem. Tak je zajištěn plynulý

průchod desek přes zařízení pro pájení vlnou. Zařízení tvoří čtyři části, v první části se nanáší tavidlo, v druhé části je předehřev, ve třetí části je samotné pájení na vlně a v poslední části se nachází chlazení. [2]

Při strojním pájení vlnou se používá převážně nanášení tekutého tavidla nástřikem. Pod spodní stranou desky je umístěna nástřiková tryska, která se pohybuje ve směru osy „x“ a rozstříkává tavidlo ve směru osy „y“ na projíždějící desku, která se pohybuje ve směru osy „z“ pod úhlem asi  $8^\circ$ . Tak je zajištěno rovnoměrné pokrytí rozptýleným tavidlem (Obr. 1.) a zároveň díky sklonu desky je přebytečné tavidlo odstraněno stečením. K odstranění přebytečného tavidla se ještě používá vzduchová tryska, která jej odfoukne.

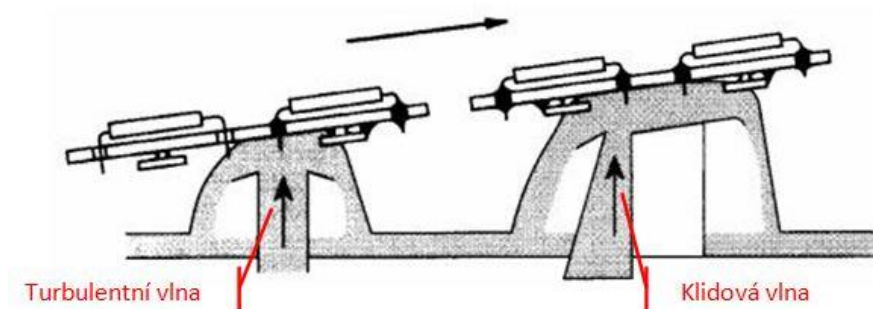


**Obr. 1.:** Nástřik tavidla na desku u strojního pájení vlnou

Desky se součástkami se musí před samotným pájením nahřát. K tomu slouží část s předehřevem. Předehřev desek zaručuje eliminaci teplotního šoku, odstranění rozpouštědel a aktivuje tavidla. Existují tři typy předehřevů, horkovzdušná konvekce, IR zářiče neboli infračervený předehřev a tzv. plotna, což je IR zářič pracující se středními vlnovými délkami. Horkovzdušná konvekce a IR se vyskytují s horním i spodním umístěním, tepelný zářič jenom se spodním umístěním. Při výrobě pájecí vlny se tyto předehřevy různě kombinují, záleží na výrobcu.

K samotnému pájení na vlně se používá nejčastěji dvojitá vlna. První je vlna turbulentní neboli čipová a druhá vlna je klidová neboli laminární (Obr. 2.). V turbulentní vlně proudí pájka velkou rychlostí, oproti tomu v klidové vlně proudí pájka pomaleji.

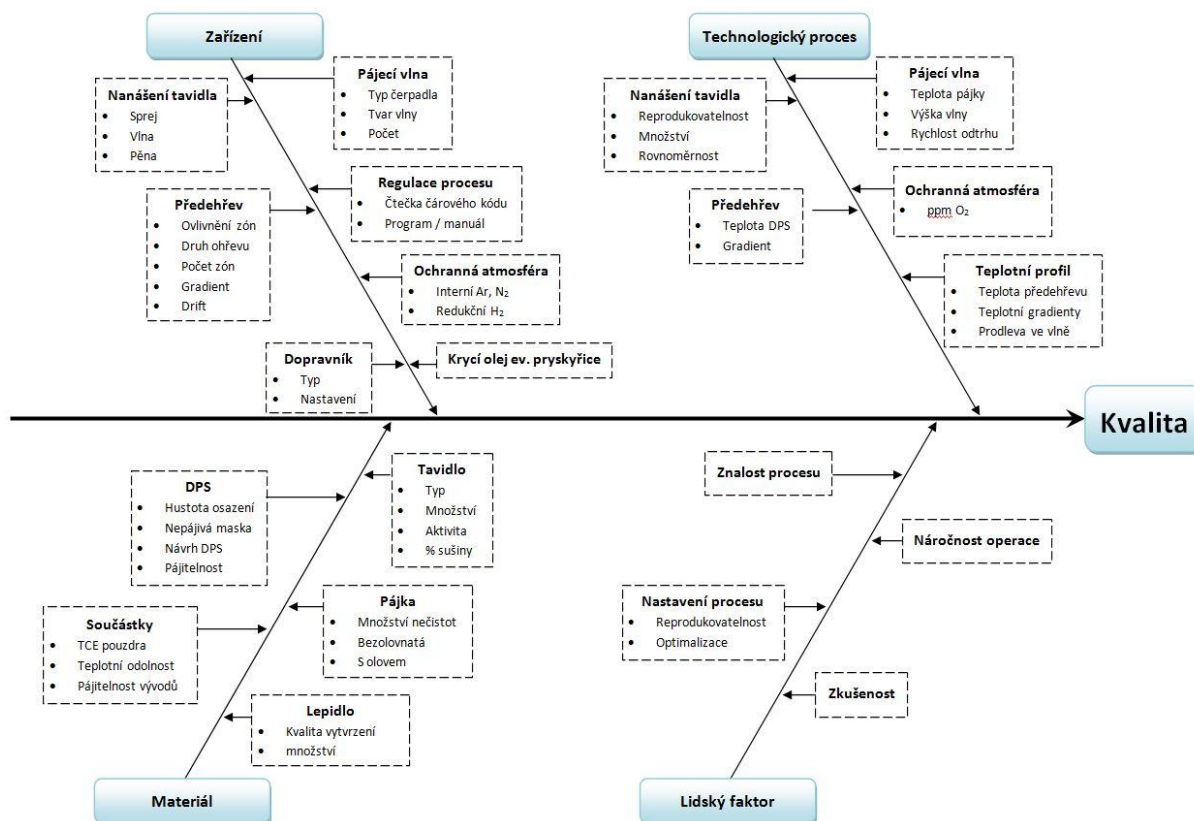
Dopravník, na kterém jsou umístěny desky, je nakloněn pro lepší kontakt desky s pájkou a snadnějšího odtrhu pájky ze spodní strany desky. [9]



Obr. 2.: Dvojitá vlna [9]

Chlazení je důležité pro vytvoření požadované mikrostruktury pájeného spoje. Doporučená rychlost chlazení je  $4\text{Ks}^{-1}$ . [9]

Na konci každého pájení dochází ke kontrole kvality, kvalita je ovlivněna řadou faktorů. Tyto faktory ovlivňující kvalitu jsou často analyzovány pomocí „Ishikawa diagramu“ (Fishbone diagram nebo také diagram příčin a následků), tento diagram pro strojní pájení vlnou je na Obr. 3.

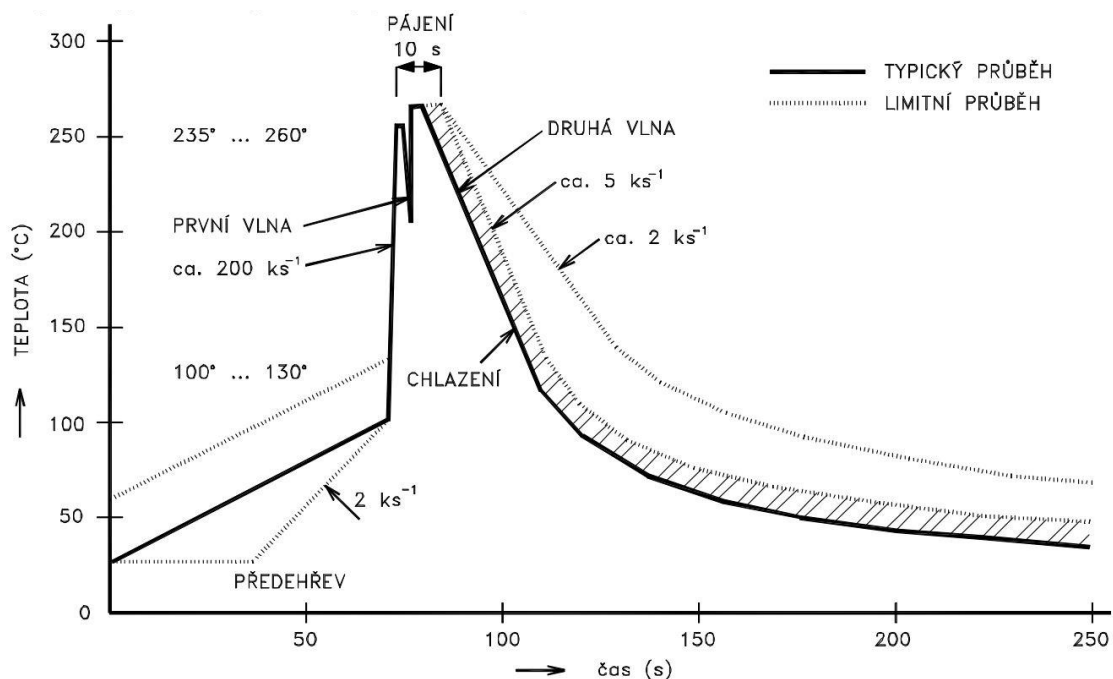


Obr. 3.: Ishikawa diagram pro kontrolu kvality u strojního pájení vlnou

### 1.1.3.2 Teplotní profil

Teplotní profil je důležitý ukazatel, který udává doporučené teploty pájecího procesu po celou dobu trvání. Pro vytvoření kvalitního a spolehlivého pájeného spoje je zapotřebí, aby byl co nejpřesněji dodržen nastavený teplotní profil. Správné nastavení zajistí, že se deska prohřeje pozvolna a nedojde tak k jejímu zvlnění či prohnutí rychlým zahřátím, odpaří se přebytečná vlhkost a nedojde tak k trhání spojů, zničení součástek a delaminaci desky.

Předeřev, pájecí vlna a chlazení jsou součástí teplotního profilu. Teplotní profil má pomalý náběh na předeřevu, vysoký na pájecí vlně a prudký pokles s chlazením. Dobře viditelné je to na následujícím grafu (Obr. 4). Mezi důležité parametry při analýze vhodného teplotního profilu patří teplotní gradient předeřevu na spodní straně desky, teplota předeřevu měřená na horní straně desky (obvykle 90 – 110°C), teplota pájky v pájecí vlně, prodleva součástek i vývodů v pájce (2 – 5 sekund) a rychlost chlazení. [9]



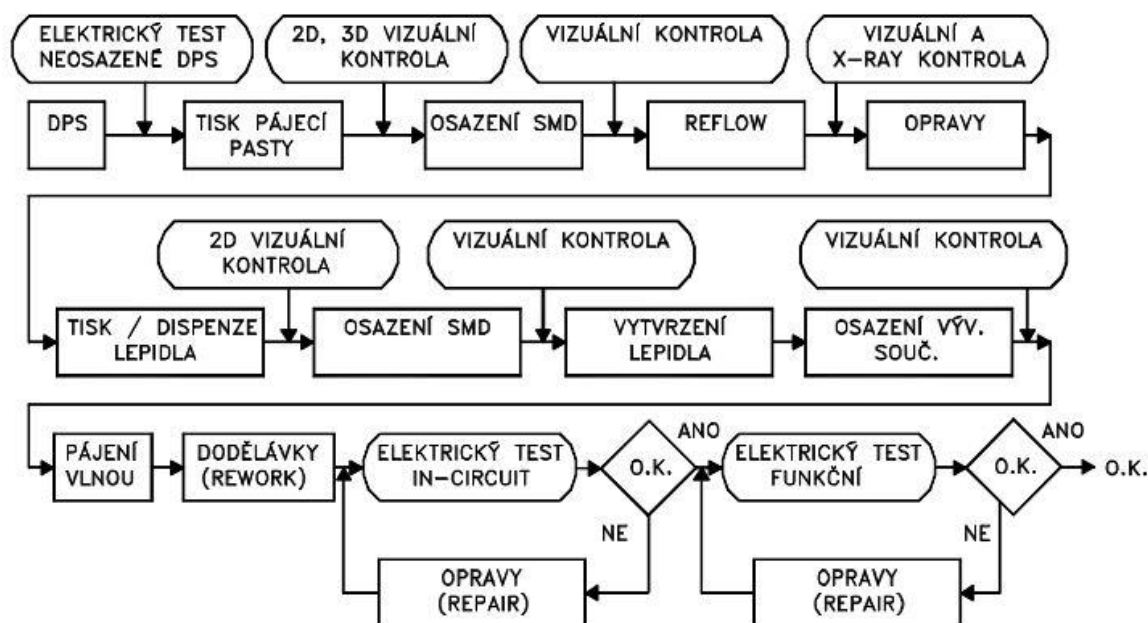
Obr. 4.: Teplotní profil dvojité vlny [9]

### 1.1.4. Kontrola kvality

Kontrola kvality neboli kontrola jakosti se používá ve všech stádiích výroby desky. Tyto kontroly v jednotlivých etapách výroby se řídí podle norem, a to buď českých, evropských, amerických či japonských.

Kontrola kvality a zároveň i testování má za cíl zajistit, aby desky byly správně osazeny, kvalitně zapájeny, a tím byly vytvořeny předpoklady ke spolehlivé funkci. Kontrola

se dělí podle místa provádění na vstupní kontrolu, mezioperační kontrolu a výstupní kontrolu. Kromě těchto kontrol se provádí ještě analýza zjištěných defektů, a to podle normy ČSN EN 61193. [9]



**Obr. 5.:** Schéma s doporučenými místy kontroly v technologickém toku výroby desek [9]

Vstupní kontrola ověřuje, že dodaný materiál vyhovuje normám a není v rozporu s technologickým předpisem výroby. Ze zahraničních norem např. IPC-A-600H, IPC-TM-650 a z českých např. ČSN EN 61189. Mezioperační kontroly jsou důležité pro spolehlivý výrobní proces. Na Obr. 5 je uvedeno schéma s doporučenými místy kontroly. Vizualní kontrola se provádí i po pájení vlnou. Výstupní kontroly závisí na požadavcích odběratele i výrobní dokumentace. [9]

Používanou normou pro mezioperační a výstupní kontrolu je norma IPC-A-610E CZ, která klasifikuje montážní celky do tří tříd podle oblasti použití. Pro každou třídu jsou dána kritéria ve čtyřech úrovních. V normě jsou vyobrazeny jednotlivé kvalitativní stavy a jsou hodnoceny podle tříd a stupně hodnocení. [9]

Třídy oblasti použití: [10]

- Třída 1: Elektronické výrobky pro obecné použití
  - Zahrnuje výrobky vhodné pro aplikace, kde hlavním požadavkem je funkčnost hotové sestavy.

- Třída 2: Elektronické výrobky pro specializované použití
  - Zahrnuje výrobky, kde je požadován nepřetržitý výkon a prodloužená životnost, a pro které je žádoucí nepřetržitý provoz, ale tento není kritický. Typické pracovní prostředí u uživatele by nemělo způsobit selhání.
- Třída 3: Elektronické výrobky pro kritické aplikace
  - Zahrnuje výrobky, kde požadavek na nepřetržitý vysoký výkon má kritickou důležitost, odstavení zařízení není tolerováno, i když prostředí konečného použití může být mimořádně nepříznivé a zařízení musí fungovat v podmínkách, jako je například záchrana života, podpora životních funkcí nebo v jiných kritických systémech.

Pro každou třídu jsou dána kritéria ve čtyřech úrovních: [10]

- Cílový stav – stav blízky dokonalosti / žádoucí, který není vždy dosažitelný a nemusí být nutný pro zajištění spolehlivosti sestavy v provozním prostředí.
- Přijatelný stav – tato charakteristika označuje stav, který i když není nezbytně dokonalý, zajistí integritu a spolehlivost sestavy v provozním prostředí.
- Závadový stav – závada je stav, který nepostačuje na zajištění rozměrů, nestavitelnosti nebo funkce sestavy v prostředí finálního použití. Závadový stav je stanoven výrobcem na základě požadavků výkresů, servisu a zákazníka. Možnosti dalšího nakládání s takovým výrobkem zahrnují přepracování (*rework*), opravu (*repair*) nebo vyřazení do odpadu (*scrap*). Pro použití ve stavu „tak jak je“ (*use as is*), nebo pro opravu může být vyžadován souhlas zákazníka.
- Stav indikace odchylky – je stav určující charakteristiku, která neovlivňuje rozměry, sestavitelnost nebo funkci výrobku.

## 1.2. Metoda plánovaných experimentů – DOE

DOE neboli metoda plánovaných experimentů „*Design of Experiments*“ se používá v podnicích jako nástroj pro zlepšení jakosti.

Použití DOE je účinné: [12]

- v etapě návrhu výrobku,
- v etapě návrhu procesu a jeho charakterizace a optimalizace,
- v procesu neustálého zlepšování a při řešení problémů.

Existují čtyři základní skupiny plánovaných experimentů: [12]

*Screening* – používá se v počátečních etapách charakterizace výrobků nebo procesů ke stanovení významných faktorů a interakcí. V této etapě je nutno vyřešit velké množství faktorů.

*Řešení problémů* – aplikace DOE se v této oblasti zaměřuje na hledání kořenové příčiny.

*Optimalizace procesů* – při optimalizaci se snažíme nalézt dobrý model, který umožní identifikaci optimálního nastavení faktorů, které byly již identifikovány. Často je používána pro zlepšení způsobilosti procesů.

*Robustní návrh* – robustním návrhem se rozumí takový návrh výrobku nebo procesu, kdy kritické výstupní parametry a charakteristiky jsou co nejméně závislé na změnách vstupních proměnných.

Design of Experiments (DOE) používající Taguchiho přístup je standardizovaná a zjednodušená forma plánovaných experimentů (klasické DOE), kterou vyvinul R. A. Fisher. Dr. Taguchi se začal zabývat tím, jak zlepšovat kvalitu. Věnoval se tomu, jak zjednodušit a standardizovat techniku DOE. [11]

### 1.2.1. Základní pojmy u DOE

*DOE* je experimentální strategie, při které najednou studujeme účinky několika faktorů, prostřednictvím jejich testování na různých úrovních.

*Charakteristická jakost  $Y$*  – je veličina, pomocí které vyjadřujeme určité vlastnosti produktu nebo procesu.

*Faktor (parametr)  $A$*  – je nezávislá návrhová proměnná, která ovlivňuje charakteristiku jakosti. Symbolicky se faktory označují velkými tiskacími písmeny, tj. A, B, C, atd.

- *Spojité faktory* – pro danou úroveň můžeme nastavit jejich libovolnou hodnotu. Např. teplota, množství, otáčky, aj.
- *Diskrétní faktory* – pro danou úroveň můžeme nastavit konkrétní jednu hodnotu nebo status. Např. typ materiálu, dodavatel.

- *Regulovatelný faktor* – je návrhová proměnná, o které si myslíme, že ovlivňuje odezvu a je přitom začleněna do experimentu. Hodnotu proměnné můžeme a zároveň chceme nastavit a udržovat. Např. množství suroviny, rychlost otáčení, viskozita.
- *Šumový faktor* – je to faktor, který negativně ovlivňuje odezvu a narušuje funkce produktu. Takový faktor nemůžeme nebo nechceme při vlastní aplikaci nastavit a udržovat na požadované hodnotě, ale můžeme to provádět během experimentu. Např. vlhkost prostředí, individuální podmínky používání výrobku.

Pokud chceme studovat, který faktor má vliv, musíme provést experimenty se dvěma nebo více úrovněmi faktorů. Nejmenší možný experiment je testování jednoho faktoru na dvou úrovních, což znamená provést dva pokusy. Celkový počet všech možných kombinací „*Full factorial design*“ při daném počtu faktorů na dvou úrovních vypočteme tak, že počet úrovní umocníme počtem faktorů, které chceme zkoumat.

Příklad:	3 faktory na dvou úrovních	$2^3 = 8$
	5 faktorů na dvou úrovních	$2^5 = 32$
	15 faktorů na dvou úrovních	$2^{15} = 32\,768$

Jelikož není možné takto rozsáhlé experimenty provádět v praxi, sestavil Taguchi sadu speciálních tabulek, podle kterých lze provádět pouze malou část z celkového počtu možných pokusů. Pomocí těchto soustav provádíme nejmenší možný počet experimentů s maximálním množstvím získaných informací.

*Interakce* – je závislost jednoho faktoru na druhém. Symbolicky ji značíme AxB.

*Stupeň volnosti* – „*Degrees of Freedom (DOF)*“ je počet nezávislých pozorování, který můžeme provést u daného souboru dat.

Výpočet DOF pro jednotlivé atributy DOE:

DOF faktoru:	počet úrovní – 1=(L-1)
DOF sloupce ortogonální soustavy:	počet úrovní – 1=(L-1)
DOF interakce AxB:	DOF faktoru A x DOF faktoru B
DOF ortogonální soustavy:	součet DOF všech sloupců
DOF celého experimentu:	počet výsledků – 1



*Ortogonalní soustavy* – jsou to speciální tabulky, které sestavil Taguchi. Podle nich lze provádět malou část z celkového počtu pokusů. Pomocí těchto soustav provádíme nejmenší možný počet experimentů s maximálním množstvím získaných informací. Pro všechny ortogonalní soustavy platí, že první řádek soustavy obsahuje samé jedničky, ale nikdy není k dispozici řádek se samými dvojkami.

*Robustnost* – je malá variabilita v provedení a fungování výrobku, a to i při vystavení výrobku vlivům uživatelského prostředí. Nedostatek robustnosti způsobuje degradaci provedení (funkcí) na výstupu systému (výrobku), čímž vzniká velká ztráta z jakosti, tj. finanční ztráta poté, co je výrobek dán do užívání. [11]

### 1.2.2. Jednoduché návrhy experimentů

Pod pojmem jednoduché návrhy experimentů rozumíme takové návrhy, které používají standardní Taguchiho ortogonalní soustavy s faktory ve 2-4 úrovních. Pro praktickou realizaci pokusů potřebujeme získat na výstupu návrhu dvě informace – kolik pokusů je potřeba udělat a jaké budou podmínky jednotlivých experimentů. Nejmenší ortogonalní soustava je L-4 (Tab. 3.).

**Tab. 3.:** *Ortogonalní soustava L-4* [11]

Číslo experimentu	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Kde:

- označení L vyjadřuje původ soustavy (Eulerovy latinské čtverce),
- číslice (4) vyjadřuje počet pokusů,
- číslice v soustavě reprezentují úroveň faktorů (1,2),
- řádky reprezentují podmínky pro jednotlivé pokusy,
- sloupce indikují možnost přiřazení faktoru,
- každá soustava má více možností použití,
- sloupce soustavy jsou ortogonální.

Pro všechny ortogonální soustavy platí, že první řádek soustavy obsahuje samé jedničky, ale nikdy není k dispozici řádek se samými dvojkami. Sloupce v soustavě jsou ortogonální a vyvážené, což znamená, že ve všech sloupcích je stejný počet 1 a 2. [11]

#### 1.2.2.1 Návrh experimentu na dvou úrovních

Pro návrhy experimentů s faktory na dvou úrovních používáme ortogonální soustavy různých velikostí, kdy každá z těchto soustav je vhodná pro celou řadu experimentálních situací.

Seznam běžně používaných soustav na dvou úrovních:

L-4 ( $2^3$ )	2 - 3 faktory
L-8 ( $2^7$ )	4 - 7 faktorů
L-12 ( $2^{11}$ )	8 - 11 faktorů (speciální ortogonální soustava)
L-16 ( $2^{15}$ )	8 - 15 faktorů
L-32 ( $2^{31}$ )	16 - 31 faktorů
L-64 ( $2^{63}$ )	32 - 63 faktorů

Celou proceduru pro navrhování experimentů můžeme shrnout do tří kroků:

- Výběr vhodné ortogonální soustavy* – můžeme provést v jednodušších případech podle uvedeného seznamu. Ve složitějších případech musíme použít další speciální postupy.
- Přiřazení faktorů do sloupců ortogonální soustavy* – pokud potřebujeme z nějakého důvodu zaměnit pořadí faktorů ve sloupcích, je to možné, pořadí faktorů je libovolné. Důsledkem změny pořadí faktorů bude sice změna výsledků jednotlivých pokusů, ale závěry z analýzy budou stejné.
- Popis jednotlivých experimentů* – můžeme provést symbolicky nebo slovně. Z hlediska srozumitelnosti se doporučuje provést obojí. [11]

#### 1.2.2.2 Návrh experimentu na třech úrovních

Pro experimenty s faktory na třech úrovních platí analogická pravidla jako pro dvě úrovně. Nejmenší ortogonální soustavou pro tři úrovně je soustava L-9 (Tab. 4.).

Běžně používané ortogonální soustavy pro tři úrovně:

L-9 ( $3^4$ )	2-4 faktory
---------------	-------------

L-18 ( $2^1 3^7$ ) 5-7 faktorů na třech úrovních a 1 faktor na dvou úrovních

L-27 ( $3^{13}$ ) 5-13 faktorů

**Tab. 4.:** Ortogonální soustava L-9 [11]

Číslo experimentu	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	3
5	2	2	1
6	2	3	2
7	3	1	2
8	3	2	3
9	3	3	1

### 1.2.3. Experimentální procedura

Experimentální procedura obsahuje 5 kroků:

- 1) *Plánování experimentů* – v tomto kroku se musí co nejpřesněji definovat všechny potřebné vstupy pro návrh experimentů. Tzn. především nadefinovat cíl experimentu, faktory, počet úrovní faktorů a jejich nastavení atd.
- 2) *Navrhování experimentů* – navrhování jednoduchých experimentů je ukázáno výše.
- 3) *Provedení experimentů* – podle daného návrhu realizujeme v aktuálních výrobních podmínkách, laboratoři, při ověřovací výrobě, apod. důležitou podmínkou je provádět experimenty v náhodném pořadí.
- 4) *Analýza experimentů* – zahrnuje tři standardní kroky:
  - a) Stanovení optimálních podmínek (průměrné a hlavní účinky)
  - b) Procentuální podíl faktorů
  - c) Odhad hodnoty charakteristiky jakosti při optimálních podmínkách
- 5) *Ověřovací testy* – jsou nedílnou součástí Taguchiho metody. Těmito testy chceme ověřit, že závěry z analýzy jsou správné. [11]

#### 1.2.4. Experimenty s interakcemi

Interakce mezi faktory je poměrně běžná věc. Kterýkoli faktor může být v interakci a kterýmkoli jiným faktorem. Abychom navrhovali experimenty efektivně a správně, musíme vytvořit rozumnou rovnováhu mezi počtem zkoumaných faktorů a interakcí. Taguchiho DOE se zabývá pouze interakcemi prvního řádu (tj. AxB), interakce vyššího řádu (např. AxBxCxD) zanedbáváme.

Během plánování experimentů se snažíme redukovat interakce dvojím způsobem:

- a) *Volba charakteristiky jakosti při plánování experimentů* – interakce si můžeme sami uměle vytvořit špatnou volbou charakteristiky jakosti. Tzn., že při plánování experimentů musíme pečlivě vybírat charakteristiku jakosti s ohledem na její charakter.
- b) *Zvláštní postupy při definování faktorů* – interakce, které vycházejí z fyzikální podstaty přeměny energie v systému, eliminujeme pomocí definování faktorů.

#### Návrhy experimentů s interakcemi

Interakci mezi faktory zapisujeme symbolicky AxB a pokud jsou faktory A a B přiřazeny do sloupců 1 a 2, můžeme také symbolicky zapisovat interakci mezi sloupci 1x2.

Taguchi ukázal, že interakce sloupců 1x2 se projeví ve sloupci 3. Čili  $1x2 \Rightarrow 3$ .

Jestliže budeme v situaci, kdy bude významná interakce AxB, faktory budou ve sloupcích 1 a 2 a do sloupce 3 přiřadíme faktor C, tak účinek faktoru a interakce bude smíšen. Abychom byli schopni analyzovat čistý účinek interakce, musíme nechat sloupec 3 prázdný a rezervovat jej pro interakci AxB. Sloupce 1, 2 a 3, které obsahují interagující faktory, nazýváme interakční skupina.

Sloupce v interakční skupině jsou komunikativní

$$1x2 \Rightarrow 3$$

$$1x3 \Rightarrow 2$$

$$2x3 \Rightarrow 1$$

Strategie pro návrh experimentů s interakcemi:

- Spočítáme potřebný DOF pro experiment a nalezneme ortogonální soustavu, která má DOF stejný nebo vyšší.
- Podle struktury interakcí vybereme vhodný lineární graf.
- Podle lineárního grafu přiřadíme do sloupců napřed faktory, které jsou v interakci.

- Přiřadíme do příslušných sloupců interakce.
- Do zbývajících volných sloupců přiřadíme faktory, které nejsou v interakci.

Při analýze experimentu s interakcemi provádíme analýzu dle standardní procedury a přidáváme zde některé kroky týkající se interakcí navíc.

- a) Stanovení optimálních podmínek na základě průměrných účinků faktorů, počítáme průměrné a hlavní účinky faktorů a interakcí. Dále provádíme kvalitativní analýzu interakcí.
- b) Procentuální podíl faktorů a interakcí, pokud je interakce významná, modifikují se optimální podmínky, které byly stanoveny na bázi průměrných účinků faktorů.
- c) Odhad hodnoty charakteristiky jakosti při optimálních podmínkách. [11]

### **1.2.5. Smíšené úrovně faktorů**

Jde o takové případy, kde jsme nuceni zkoumat faktory v různých úrovních, čili půjde o tzv. návrh se smíšenými úrovněmi. V některých případech lze sice využít standardní soustavu, ale častěji jsme nuceni modifikovat vybranou ortogonální soustavu. Modifikace probíhá tak, že buď zvyšujeme, nebo snižujeme počet úrovní ve sloupcích, často je ale taky nutné oba postupy kombinovat. [11]

#### **1.2.5.1 Zvýšení počtu úrovní ve sloupci**

Tento druh modifikace používáme v takových případech, kdy je nutno zkoumat jen jeden nebo několik málo faktorů ve více úrovních než ostatní faktory. Faktory více úrovní jsou obvykle diskrétní (např. chceme zkoušet 4 druhy materiálu).

Postupujeme ve 4 krocích:

- 1) *Výběr standardní ortogonální soustavy*
- 2) *Výběr sady sloupců, které jsou v interakci*
- 3) *Úprava sloupců*
- 4) *Nahrazení sloupce [11]*

#### **1.2.5.2 Snižování počtu úrovní ve sloupci**

Zde potřebujeme testovat jeden nebo několik málo faktorů na nižším počtu úrovní než u ostatních faktorů.

Postup:

- 1) *Výběr standardní ortogonální soustavy*
- 2) *Snížení počtu úrovní* – proces snižování počtu úrovní ve sloupci spočívá v tom, že použijeme kterýkoli standardní sloupec a jednoduše vyměníme jednu úroveň za druhou. Novou úroveň volíme podle vlastního uvážení. Pokud je např. vliv faktoru na úrovni 3 poměrně hodně prozkoumán, zatímco o účincích faktoru na úrovni 1 nevíme vůbec nic, nahradíme úroveň 3 úrovní 1. Zaměněná čísla v soustavě označíme symbolem ( $\cdot$ ). [11]

### **1.2.6. Robustní návrh**

Při DOE jsme schopni identifikovat faktory, které mají vliv na charakteristiku jakosti a tyto faktory jsme schopni nastavit tak, že zlepšíme konzistentnost provedení. Avšak u mnoha systémů způsobují variabilitu z větší části šumové faktory. Pro tyto situace vymyslel Taguchi strategii robustního návrhu, kde se minimalizuje vliv šumových faktorů nastavením regulovatelných faktorů. Tzn., požadovaný návrh není realizován výběrem hodnot regulovatelných faktorů za ideálních nebo standardních podmínek, ale hledáním takového návrhu, který poskytuje konzistentní provedení při vystavení vlivu šumových faktorů.

Míru dosažené robustnosti jsme schopni vyjádřit i číselně, tzv. poměrem signál/šum (S/N). Tímto způsobem jsme schopni vyjádřit robustnost u daného výrobku/procesu.

#### **Návrhy experimentů s opakováním**

Zařazením šumových faktorů do experimentu dosahujeme robustnosti u produktu nebo procesu. Důsledkem práce se šumovými faktory při experimentu je to, že každý experiment je prováděn více než jedenkrát. Z tohoto důvodu se tyto experimenty nazývají také jako experimenty s opakováním. Šumové faktory zahrnujeme do experimentu v zásadě třemi způsoby:

- a) *Prosté opakování* – v tomto případě neidentifikujeme jednotlivé šumové faktory, ale bereme je jako celek, který náhodně ovlivňuje charakteristiku jakosti. Šumové faktory jsou zahrnuty do experimentu tak, že každý jednotlivý experiment provádíme více než jedenkrát. Jde o nejjednodušší postup z hlediska praktické realizace.
- b) *Kombinace extrémních hodnot šumových faktorů* – zde identifikujeme jednotlivé šumové faktory, ale nezkoumáme je individuálně, ale skupinově. Tzn., vytvoříme

nejhorší možnou kombinaci a nejlepší možnou kombinaci úrovní faktorů a každý experiment provádíme dvakrát, tj. při nejlepších a nejhorších šumových podmínkách.

- c) *Experimenty s vnější soustavou* – v některých situacích je nutné zkoumat šumové faktory individuálně. Typickým příkladem takového případu může být zkoumání diskretních šumových faktorů. Taguchi vyvinul originální způsob, jak zahrnout větší množství šumových faktorů do návrhu experimentů s tím, že každý šumový faktor lze individuálně studovat. Pro tento účel používá Taguchi pro regulovatelné faktory vnitřní soustavu a pro šumové faktory vnější ortogonální soustavu.

Při analýze u opakovatelných experimentů musíme výsledky nějakým způsobem transformovat do jedné hodnoty. Potřebujeme kvantitu, která v sobě zahrnuje jak průměr, tak směrodatnou odchylku a má tudíž vyšší rozlišovací schopnost. Veličina, která obsahuje jak průměr, tak směrodatnou odchylku se nazývá MSD „*Mean Squared Deviation*“ neboli střední kvadratická odchylka.

*Výpočet MSD pro charakteristiku typu N:* [11]

$$MSD = [(y_1 - m)^2 + (y_2 - m)^2 + \dots + (y_n - m)^2]/n \quad (1)$$

kde  $y_1$  až  $y_n$  jsou naměřené hodnoty charakteristiky jakosti,  $m$  je cílová hodnota a  $n$  je počet jednotek daného vzorku.

*Pro charakteristiku typu S:* [11]

$$MSD = (y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2)/n \quad (2)$$

*Pro charakteristiku typu B:* [11]

$$MSD = (1/y_1^2 + 1/y_2^2 + \dots + 1/y_n^2)/n \quad (3)$$

Jednoduchou transformací získáme obecnou definici poměru signál/šum (S/N), který je měřítkem robustnosti. [11]

$$S/N = -10 \log(MSD) \quad (4)$$

Bez ohledu na typ charakteristiky jakosti, je vždy nejžádanější co nejvyšší hodnota S/N. Jednotkou pro S/N jsou decibely.

Postup při S/N analýze se dá shrnout do následujících kroků:

- 1) Transformace výsledků na poměr S/N.

- 2) Provedení analýzy, které je prakticky totožné s postupem při standardní analýze. Jediný rozdíl spočívá v tom, že pracujeme s hodnotami S/N, a proto vždy hledáme nejvyšší hodnotu tohoto poměru.
- 3) Transformace poměru S/N na původní jednotky měření.

Standardní analýza se používá pro experimenty bez opakování, zatímco S/N analýza pro experimenty s opakováním. [11]

### **1.2.7. Analýza experimentálních dat**

*ANOVA (ANalysis Of VAriance)* – neboli analýza rozptylu představuje standardní statistickou metodu, pomocí které můžeme analyzovat rozptyl mezi výsledky jednotlivých experimentů.

*Standardní analýza* – se používá při experimentech bez opakování (každý experiment je proveden právě jednou).

*S/N analýza* – při analýze opakovaných experimentů je teoreticky možno použít standardní analýzu. Standardní analýza však používá pro výpočty průměrné hodnoty, což je v případě opakovaných experimentů nedostatečné. U opakovaných experimentů potřebujeme zjišťovat rozptyl okolo cílové hodnoty. Toto provádíme pomocí veličiny MSD, resp. S/N. [11]

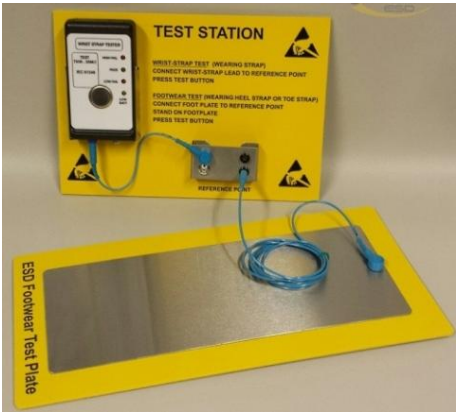



## 2. METODIKA PRO KONTROLU KVALITY U STROJNÍHO PÁJENÍ VLNOU

Tato metodika pro kontrolu kvality u strojního pájení vlnou se zabývá kvalifikací Třídy 2. Jsou zde zmíněny zásady ESD (*Electrostatic discharge* – elektrostatický výboj) a podmínky pro osazení a pájení, hlavně vývodových součástek, ale i čipových součástek.

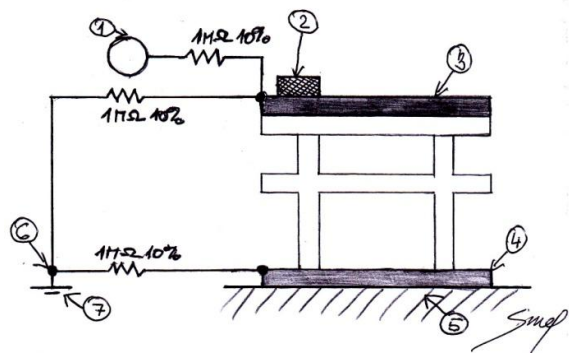
Třída 2 podle normy IPC-A-610E CZ je stanovena pro elektronické výrobky k specializovanému použití. Zahrnuje výrobky, kde je požadován nepřetržitý výkon a prodloužená životnost, a pro které je žádoucí nepřetržitý provoz, ale tento není kritický. Typické pracovní prostředí u uživatele by nemělo způsobit selhání. [10]

### 2.1. Zásady ESD

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nejméně 1x denně je nutné provést kontrolní test pro zjištění ESD před vstupem na pracoviště</li> </ul>	 <p><b>Obr. 6.:</b> Kontrolní tester na ESD [13]</p>
<p><b>PRACOVIŠTĚ</b></p>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Musí být označeno symbolem</li> </ul>	 <p><b>Obr. 7.:</b> Označení prostoru ESD [14]</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Musí se používat ochranné pomůcky</li> </ul>	

- Musí být zabezpečené proti ESD – povrch stolu, stůl, podložka pod stolem, náramek – vše musí být připojené na společnou zem

**Popis obrázku:** 1. osobní ochranný náramek, 2. podnosy, zásobníky s ochranou proti ESD, 3. povrch stolu s ochranou proti ESD, 4. podlaha nebo rohož s ochranou proti ESD, 5. podlaha budovy, 6. společný uzemňovací bod, 7. Zem.



**Obr. 8.:** Pracoviště zabezpečené proti ESD

## OCHRANNÉ POMŮCKY

- ESD obuv (nebo pásek do bot)
- ESD plášť
- ESD rukavice (nebo náramek připojený k zápěstí)



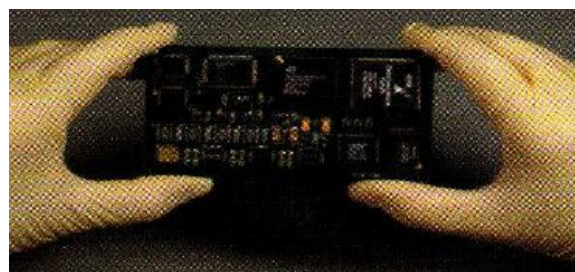
**Obr. 9.:** ESD obuv a pásek do bot



**Obr. 10.:** ESD rukavice a náramek

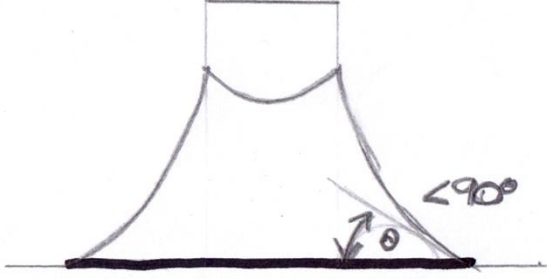
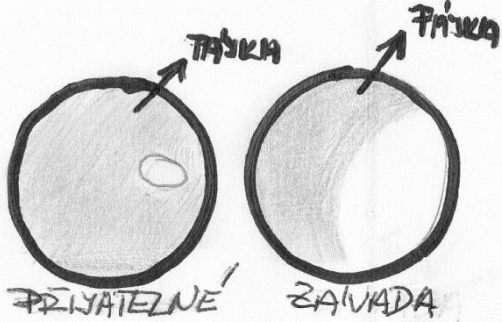


## 2.2. Manipulace s deskou

- Úchop za hrany desky
- Vyhnut se doteku kontaktů.
- Nepůsobit na desku tlakem mechanickému působení (neprohýbat)
- Neskládat desky na sebe a neposouvat po žádném povrchu



**Obr. 11.:** Správné držení desky plošných spojů [10]

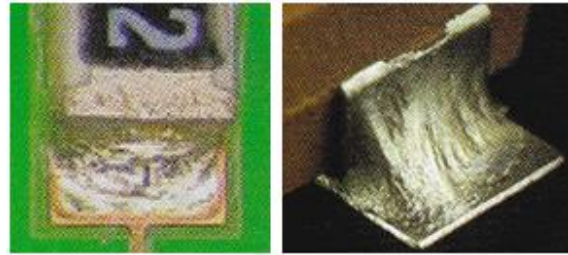
### 2.3. Vizuální kontrola desky – pájení

KRITÉRIA PŘIJATELNOSTI	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pájka by měla být na pohled hladká a navzlínaná</li> <li>- Obrys oblasti spojení by měl být pod pájkou viditelný a pájka by měla vytvářet ostrý okraj</li> <li>- Pájka pro bezolovnaté slitiny může mít matný, šedý, nebo zrnitý vzhled</li> <li>- Smáčecí úhel nesmí překročit <math>90^\circ</math>, výjimkou je vytvořený přesah nad hranou pájené plochy (ten je přijatelný)</li> </ul>	 <p><b>Obr. 12.:</b> Správně navzlínaná pájka na vývodu součástky</p>
ANOMÁLIE PŘI PÁJENÍ – ZÁVADY	
<p><b>DUTINY PO BUBLINÁCH, KRÁTERY</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nesmí snižovat velikost pájeného spoje pod požadované minimum</li> </ul>	 <p><b>Obr. 13.:</b> Porovnání bublinek v pájce</p>
<p><b>NEDOKONALÉ PŘETAVENÍ PÁJECÍ PASTY</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Závadou je nedokonalé přetavení pájecí pasty</li> </ul>	 <p><b>Obr. 14.:</b> Nedokonalé přetavení pájecí pasty [10]</p>
<p><b>NESMÁČENÍ</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pájka nesmáčela plošku nebo pájecí zakončení tam, kde to bylo požadováno (neschopnost roztavené pájky spojit se se základním kovem)</li> </ul>	 <p><b>Obr. 15.:</b> Nesmáčení [10]</p>

<p style="text-align: center;"><b>ODSMÁČENÍ</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pájený spoj nesplňuje požadavky na pájkovou výplň pro SMT nebo montáž do průchozích otvorů</li> </ul>	 <p style="text-align: center;"><b>Obr. 16.:</b> Odsmačeni [10]</p>
<p style="text-align: center;"><b>NÁRŮST PÁJKY (PRAPORKY, KRÁPNÍKY)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Porušují maximální povolenou výšku a minimální elektrickou vzdálenost</li> </ul>	 <p style="text-align: center;"><b>Obr. 17.:</b> Praporky [10]</p>
<p style="text-align: center;"><b>NADMĚRNÉ MNOŽSTVÍ PÁJKY</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kuličky pájky</li> <li>- Porušují minimální elektrickou izolační vzdálenost</li> <li>- Nejsou zapouzdřeny, zachyceny a ani znehybněny</li> <li>- Zkratky</li> <li>- Pájený spoj spojuje vodiče, které nemají být spojeny</li> <li>- Pájka přemostila sousední nespolečné vodiče nebo součástky</li> <li>- Pavučina/rozstříky pájky</li> </ul>	 <p style="text-align: center;"><b>Obr. 18.:</b> Ukázka nadměrného množství pájky [10]</p>
<p style="text-align: center;"><b>TRHLINA V PÁJCE</b></p>	 <p style="text-align: center;"><b>Obr. 19.:</b> Trhlina v pájce [10]</p>

### NARUŠENÉ TUHNUTÍ

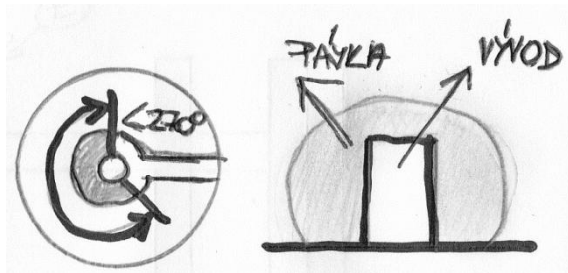
- Poznává se podle rýh, které vzniknou namáháním pohybu spoje



Obr. 20.: Narušené tuhnutí [10]

### NEPOKOVENÉ OTVORY

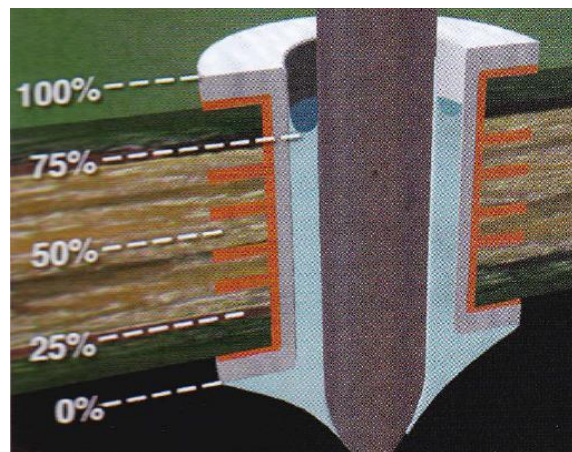
- Pájené spojení u přímého zakončení nesplňuje požadavek minimálního obvodového smáčení 270°, méně než 75 % plošky je pokryto
- Vývod není rozeznatelný kvůli nadměrnému množství pájky



Obr. 21.: Nepokovené otvory a nadměrné množství pájky

### POKOVENÉ OTVORY

- Vývod není rozeznatelný v důsledku ohnutí vývodu
- Pájka nesmáčí vývod ani plošku
- Zaplnění otvoru nesmí být menší než 75 % (vertikální výplň)
- Smáčení na cílové straně pájky vývodu (vývod vstupuje do otvoru) nesmí být menší než 180°
- Smáčení na zdrojové straně pájky vývodu (vývod vystupuje z otvoru) nesmí být menší než 270°
- Pájka v ohybu vývodu nesmí být v kontaktu s tělem součástky nebo koncovým těsněním
- Průchozí nemontážní otvory
- Strany otvorů nejsou smáčeny pájkou
- Oddělení mezi vodičem nebo ploškou a povrchem laminátu nesmí být větší než tloušťka jedné plošky

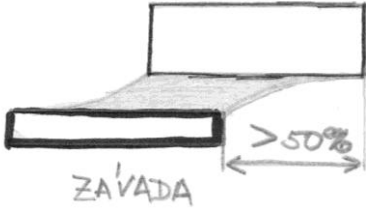
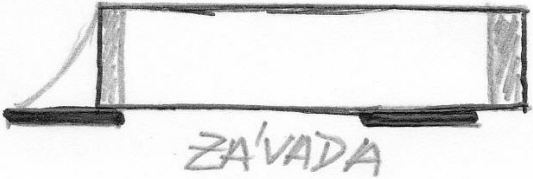
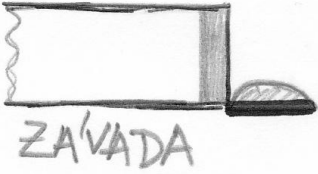
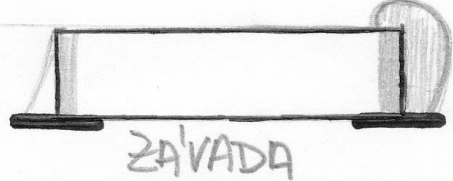
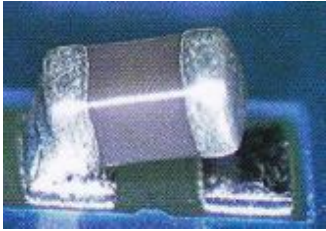


Obr. 22.: Zaplnění otvoru nesmí být menší než na obr. [10]



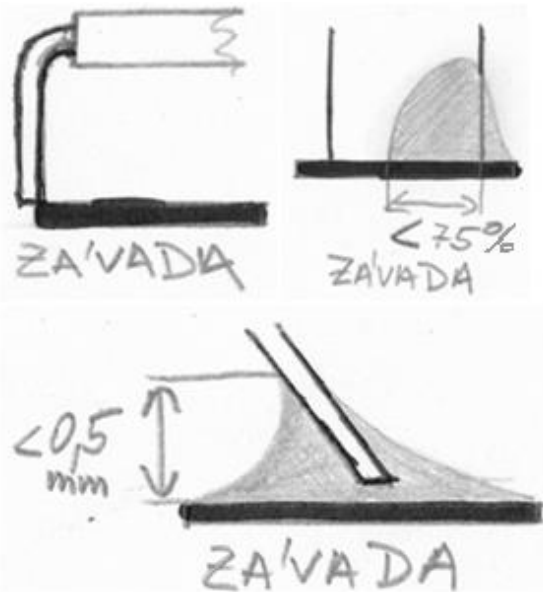
Obr. 23.: Pájka v ohybu vývodu – nesmí nastat [10]

## ČIPOVÉ SOUČÁSTKY – PÁJENÍ – ZÁVADY

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boční přesah nesmí být větší než 50 % šířky vývodu (drážky) nebo šířky plošky</li> <li>- Koncová šířka nesmí být menší než 50 % šířky vývodu (drážky) nebo šířky plošky</li> </ul>	 <p><b>Obr. 24.:</b> Boční přesah je větší – nesmí nastat</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Koncový přesah není povolen -&gt; vývod přesahuje přes plošku</li> </ul>	 <p><b>Obr. 25.:</b> Vývod přesahuje plošku – nesmí nastat</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nedostatečné koncové překrytí</li> <li>- Minimální výška pájkové výplně a tloušťka pájky             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Smáčení není zřejmé</li> <li>- Nedostatek pájky</li> </ul> </li> </ul>	 <p><b>Obr. 26.:</b> Nedostatečné koncové překrytí – nesmí nastat</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pájka přesahuje na vrchní část těla součástky</li> </ul>	 <p><b>Obr. 27.:</b> Pájka přesahuje součástku – nesmí nastat</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Čipové součástky stojí na konci vývodu – pomníkový efekt – tombstoning</li> </ul>	 <p><b>Obr. 28.:</b> Tombstoning [10]</p>
<h3>DRÁŽKOVÉ VÝVODY</h3>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pájka nezasahuje od zadní drážky na plošku ani za hranu součástky</li> <li>- Pájka nesmí být menší než 25 % výplně</li> </ul>	

### SPOJE NA TUPO – TVAR I

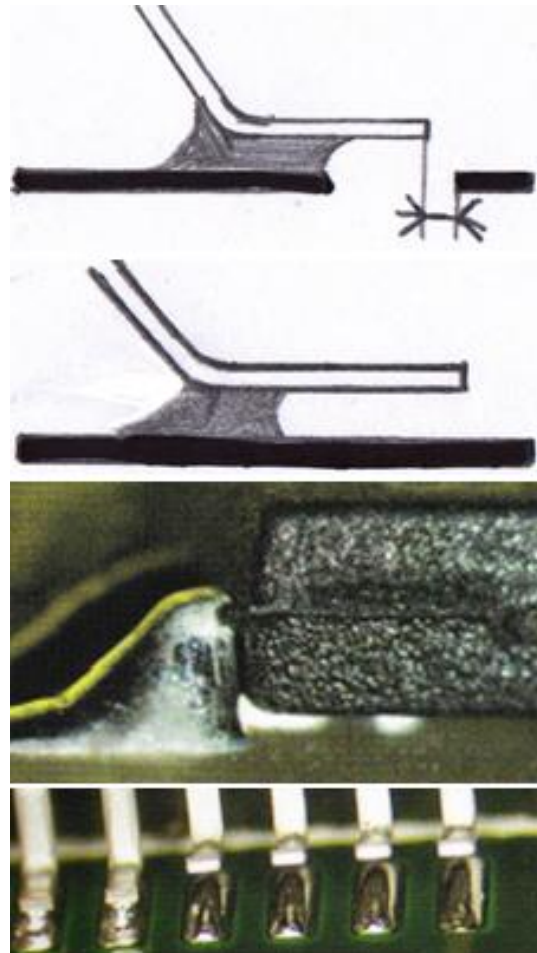
- Nesmí být jakýkoliv boční přesah, přesah špičky
- Koncová šířka spoje nesmí být menší než 75 % šířky vývodu
- Pájka se nesmí dotýkat těla pouzdra
- Nesmáčená pájková výplň
- Výška nesmí být menší než 0,5 mm



Obr. 29.: Příklady závad u spoje na tuho

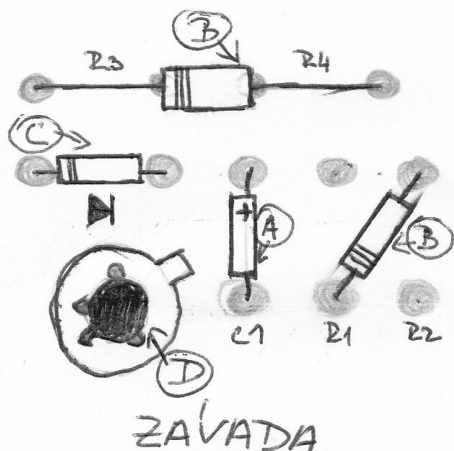
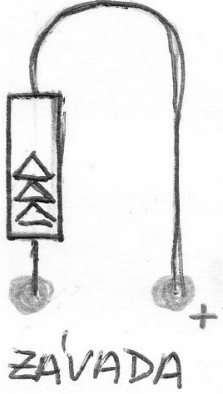

### PLOCHÉ VÝVODY – TVAR L, TVAR J, KULATÉ NEBO ZPLOŠTĚLÉ

- Přesah špičky porušuje minimální elektrickou izolační vzdálenost
- Délka spoje na patě nesmí být menší než 50 % délky paty
- Pájka se nesmí dotýkat plastového těla součástky a keramických nebo kovových součástek
- Ani jeden vývod nesmí být nadzvednutý nebo vybočovat



Obr. 30.: Příklady co nesmí nastat

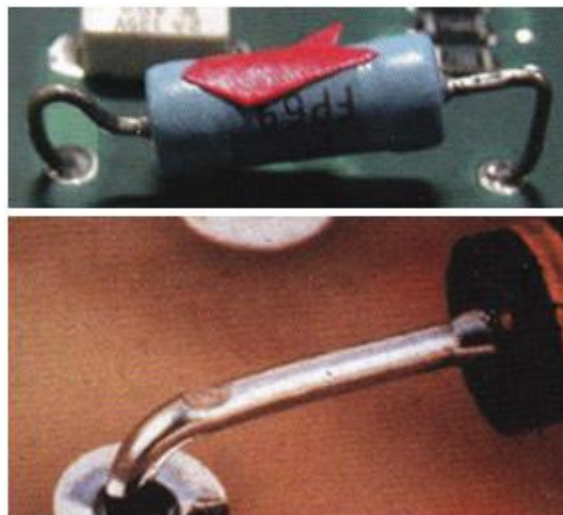
## 2.4. Vizuální kontrola desky – osazení

HORIZONTÁLNÍ ORIENTACE SOUČÁSTEK - ZÁVADY	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Součástka nesmí být jiná než má na daném místě být (A)</li> <li>- Součástka nesmí být osazena v jiných otvorech, než je žádoucí (B)</li> <li>- Polarizované součástky nesmí být osazeny obráceně (C)</li> <li>- Součástka s více vývody nesmí být jinak orientovaná, než jak má být (D)</li> </ul>	 <p style="text-align: center;"><b>ZÁVADA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Obr. 31.: Špatné zapojení součástek</b></p>
VERTIKÁLNÍ ORIENTACE SOUČÁSTEK - ZÁVADY	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Polarizovatelná součástka nesmí být osazena obráceně</li> </ul>	 <p style="text-align: center;"><b>ZÁVADA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Obr. 32.: Špatně osazená součástka</b></p>
VÝVODY KŘÍŽUJÍCÍ VODIČE - ZÁVADY	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Návleky se musí používat, pokud jsou požadovány ve specifikacích nebo výkresem</li> <li>- Pokud je použit návlek nesmí být roztržen nebo rozpleten. (A)</li> <li>- Křížení nesmí být menší než 0,5 mm bez oddělovacího izolátoru (návlek nebo povlak povrchu). (B)</li> <li>- Návlek nesmí překážet požadovanému pájenému spojení</li> </ul>	 <p style="text-align: center;"><b>Obr. 33.: Vývody křížující vodiče [10]</b></p>



### TVAROVÁNÍ VÝVODŮ - ZÁVADY

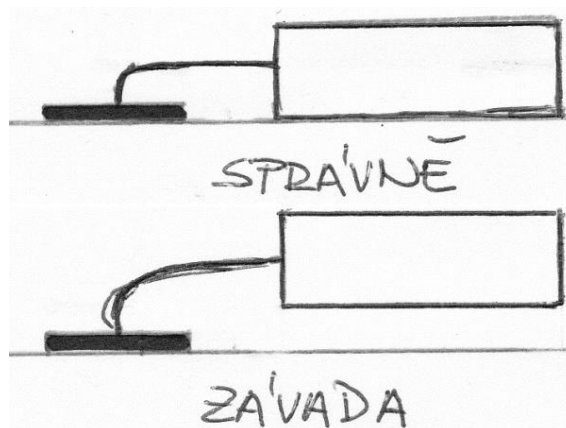
- Vývod nesmí být pokroucený nebo deformovaný opakovaným nebo nedbalým ohýbáním
- Nesmí být narušený svar vývodu, pájková výplň nebo průchodka vývodu součástky
- Nesmí být poškozeno nebo narušeno tělo součástky u průchodky vývodu
- Vývod nesmí být poškozen na více než 10 % průměru vývodu
- Na vývodu nesmí být žádné výrazné vryp



**Obr. 34.:** Příklad špatného tvarování vývodů [10]

### RADIÁLNÍ VÝVODY - ZÁVADY

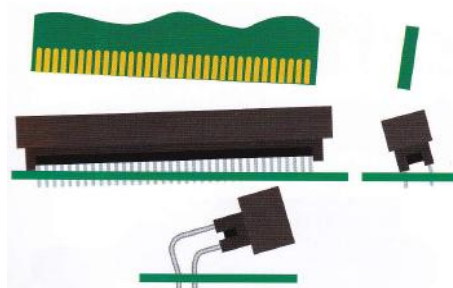
- Nesmí být porušena minimální elektrická izolační vzdálenost
- Při použití distanční podložky nesmí být podložka v částečném kontaktu se součástkou a s deskou
- Distanční podložka nesmí být obráceně
- Distanční podložka nesmí chybět, pokud je požadována
- Při horizontální montáži nesmí součástka být ve vzduchu
- Pokud je vyžadován připevňovací prvek, musí být použit



**Obr. 35.:** Příklad horizontální montáže

### KONEKTORY - ZÁVADY

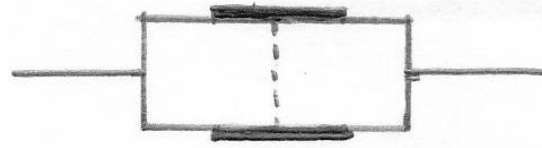
- Nesmí být nakloněny tak aby přesahovaly požadavek na výšku
  - Musí být vidět vývody
- Zámek musí být plně zasunut v desce



**Obr. 36.:** Nakloněné konektory [10]

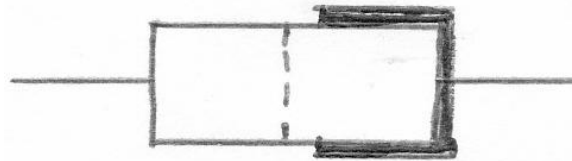
## PŘIDRŽENÍ SOUČÁSTEK

- Mezera mezi ploškou a neizolovaným tělem součástky nesmí být menší než minimální elektrická izolační vzdálenost
- Úchyt musí udržet součástku
- Střed součástky musí být uvnitř úchytu
- U horizontálně osazených součástek nesmí být adhezivum menší než 50 % délky nebo méně než 25 % průměru na jedné straně
- U vertikálně osazených součástek nesmí být adhezivum menší než 50 % délky nebo méně než 25 % jeho obvodu
- Adheze musí být k montážní rovině evidentní
- Neizolované součástky s kovovým pouzdem s přichycením nesmí překrývat vodivé obrazce
- Přichycení nesmí být menší, než je specifikováno
- Součástky s hmotností 7 g a více nesmí být přichyceny méně jak na 4 místech
- Nesmí být přichyceno méně než 20 % celého obvodu součástky
- Materiál přichycení nesmí být příliš tenký – musí zajistit dobrou oporu



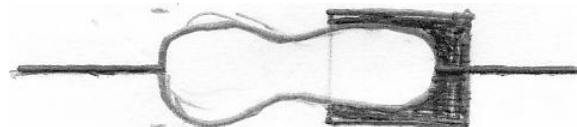
SPRÁVNĚ

**Obr. 37.:** Správné přichycení součástky



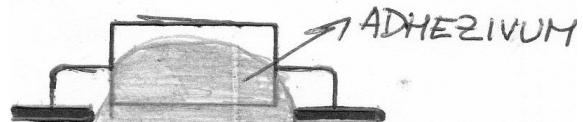
ZÁVADA

**Obr. 38.:** Špatné přichycení součástky



ZÁVADA

**Obr. 39.:** Úchytka nedrží celou součástku



ZÁVADA

**Obr. 40.:** Hodně použitého adheziva

## ADHEZIVUM PRO PŘICHYCENÍ - ZÁVADY

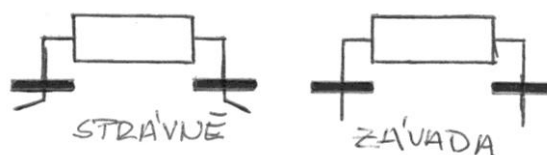
- Adhezivum nesmí vyčnívat zpod součástky v oblasti vývodu (čipové součástky)



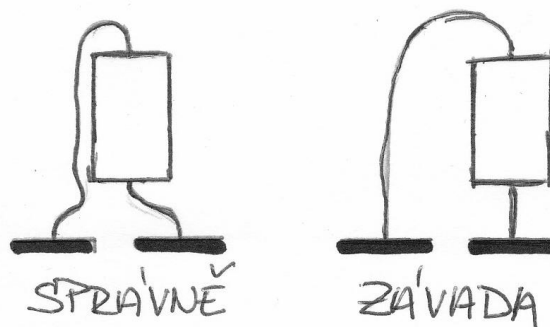
**Obr. 41.:** Adhezivum pod vývodem součástky – nesmí nastat [10]

## NEPOKOVENÉ OTVORY – DEFEKTY

- Součástky nesmí mít rovné vývody – vývody musí být zahnuté
- Součástky s vyžadovaným odsazením nesmí být níže než 1,5 mm
- Vyčnívání vývodů nesmí porušit minimální elektrickou izolační vzdálenost
- Vyčnívání vývodů nesmí překročit maximální výšku uvedenou ve výkresu
- Vývod nesmí být zahnutý směrem k elektricky živému vodiči a nesmí porušovat minimální elektrickou izolační vzdálenost
- Vyčnívání vývodu musí být tak velké, aby bylo možné jeho zahnutí



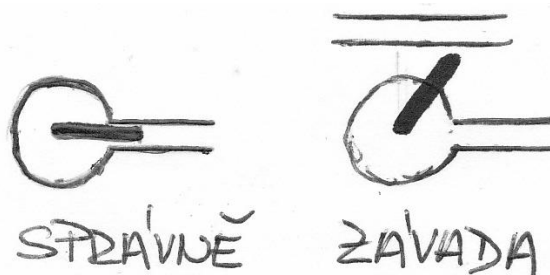
**Obr. 42.:** Horizontální součástky




**Obr. 43.:** Vertikální součástky

## POKOVENÉ OTVORY - DEFEKTY

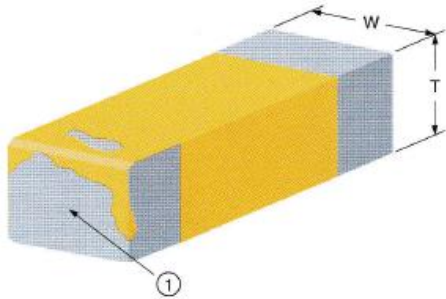

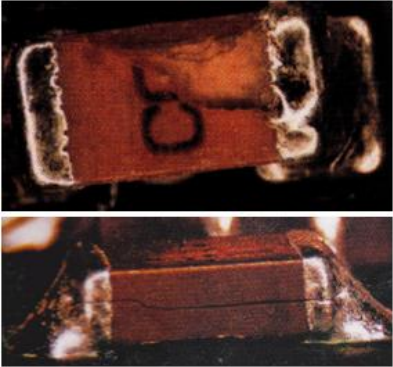
- Součástka nesmí být našikmo
- Součástky, které mají být osazeny nad povrchem desky, nesmí být níže než 1,5 mm
- Součástky nesmí porušit minimální elektrickou izolační vzdálenost
- Výška součástky musí splňovat požadavky na rozměr, sestavitelnost a funkci
- Vyčnívání vývodů nesmí porušovat minimální elektrickou izolační vzdálenost
- Vyčnívání vývodů nesmí překročit maximální výšku požadovanou návrhem
- Vývod nesmí být zahnutý směrem k elektricky živému vodiči a porušovat minimální elektrickou izolační vzdálenost



**Obr. 44.:** Zahnutí vývodu součástky

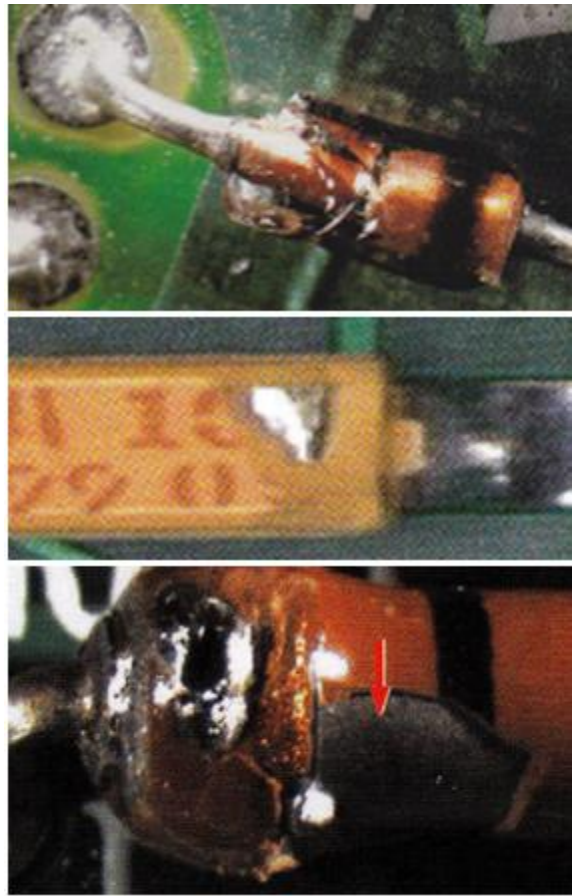
SOUČÁSTKY DIP/SIP A PATICE (DVOUŘADÁ POUZDRA (DIP), JEDNOŘADÁ POUZDRA (SIP))	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Součástka nesmí být nakloněna</li> </ul>	 <p><b>Obr. 45.:</b> Naklonění součástky [10]</p>
PŘEKÁŽKA ZAPLNĚNÍ OTVORU	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Součástky nesmí být namontovány tak, aby porušily minimální elektrickou izolační vzdálenost</li> </ul>	

## 2.5. Vizuální kontrola desky – součástky

ZTRÁTA POKOVENÍ A DIFÚZNÍ ROZPOUŠTĚNÍ	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Difúzní rozpouštění konce terminálu nesmí odhalovat keramiku</li> <li>- Difúzní rozpouštění nesmí přesahovat 25 % šířky součástky nebo tloušťky součástky</li> <li>- Ztráta pokovení nesmí přesahovat 50 % horní části</li> </ul>	 <p><b>Obr. 46.:</b> Ztráta pokovení [10]</p>
ODPOROVÝ ČIPOVÝ PRVEK - ZÁVADY	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nesmí dojít k jakémukoliv vyštípnutí</li> </ul>	 <p><b>Obr. 47.:</b> Vyštípnutí – nesmí nastat [10]</p>
ČIPOVÉ SOUČÁSTKY - ZÁVADY	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vyštípnutí nebo vryp nesmí odhalovat elektrody</li> <li>- Vyštípnutí nesmí překročit 50 % délky, 25 % šířky a 25 % tloušťky součástky</li> <li>- Součástky se skleněným tělem nesmí být jakkoliv poškozeny</li> <li>- Nesmí být zřetelné praskliny nebo poškození v důsledku namáhání/únavové trhliny</li> </ul>	 <p><b>Obr. 48.:</b> Příklad vyštípnutí (nahore) a praskliny (dole) [10]</p>

## VÝVODOVÉ/BEZVÝVODOVÉ SOUČÁSTKY

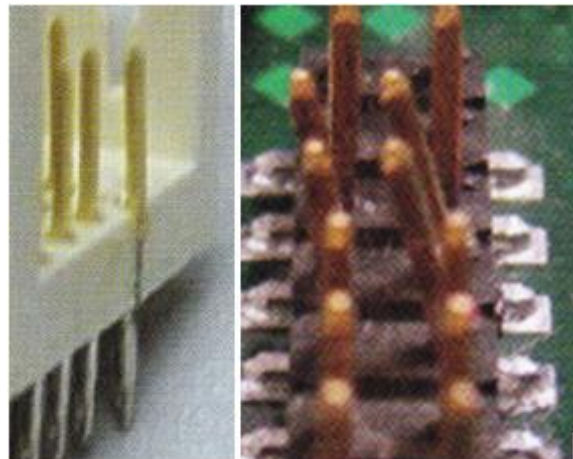
- Vyštípnutí nebo prasklina nesmí zasahovat do těsnění
- Vyštípnutí nebo prasklina nesmí odhalovat vývod
- Vyštípnutí nebo prasklina nesmí odhalovat funkční prvek nebo ohrožovat celistvost součástky
- Nesmí být praskliny vedoucí od vyštípnutí na tělo keramické součástky
- Vyštípnutí nebo prasklina nesmí být u součástek se skleněným tělem
- Izolační kryt nesmí být poškozen tak, aby byl vidět vnitřní funkční prvek, nebo deformace tvaru součástky



**Obr. 49.:** Příklady vyštípnutí – nesmí nastat [10]

## KONEKTORY

- Nesmí být žádné praskliny nebo jiné deformace ovlivňující mechanickou integritu nebo funkčnost pouzdra
- Nesmí být žádné praskliny na rozhraní postranní stěny a báze
- Nesmí být zřetelné spálení nebo zuhelnatění
- Nesmí být jakékoliv změny tvaru, vyštípnutí, škrábanců, nastavení nebo jiné poškození ovlivňující rozměry, sestavitelnost nebo funkci
- Kolíky nesmí být mimo osu o více než 25 % tloušťky průměru



**Obr. 50.:** Příklad poškození konektoru [10]

### 3. PRAKTICKÁ ČÁST DESIGN OF EXPERIMENTS

Podle teorie se experimentální procedura skládá z plánování experimentu, navrhování experimentu, provedení experimentu, analýzy experimentu a ověřovacích testů.

K uskutečnění experimentu byla vybrána DPS, se kterou jsou ve výrobě problémy při přechodu z olovnaté pájecí slitiny na bezolovnatou pájecí slitinu, a je zapotřebí tento proces výroby optimalizovat.

Charakteristika vybrané DPS je následující. Jedná se o desku, která je jednostranně osazená kombinovanou montáží (povrchová (SMD) i vývodová), deska osazená nejdříve SMD součástkami do pájecí pasty a pájena přetavením a následně osazena vývodovými součástkami a pájena vlnou. Použitý materiál na desku je FR4, deska je dvouvrstvá s nepájivou maskou a servisním potiskem, povrchová úprava desky je HAL. Rozměry DPS jsou 9x25 cm.

Strojní vlna je od firmy ERSA. Původní nastavení na vybraný typ DPS, na které byl proveden experiment, je uvedeno v Tab. 5. Strojní vlna používá prstový dopravník, na kterém jsou DPS umístěné v rámečcích. Používané tavidlo je Kester 979 a pájka SN100C.

*Tab. 5.: Nastavení strojní vlny ERSA*

Rychlost dopravníku	[cm/min]	110
Výkon čerpadla pro nástřik tavidla	[%]	24
Průtokoměr tavidla	[ml]	11 ± 3
Spodní předehřev – plotna	[°C]	320
	[%]	50
Spodní předehřev – horkovzduch	[°C]	200
Spodní předehřev – IR předehřev	[%]	60
Horní předehřev	[°C]	200
	[%]	50
Teplota pájky	[°C]	265
Hlavní vlna	[%]	65
Čipová vlna	[%]	25

### 3.1. Plánování experimentu na vybraný typ DPS

Plánování experimentu slouží k tomu, aby byly definované všechny potřebné vstupy a výstupy pro návrh experimentu.

Při plánování experimentu byly určeny vstupy a výstupy. Jako výstup je použita kontrola kvality na DPS podle normy IPC-A-610E CZ. Jako vstupy byly určeny parametry pro strojní pájení vlnou, které se dají ve výrobě nastavovat. A mohou mít vliv na kontrolu kvality.

Po domluvě s odborným vedením ve firmě a vedoucím práce, byly jako faktory vybrány: tavidlo, přehřev a čipová vlna. Byly určeny jejich úrovně a jejich nastavení (Tab. 6.).

**Tab. 6.:** Faktory, jejich úrovně a nastavení hodnot

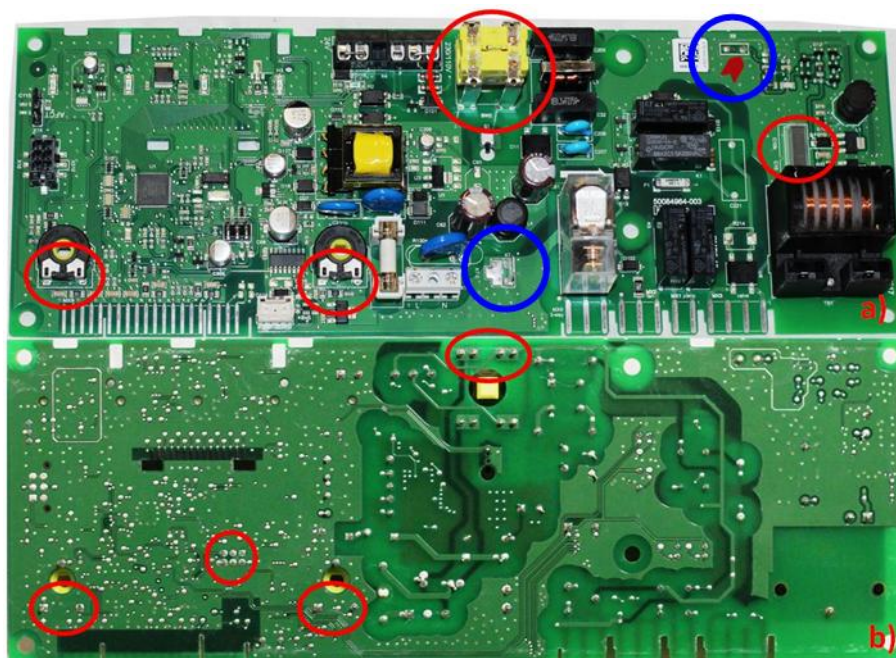
A => Tavidlo			B => Přehřev			C => Čipová vlna	
Úroveň	Posun	Hodnota	Úroveň	Posun	Hodnota	Úroveň	Hodnota
1.	-10 %	20 %	1.	-30 %	0 %	1.	Zapnuto
2.	S*	30 %	2.	S*	30 %	2.	Vypnuto
3.	+10 %	40 %	3.	+30 %	60 %	3.	-

Vysvětlivky:  
S\* - stávající nastavení procesu, hodnoty +- udávají zvýšení, či snížení vůči stávající hodnotě.

Tabulka zobrazuje, že faktor A a B je nastaven na tři úrovně a faktor C jen na dvě. U faktoru A a B bylo stanoveno, že třetí úroveň bude znázorňovat současné nastavení ve výrobě, úroveň první bude hodnota snížena a druhá úroveň zase zvýšena oproti současné hodnotě. U faktoru B, což je přehřev, se měnila hodnota jen IR přehřevu. Ostatní přehřevy, a to plotna a horkovzduch, zůstaly nastaveny na svých původních hodnotách.

Jako výstup je použita kontrola kvality na DPS podle normy IPC-A-610E CZ. Při plánování experimentu jsme byli firmou upozorněni na problémy s pravidelnými defekty na DPS. Jedná se o propájení switchu, propájení trimru, poškození fóliového kondenzátoru a zkrat na 6 – ti pinovém konektoru. Toto je znázorněno na Obr. 51.

V průběhu návrhu byla firmou dodána ještě informace o problémech propájení součástek X7 a X8. Označeno na Obr. 51. modře.



**Obr. 51.:** Znárodnění výskytu častých chyb na DPS: a) primární strana, b) sekundární strana

Při plánování tohoto experimentu bylo také rozhodnuto, že každý navrhnutý experiment se bude 10x opakovat, aby se co nejvíce vyloučily šumové faktory jako třeba teplota okolí či lidský faktor při vyhodnocování.

### 3.2. Návrh experimentu na vybraný typ DPS

Pro návrh experimentu byla použita soustava L-9, která byla modifikována. Což znamená snížení počtu úrovní z 3 na 2. úrovně. Tato soustava je uvedena v Tab. 7.

**Tab. 7.:** Návrh experimentu L-9

	A	B	C
1.	1	1	1
2.	1	2	2
3.	1	3	1'
4.	2	1	2
5.	2	2	1'
6.	2	3	1
7.	3	1	1'
8.	3	2	1
9.	3	3	2



Protože faktor C má jen dvě úrovně, byla třetí úroveň podle teorie „snížení počtu úrovní“ nahrazena úrovní jedna, což představuje zapnutou čipovou vlnu. Tato úroveň byla vybrána z důvodu, že přesné účinky takto nastaveného faktoru přesně neznáme, zatím co u vypnuté čipové vlny ano.

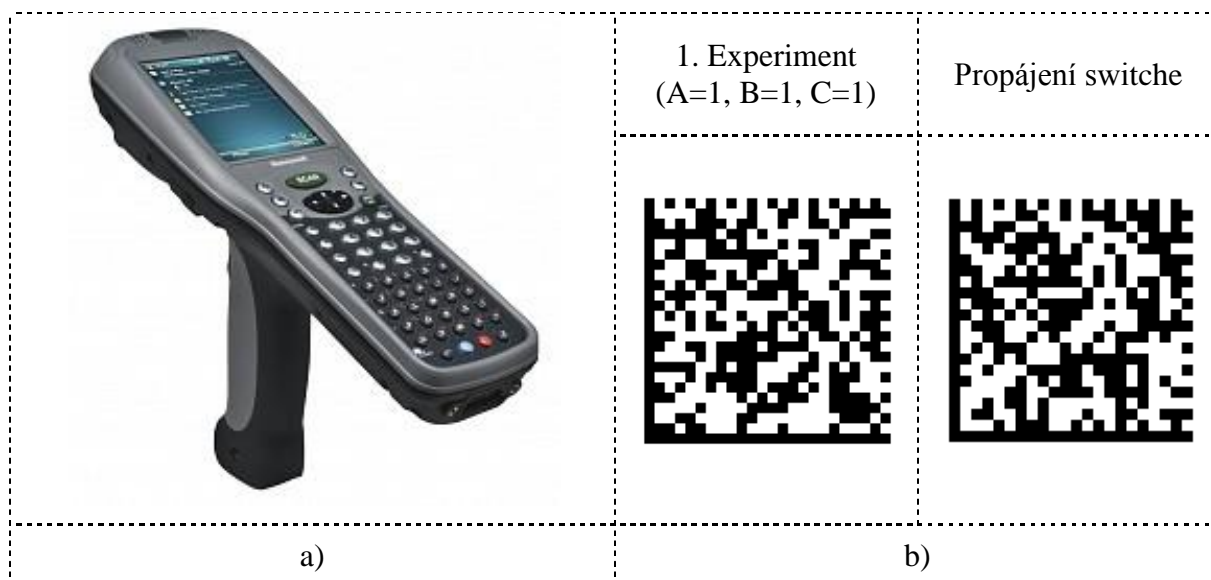
### 3.3. Provedení experimentu na vybraném typu DPS

#### 3.3.1. Postup provedení experimentu

Při plánování experimentu bylo dohodnuto, že se každý experiment bude opakovat 10x. Protože při návrhu experimentu, bylo navrženo devět experimentů, bylo k jeho provedení potřeba využít devadesát desek.

Pro usnadnění práce jsme k zapisování hodnot použili 2D scanner (Obr. 52.: a). Každá DPS je ve výrobě označena 2D kódem, který slouží pro kontrolu výrobních kroků. Aby efektivnost práce byla co největší, byly pro jednotlivé experimenty a hodnocení DPS vytvořeny také 2D kódy (Obr. 52.: b)).

V prvním kroku provedení experimentu, byl naskenován nejdříve 2D kód s číslem experimentu, hned za něj bylo naskenováno deset desek. Takhle proběhl zápis všech desek určených k experimentu.



**Obr. 52.:** a) 2D scanner, b) ukázka 2D kódů vytvořených pro měření

Ve druhém kroku jsme nastavovali jednotlivé návrhy experimentů na strojní vlně. V tabulce (Tab. 8.) Je uvedeno nastavení jednotlivých experimentů.

**Tab. 8.:** Nastavení hodnot jednotlivých experimentů

	A		B		C	
1.	1	20 %	1	0 %	1	Zapnuto
2.	1	20 %	2	30 %	2	Vypnuto
3.	1	20 %	3	60 %	1'	Zapnuto
4.	2	30 %	1	0 %	2	Vypnuto
5.	2	30 %	2	30 %	1'	Zapnuto
6.	2	30 %	3	60 %	1	Zapnuto
7.	3	40 %	1	0 %	1'	Zapnuto
8.	3	40 %	2	30 %	1	Zapnuto
9.	3	40 %	3	60 %	2	Vypnuto

Ve třetím a zároveň posledním kroku celého provedení experimentu jsme vyhodnocovali kvalitu zapájení. Tento krok je uveden níže.

### 3.3.2. Vyhodnocení experimentu

Vyhodnocení provedení experimentu, jak už bylo zmíněno, se provádělo ve třetím kroku samotného provedení experimentu. Vyhodnocování spočívalo v optické kontrole kvality výroby DPS. Ta se určovala podle normy IPC-A-610E CZ, a to přesněji, dle třídy 3.

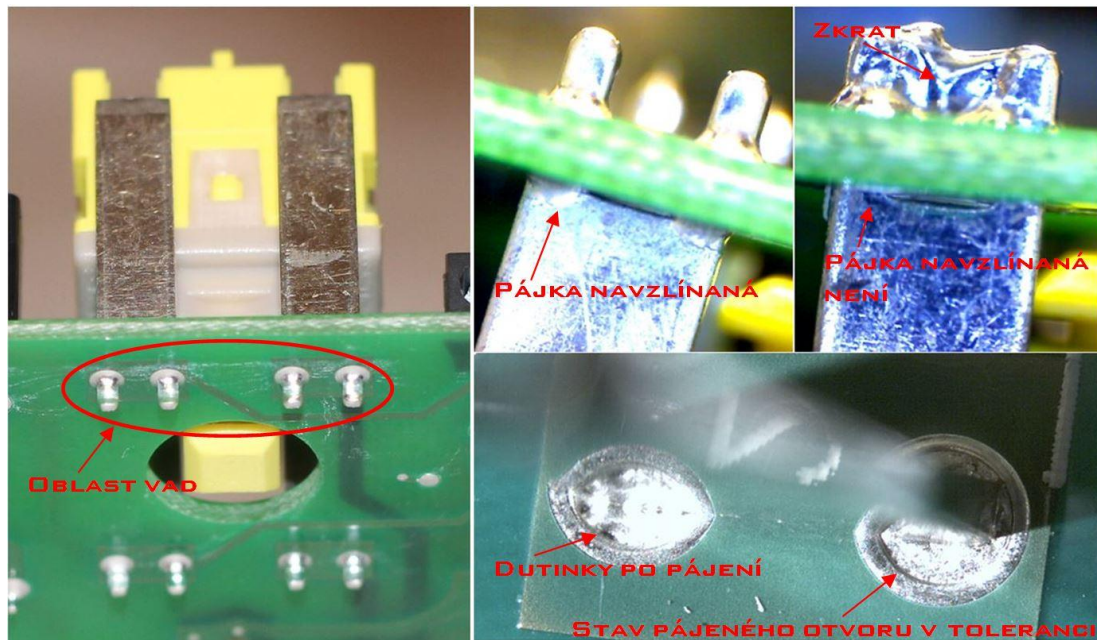
Postup při vyhodnocování byl, naskenovat kód na desce a poté následně naskenovat kódy podle vad nalezených na desce. Hlavní kontrola se zaměřovala na dopředu zmíněné součástky, se kterými byl problém.

**Tab. 9.:** Ukázka tabulky se sesbíranými daty

2. experiment (A=1, B=2, C=2)		
ČÍSLO DESKY	CHYBY	POZNÁMKA
S0667699300522	propojení trimru	
	jiné	x7
	zkrat na 6 pin konektoru	2 piny 1a1
	praporky	
S0667699300660	propojení switche	
	propojení trimru	
	zkrat na 6 pin konektoru	3 piny 2a1
	praporky	

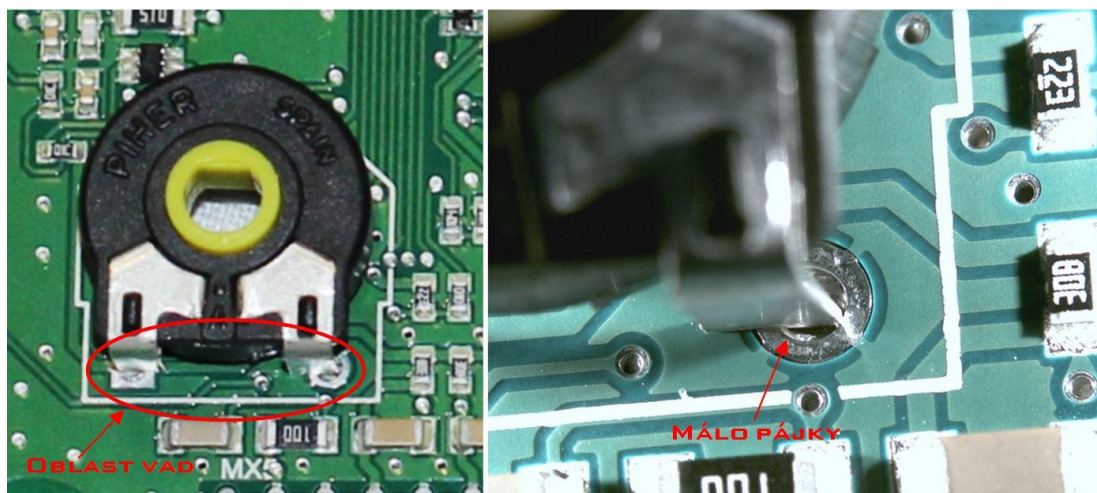
Po vyhodnocení všech desek se sesbírání data v 2D scanneru dala dohromady a vznikly tak přehledné tabulky s určením experimentu, použitých desek a jejich chyb. Ukázka takovéto tabulky je v Tab. 9. Všechny tabulky jsou uvedeny v příloze (Příloha A).

V tabulce (Tab. 9) je možné u chyb vidět „propojení switche“. Na Obr. 53 je uvedeno správné, nesprávné a tolerované zapojení. V obrázku je i zobrazeno umístění oblasti vad u této součástky.



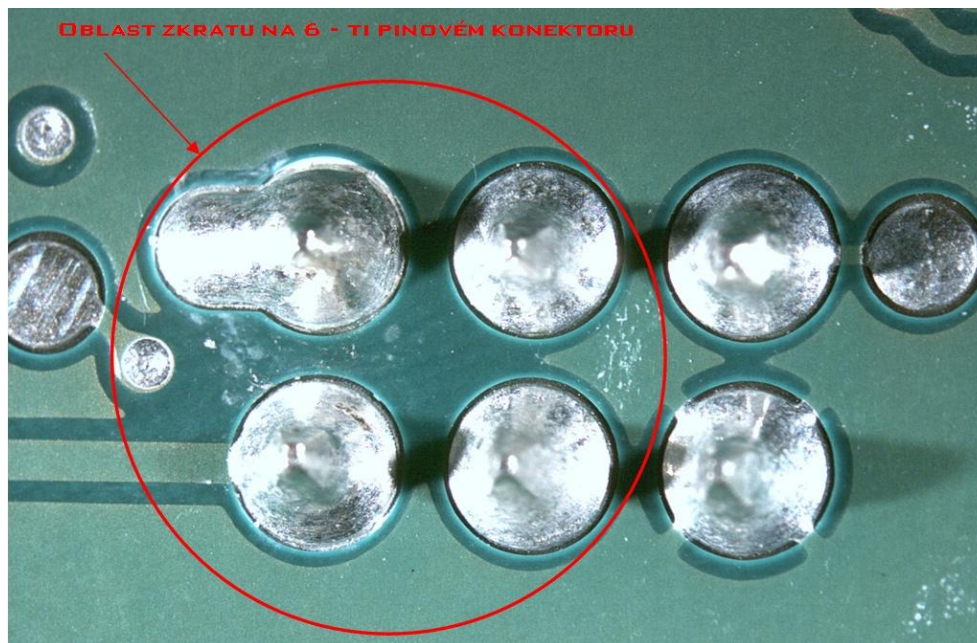
**Obr. 53.:** Oblast vad na switchi a jeho propojení správné, špatné a tolerované

Dále je k vidění „propojení trimru“, i u této součástky je problém se správným nevzlínáním pájky. Na Obr. 54. je viditelná oblast chyb a vyobrazen příklad špatně vyplněného otvoru.



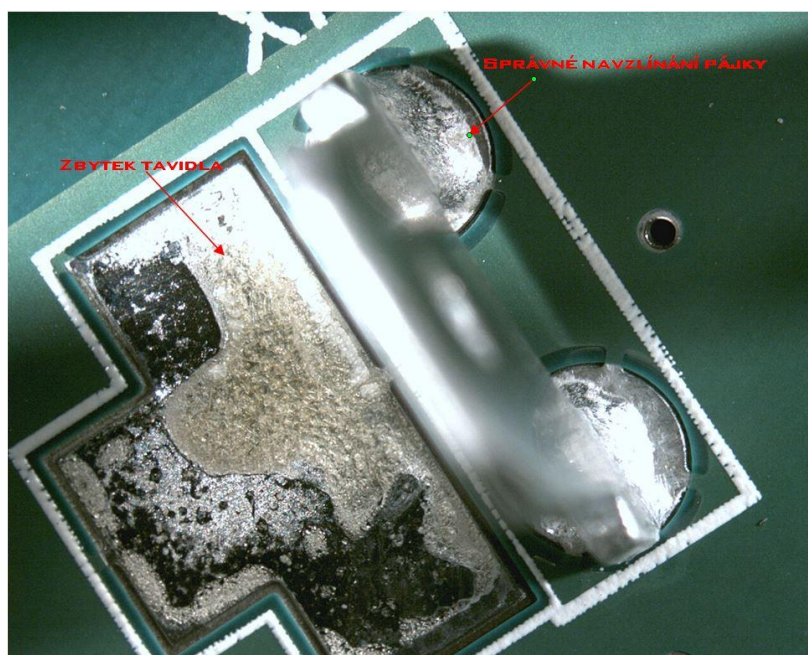
**Obr. 54.:** Oblast vad na trimru a špatné propájení

Oblast zkratu na 6 – ti pinovém konektoru je vidět na Obr. 55. V tabulce (Tab. 9), v poznámce, je uvedeno kolika pinů se zkrat týká. Pravidelně se vyskytuje v označené oblasti.



**Obr. 55.:** Oblast pravidelného výskytu zkratu na 6 – ti pinovém konektoru

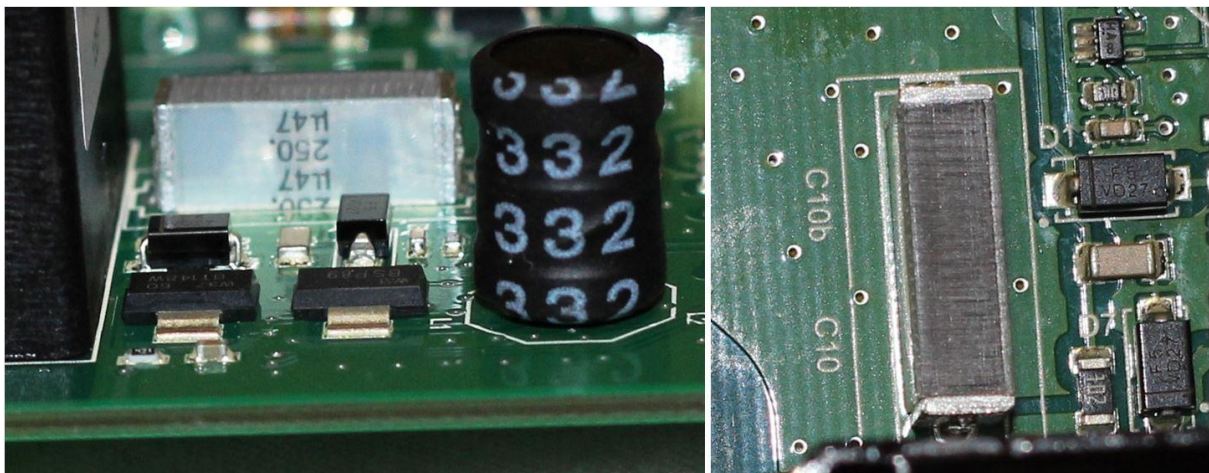
„Jiné“ je v tabulce (Tab. 9) specifikováno v poznámce, ale většinou se jedná o součástku X7 a X8 (Obr. 56.). Problémy jsou hlavně s nedostatečným navzlínáním pájky. Na tomto obrázku je zrovna uveden správný příklad navzlínání pájky, viditelný zbytek tavidla je zanedbatelný a hlavně snadno čistitelný.



**Obr. 56.:** Součástka X7 – správné propájení

Dalším často vyskytujícím se jevem jsou tzv. „Praporky“. Ty se vyskytují na spodní straně desky a podle normy je to závada pro všechny třídy. Tato vada je sice odstranitelná, ale nepřijatelná pro výrobu.

Problémy s fóliovým kondenzátorem (Obr. 57.), které se měly kontrolovat, byly s prasknutím kondenzátoru a odpadnutím některé z jeho stran. Při první kontrole desky se tyto problémy nezjistily a po dodatečné kontrole všech desek na konci měření se zjistilo, že problémy na fóliovém kondenzátoru se žádné neobjevily.



**Obr. 57.:** Fóliový kondenzátor

### **3.4. Analýza experimentu na vybraný typ DPS**

Analýza experimentu je dělána podle daných kroků. V první řadě je potřeba zjistit procentuální účinky jednotlivých faktorů podle Taguchiho metody. Z této analýzy se zjistí, který faktor má hlavní účinek v naplánovaném experimentu. Po vyhotovení této analýzy je potřeba z naplánovaného experimentu vyhotovit plnoplánový experiment. V našem případě byl zvolen plnoplánový dvoufaktorový experiment. Z tohoto plnoplánového experimentu se zjistí, které faktory jsou významné, a které ne.

#### **3.4.1. Procentuální účinky jednotlivých faktorů podle Taguchiho metody**

Analýza experimentu podle Taguchiho metody nám dá procentuální účinky jednotlivých faktorů. Jedná se o nalezení hlavních účinků faktorů, kdy hlavní účinek je vždy procentuálně ten nejvyšší. Postup této analýzy je sepsán níže, a výpočty jsou uvedeny v Excelu na příloženém CD této práce.

Prvním krokem je zapsat do tabulky jednotlivý počet chyb podle tabulek sesbíraných dat z prvního měření (příklad tabulky je v „Tab. 9“). Počet chyb byl počítán:

<i>Nalezená chyba</i>	=	<i>Počet chyb</i>
Propojení switche	=	1
Propojení trimru	=	1
Jiné – X7	=	1
Jiné – X8	=	1
Zkrat – 2piny nebo 2piny 1a1	=	1
Zkrat – 3piny nebo 3piny 2a1	=	2
Zkrat – 4piny nebo 4piny 2a2	=	4
Praporky	=	1
Jiné – nadzvednutá součástka	=	1

Počet chyb se poté sečetl podle názvů nalezených chyb pro jednotlivé experimenty. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v Tab. 10.

**Tab. 10.:** Počet jednotlivých chyb u experimentu

Exp/faktory	A	B	C	Výsledky	Switch	Trimr	X7	X8	Zkrat	Prap.	jiné
1	1	1	1	y1	31	10	6	1	1	0	0
2	1	2	2	y2	19	11	2	1	24	7	0
3	1	3	1'	y3	22	8	0	4	18	9	1
4	2	1	2	y4	20	5	0	2	8	9	1
5	2	2	1'	y5	21	6	0	3	3	8	0
6	2	3	1	y6	24	11	1	5	4	4	1
7	3	1	1'	y7	14	4	1	1	6	3	1
8	3	2	1	y8	31	17	5	2	4	4	0
9	3	3	2	y9	3	2	1	0	5	4	0

POZN.: jiné – je označení pro nadzvednutí součástky

Druhým krokem je vypočítat podle vzorců (5) - (13) procentuální účinky jednotlivých faktorů. Tyto vypočtené hodnoty jsou zapsané do tabulky (Tab. 11).

$$A1 = \left(\frac{y1+y2+y3}{3}\right), A2 = \left(\frac{y4+y5+y6}{3}\right), A3 = \left(\frac{y7+y8+y9}{3}\right) \quad (5)$$

$$B1 = \left(\frac{y1+y4+y7}{3}\right), B2 = \left(\frac{y2+y5+y8}{3}\right), B3 = \left(\frac{y3+y6+y9}{3}\right) \quad (6)$$

$$C1 = \left(\frac{y1+y6+y8}{3}\right), C2 = \left(\frac{y2+y4+y9}{3}\right), C1' = \left(\frac{y3+y5+y7}{3}\right) \quad (7)$$

$$A = |Amax - Amin| \quad (8)$$

$$B = |Bmax - Bmin| \quad (9)$$

$$C = |Cmax - Cmin| \quad (10)$$

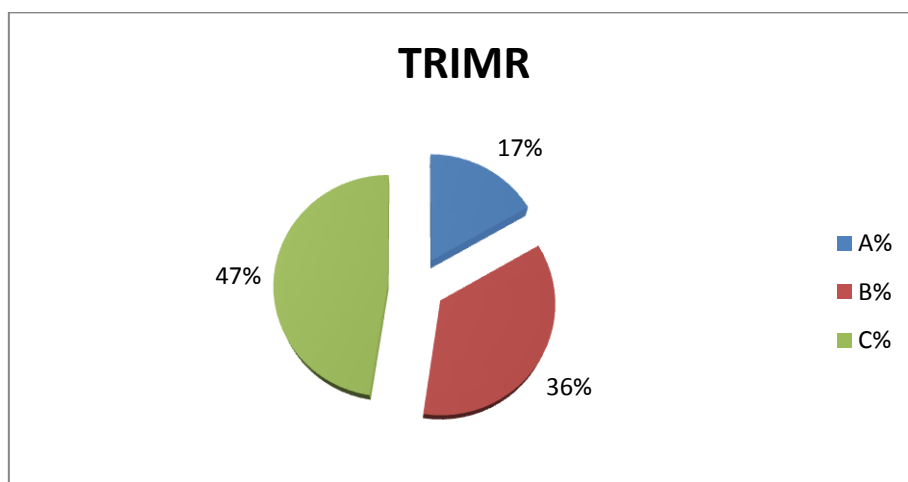
$$A[\%] = \frac{A}{A + B + C} * 100 \quad (11)$$

$$B[\%] = \frac{B}{A + B + C} * 100 \quad (12)$$

$$C[\%] = \frac{C}{A + B + C} * 100 \quad (13)$$

V Tab. 11 jsou hodnoty A1 až A3, z těchto hodnot se vezme nejvyšší a nejnižší hodnota, ale jen v rozmezí jednotlivých chyb. Nejvyšší hodnota se přiřadí hodnotě Amax, a nejnižší hodnotě Amin. To samé se provede pro hodnoty Bmax, Bmin, Cmax a Cmin.

Třetím krokem je zapsané hodnoty z tabulky (Tab. 11) zaznamenat do grafu pro větší přehlednost. Příklad grafu z této analýzy je na obrázku (Obr. 58). Celá tato analýza je uvedena v příloze (Příloha B), kde jsou uvedeny i všechny grafy.



**Obr. 58.:** Příklad grafu procentuálního účinku jednotlivých faktorů

Podle grafů a hodnot z tabulek bylo zjištěno, že hlavní účinek má faktor C, který představuje, zda je či není čipová vlna zapnuta.

*Tab. 11.: Výsledky procentuálních účinků jednotlivých faktorů*

	SWITCH	TRIMR	X7	X8	ZKRAT	PRAP.	JINÉ
<b>A1</b>	24,00	9,67	2,67	2,00	14,33	5,33	0,33
<b>A2</b>	21,67	7,33	0,33	3,33	5,00	7,00	0,67
<b>A3</b>	16,00	7,67	2,33	1,00	5,00	3,67	0,33
<b>Amax</b>	24,00	9,67	2,67	3,33	14,33	7,00	0,67
<b>Amin</b>	16,00	7,33	0,33	1,00	5,00	3,67	0,33
<b>B1</b>	21,67	6,33	2,33	1,33	5,00	4,00	0,67
<b>B2</b>	23,67	11,33	2,33	2,00	10,33	6,33	0,00
<b>B3</b>	16,33	7,00	0,67	3,00	9,00	5,67	0,67
<b>Bmax</b>	23,67	11,33	2,33	3,00	10,33	6,33	0,67
<b>Bmin</b>	16,33	6,33	0,67	1,33	5,00	4,00	0,00
<b>C1</b>	28,67	12,67	4,00	2,67	3,00	2,67	0,33
<b>C2</b>	14,00	6,00	1,00	1,00	12,33	6,67	0,33
<b>C1'</b>	19,00	6,00	0,33	2,67	9,00	6,67	0,67
<b>Cmax</b>	28,67	12,67	4,00	2,67	12,33	6,67	0,67
<b>Cmin</b>	14,00	6,00	0,33	1,00	3,00	2,67	0,33
<b>A</b>	8,00	2,34	2,34	2,33	9,33	3,33	0,34
<b>B</b>	7,34	5,00	1,66	1,67	5,33	2,33	0,67
<b>C</b>	14,67	6,67	3,67	1,67	9,33	4,00	0,34
<b>A[%]</b>	26,66	16,70	30,50	41,09	38,89	34,47	25,19
<b>B[%]</b>	24,46	35,69	21,67	29,45	22,22	24,12	49,63
<b>C[%]</b>	48,88	47,61	47,83	29,45	38,89	41,41	25,19
	<b>VŠE</b>			<b>VŠE – BEZ JINÉ</b>			
<b>A[%]</b>	30,50			31,39			
<b>B[%]</b>	29,61			26,27			
<b>C[%]</b>	39,89			42,35			



### 3.4.2. Analýza ANOVA

Analýza ANOVA nám určí, který z faktorů je významný, nevýznamný nebo na hranici významnosti. Postup této analýzy je sepsán níže, a výpočty jsou uvedeny v Excelu na příloženém CD této práce.

V rámci této analýzy je potřeba upravit původní experiment na plnoplánový dvoufaktorový tříúrovňový experiment. Takto upravený experiment i s naměřenými hodnotami chyb je v Tab. 12.

**Tab. 12.:** Upravený experiment a hodnoty pro výpočet analýzy ANOVA

	A1			A2			A3		
	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3
01	3	2	5	2	2	4	3	6	3
02	5	10	6	6	7	6	8	7	2
03	4	2	9	1	7	2	0	10	0
04	7	6	5	4	6	8	5	8	4
05	2	4	1	3	2	3	2	4	1
06	6	5	8	6	1	9	1	7	2
07	6	11	3	7	2	1	1	6	0
08	6	9	12	6	7	8	1	5	1
09	6	6	2	3	1	1	5	5	0
10	4	9	11	7	6	8	4	5	2
$\Sigma$	49	64	62	45	41	50	30	63	15
$\mu_{ij}$	4,9	6,4	6,2	4,5	4,1	5,0	3,0	6,3	1,5
$\sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \mu_{ij})$	22,9	94,4	125,6	42,5	64,9	90,0	56,0	28,1	16,5

Hodnoty v Tab. 12 jsou potřeba pro výpočet vzorců (14) - (29). Poslední dva řádky v tabulce jsou dopočítány podle vzorců.

$$\mu_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad (14)$$

$$\mu = \frac{1}{IJ} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \mu_{ij} \quad (15)$$

$$\alpha_i = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \mu_{ij} - \mu \quad (16)$$

$$\beta_j = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \mu_{ij} - \mu \quad (17)$$

$$\tau_{ij} = \mu_{ij} - \mu - \alpha_i - \beta_j \quad (18)$$

$$S_A = nJ \sum_{i=1}^I \alpha_i^2 \quad (19)$$

$$S_B = nI \sum_{j=1}^J \beta_j^2 \quad (20)$$

$$S_{AB} = n \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \tau_{ij}^2 \quad (21)$$

$$S_R = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \mu_{ij})^2 \quad (22)$$

$$M_A = \frac{S_A}{I - 1} \quad (23)$$

$$M_B = \frac{S_B}{J - 1} \quad (24)$$

$$M_{AB} = \frac{S_{AB}}{(I - 1)(J - 1)} \quad (25)$$

$$M_R = \frac{S_R}{IJ(n - 1)} \quad (26)$$

$$F_A = \frac{M_A}{M_R} \quad (27)$$

$$F_B = \frac{M_B}{M_R} \quad (28)$$

$$F_{AB} = \frac{M_{AB}}{M_R} \quad (29)$$

Podle vzorců (14) - (29) jsme vypočítali potřebné hodnoty, které jsou uvedeny v Tab. 13 a Tab. 14. Nejdůležitější z těchto hodnot je F-kritérium, které určuje významnost vlivu faktoru.

Tab. 13.: Pomocné výpočty podle vzorců (15) - (18)

$\alpha_1 = -0,52222$	$\alpha_1^2 = 0,27272$	$\beta_1 = 1,17778$	$\beta_1^2 = 1,38716$
$\alpha_2 = 0,94444$	$\alpha_2^2 = 0,89198$	$\beta_2 = -0,12222$	$\beta_2^2 = 0,01494$
$\alpha_3 = -0,42222$	$\alpha_3^2 = 0,17827$	$\beta_3 = -1,05556$	$\beta_3^2 = 1,11420$
$\mu = 4,7$			
$\tau_{ij}$	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>B3</b>
<b>A1</b>	-0,4	2,4	3,1
<b>A2</b>	-2,3	-1,4	0,5
<b>A3</b>	-2,4	2,2	-1,7
$\tau_{ij}^2$	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>B3</b>
<b>A1</b>	0,2	5,7	9,7
<b>A2</b>	5,2	1,9	0,2
<b>A3</b>	5,8	4,8	2,8

Tab. 14.: Analýza ANOVA

$S_A = 40,28889$	$S_B = 75,48889$	$S_{AB} = 363,37778$	$S_R = 540,9$
$M_A = 20,14444$	$M_B = 37,74444$	$M_{AB} = 90,84444$	$M_R = 6,67778$
$F_A = 3,01664$	$F_B = 5,65225$	$F_{AB} = 13,60399$	

Vypočítané hodnoty F-kritéria v Tab. 14 v posledním řádku musíme porovnat se statistickými tabulkami.

Pro faktor A je kritická hodnota F-rozdělení pro porovnání:

$$F_\alpha(I - 1, IJ(n - 1)) \quad (30)$$

Pro faktor B je kritická hodnota F-rozdělení pro porovnání:

$$F_\alpha(J - 1, IJ(n - 1)) \quad (31)$$

Pro interakci AB je kritická hodnota F-rozdělení pro porovnání:

$$F_\alpha((I - 1)(J - 1), IJ(n - 1)) \quad (32)$$

**Tab. 15.:** Hodnoty k porovnání vypočteného F-kritéria a statistických tabulek

			$F_{0,01}$	$F_{0,025}$	Vypočtené
Faktor A	$F_{\alpha}(I - 1, IJ(n - 1))$	$F_{\alpha}(2,81)$	5,6652	3,8643	$F_A = 3,01664$
Faktor B	$F_{\alpha}(J - 1, IJ(n - 1))$	$F_{\alpha}(2,81)$	5,6652	3,8643	$F_B = 5,65225$
Interakce AB	$F_{\alpha}((I - 1)(J - 1), IJ(n - 1))$	$F_{\alpha}(4,81)$	3,5631	2,9504	$F_{AB} = 13,60399$

Hodnoty k porovnání vypočteného F-kritéria a statistických tabulek je v Tab. 15. Vliv faktoru A je nevýznamný, protože vypočtená hodnota  $F_A$  je menší než hodnoty ze statistických tabulek pro hladinu významnosti  $F_{0,01}$  a  $F_{0,025}$ . Vliv faktoru B je na hranici významnosti, protože hodnota  $F_B$  je menší než hodnota ze statistických tabulek pro hladinu významnosti  $F_{0,01}$ , ale je větší než hodnota pro hladinu významnosti  $F_{0,025}$ . Vliv interakce AB je významný, protože vypočtená hodnota  $F_{AB}$  je větší než hodnoty ze statistických tabulek pro hladinu významnosti  $F_{0,01}$  a  $F_{0,025}$ . Přestože faktor B je větší nebo menší podle zvolené hladiny významnosti, což znamená, že je hraniční, pro tento příklad ho budeme brát jako významný.

### 3.5. Ověřovací testy

Podle výsledků analýzy procentuálních účinků jednotlivých faktorů se provedl test měření tavidla a test na ionizovatelné nečistoty. Dále byl proveden i test měření teploty.

#### 3.5.1. Měření tavidla

Tento test slouží k zjištění obsahu sušiny tavidla a určení doporučeného nastavení nanášeného množství tavidla podle katalogového listu. Test byl proveden ve výrobě. K zjištění obsahu sušiny byl použit papír, který se zvážil, poté na něho bylo naneseno tavidlo a po vysušení byl znovu zvážen. Rozdíl mezi váženými hodnotami nám dal hmotnost tavidla. Poté se dopočítal obsah sušiny. V Tab. 16 jsou uvedeny podmínky, za kterých bylo měřeno a pomocné hodnoty pro výpočty.

**Tab. 16.:** Podmínky měření a pomocné hodnoty pro výpočty

		1. měření	Měření ve výrobě	2. měření	Hmotnost sponky	Plocha papíru A4
Teplota	[°C]	22	24,6	22	[g]	[cm <sup>2</sup> ]
Vlhkost	[%]	50	40,7	45	0,5242	623,7

**Tab. 17.: Naměřené a vypočtené hodnoty měření tavidla**

číslo papíru	A		B		C		D	E	F	G	
	A1	A2	B1	B2							
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[μg]	[μg/cm <sup>2</sup> ]	[%]	[μg/cm <sup>2</sup> ]	[ml]	
1	5,4331	4,9089	5,5840	5,0598	0,1509	150 900	241,9432	20	235,58335	6,7	
2	5,4809	4,9567	5,6238	5,0996	0,1429	142 900	229,1166	20			
3	5,4867	4,9625	5,6337	5,1095	0,1470	147 000	235,6902	20			
4	5,4661	4,9419	5,6848	5,1606	0,2187	218 700	350,6494	25	365,66725	9,7	
5	5,5186	4,9944	5,7478	5,2236	0,2292	229 200	367,4844	25			
6	5,4679	4,9437	5,7042	5,1800	0,2363	236 300	378,8680	25			
7	5,4730	4,9488	5,7332	5,2090	0,2602	260 200	417,1878	30	413,66041	12,7	
8	5,4838	4,9596	5,7346	5,2104	0,2508	250 800	402,1164	30			
9	5,4923	4,9681	5,7553	5,2311	0,2630	263 000	421,6771	30			
10	5,4740	4,9498	5,7508	5,2266	0,2768	276 800	443,8031	35	458,87446	15,4	
11	5,5252	5,0010	5,8208	5,2966	0,2956	295 600	473,9458	35			
12	5,4640	4,9398	5,6310	5,1068	0,1670	167 000	267,7569	35 (1. směr)	-	490,13949	17,6
13	5,4313	4,9071	5,7433	5,2191	0,3120	312 000	500,2405	40			
14	5,4746	4,9504	5,7740	5,2498	0,2994	299 400	480,0385	40			
15	5,4606	4,9364	5,6463	5,1221	0,1857	185 700	297,7393	40 (1. směr)	-		
<p><b>POZNÁMKA.:</b></p> <p>A. Hmotnost před nanesením tavidla  A1. Hmotnost se sponkou  A2. Hmotnost bez sponky  B. Hmotnost po nanesení tavidla  B1. Hmotnost se sponkou  B2. Hmotnost bez sponky</p> <p>C. Hmotnost tavidla  D. Obsah sušiny  E. Nastavení nanášeného množství tavidla nástřikem  F. Průměrná hodnota obsahu sušiny  G. Množství naneseného tavidla</p>											

V prvním měření byly papíry očíslovány a zváženy. Vážení probíhalo po aklimatizaci papírů, ta trvala 1 hodinu. V měření ve výrobě byly papíry připevněny na desku, nechaly se projet nástřikem tavidla, poté se vytáhly a nechaly se vyschnout na vzduchu. Nástřik tavidla byl nastaven na hodnoty 20, 25, 30, 35 a 40 %. V druhém měření byly po aklimatizaci (1 hodina) papíry zváženy. A podle vzorce dopočítány hodnoty obsahu sušiny. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou zaznamenány v Tab. 17.

Příklad výpočtu hodnot pro papír číslo 1.:

$$A2 = A1 - 0,5242 = 5,4331 - 0,5242 = 4,9089 \text{ g}$$

$$B2 = B1 - 0,5242 = 5,5840 - 0,5242 = 5,0598 \text{ g}$$

$$C = B2 - A2 = 5,0598 - 4,9089 = 0,1509 \text{ g} = 150900 \text{ } \mu\text{g}$$

$$D = \frac{C}{623,7} = \frac{150900}{623,7} = 241,9432 \text{ } \mu\text{g/cm}^2$$

Průměrná hodnota obsahu sušiny se potom vypočítá jako průměr hodnot obsahu sušiny tavidla podle nastavení tavidla. Použité tavidlo je „Kester 979“ a podle katalogového listu je doporučené nastavení 120 – 240 [ $\mu\text{g/cm}^2$ ]. Této hodnotě odpovídá nastavení tavidla na hodnotu 20 % v Tab. 17 je označena zeleně. Všechny výpočty jsou uvedeny v Excelu na příloženém CD této práce.

### 3.5.2. Ionizovatelné nečistoty

Ionizovatelné nečistoty neboli kontaminace DPS se měří pro zjištění jejího vlivu na kvalitu a spolehlivost pájeného spoje. Čím větší je kontaminace, tím horší je spolehlivost pájeného spoje a může být příčinou mnohých defektů v případě tzv. kondenzačních stavů.

Ionizovatelné nečistoty jsme měřili metodou ROSE (*Resistivity of Solvent Extraction*). Měření se provádí v roztoku izopropylalkoholu a deionizované vody v poměru 75 %/25 %. Roztok je umístěn v nádobě, do které je přiváděn plynný dusík. Pomocí měřicí elektrody je změřena počáteční vodivost, poté je do nádoby vložen měřený vzorek. Plynný dusík, který je přiváděn do nádoby pomáhá uvolňovat ionizovatelné i neionizovatelné nečistoty. Po minimální době 20 - ti minut se znovu změří vodivost (konečná vodivost). Při celém procesu měření nesmí dojít ke kontaktu ruky s měřeným vzorkem, protože by se mohly na vzorky přenést další nečistoty, čímž by došlo k ovlivnění výsledků a k možnému špatnému vyhodnocení měření. Kontaminace DPS (ionizované nečistoty) se poté dopočítají podle vzorce (33).

$$Z_{PS} = \frac{(\gamma_1 - \gamma_0) \cdot V}{S \cdot k_t} \quad (33)$$

Kde  $Z_{PS}$  je kontaminace DPS (ionizované nečistoty)

$\gamma_0$  je vodivost počáteční

$\gamma_1$  je vodivost konečná

$V$  objem

$S$  plocha DPS (obě strany)

$k_t$  směrnice vodivosti pro danou teplotu

Rozměry DPS: 180 × 250 mm

Teplota: 24,2 °C

Směrnice vodivosti pro měření:  $k_{24} = 0,44$

**Tab. 18.:** Naměřené a vypočítané hodnoty ionizovatelných nečistot

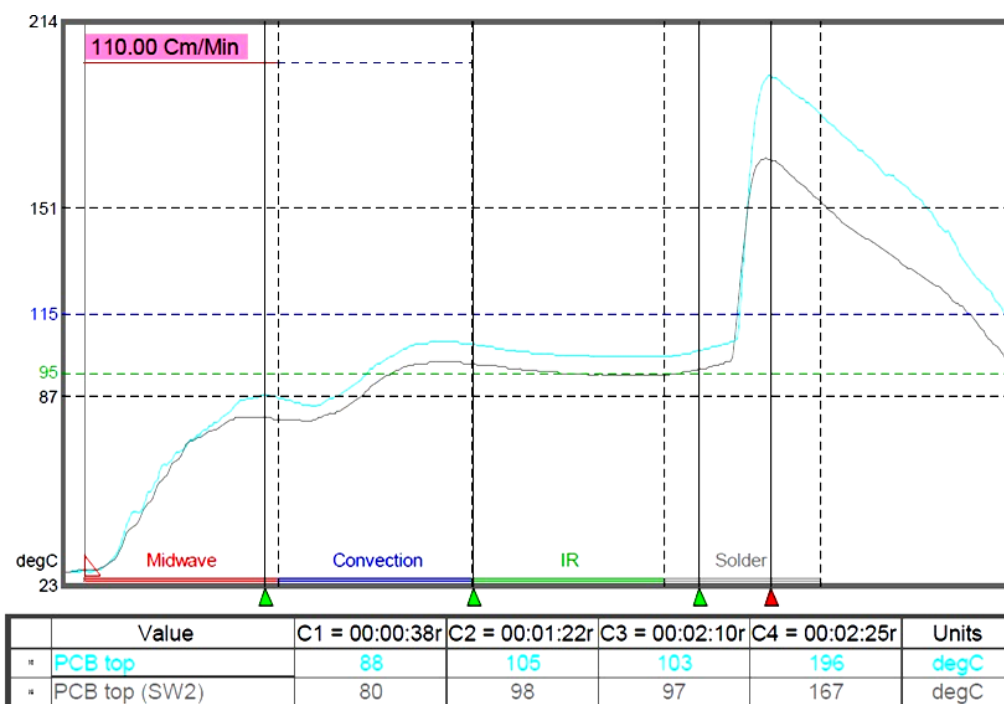
DPS	TAV		$\gamma_0$	$\gamma_1$	$V$	$S$	$Z_{PS}$
[č.]	[%]	[ml]	$[\mu\text{Scm}^{-1}]$	$[\mu\text{Scm}^{-1}]$	$[\text{cm}^3]$	$[\text{cm}^2]$	$[\mu\text{gNaClcm}^{-2}]$
Ref.	0	0	0,05	0,09	2820	900	0,28
1	20	6,7	0,03	0,20	3090	900	1,33
2	25	9,7	0,03	0,26	2980	900	1,73
3	30	12,7	0,03	0,28	2940	900	1,86
4	35	15,4	0,03	0,30	2870	900	1,96
5	40	17,6	0,03	0,26	2900	900	1,68

Z vypočtených hodnot jsme zjistili, že nejnižší hodnota kontaminace DPS je při použití nastavení nástřiku tavidla 20 % a nejvyšší při použití nastavení nástřiku tavidla 35 %. Při použití nastavení nástřiku tavidla 40 % došlo k poklesu ionizovatelných nečistot, což mohlo být způsobeno nerovnoměrným nástřikem tavidla na DPS. Podle normy IPC-TM-650 je doporučena maximální kontaminace DPS a to  $1,56 \mu\text{gNaClcm}^{-2}$ . Po zhodnocení výsledků odpovídá povolenému limitu DPS č. 1 s nastavením nástřiku tavidla 20 %.

### 3.5.3. Měření teploty

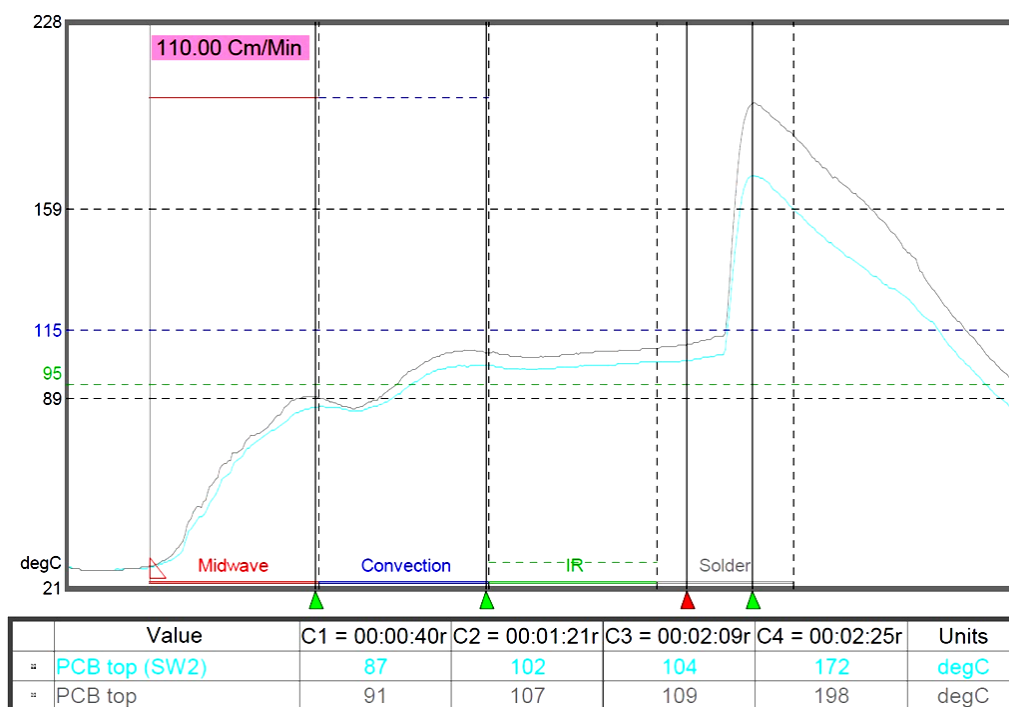
Měření teploty předehřevu probíhalo na horní straně desky pomocí dvou termočláneků. Jeden termočlánek byl umístěn přibližně doprostřed desky, druhý byl umístěn k součástce switch. Při měření teplot bylo použité nastavení předehřevů z experimentu, což je 0 %, 30 % a 60 %. Optimálně by měly být naměřené teplotní profily obou termočláneků identické.

Teplotní profil změřený pro nastavení předehřevu na 0 % je zobrazen na Obr. 59. V tomto teplotním profilu je šedá křivka pro termočlánek umístěný u switche. Nejdůležitější hodnoty měření jsou u přechodu předehřevu do pájecí vlny, pro termočlánek u switche je to 97°C a pro termočlánek umístěný uprostřed desky je to 103°C.



**Obr. 59.:** Teplotní profil pro nastavení předehřevu na 0%

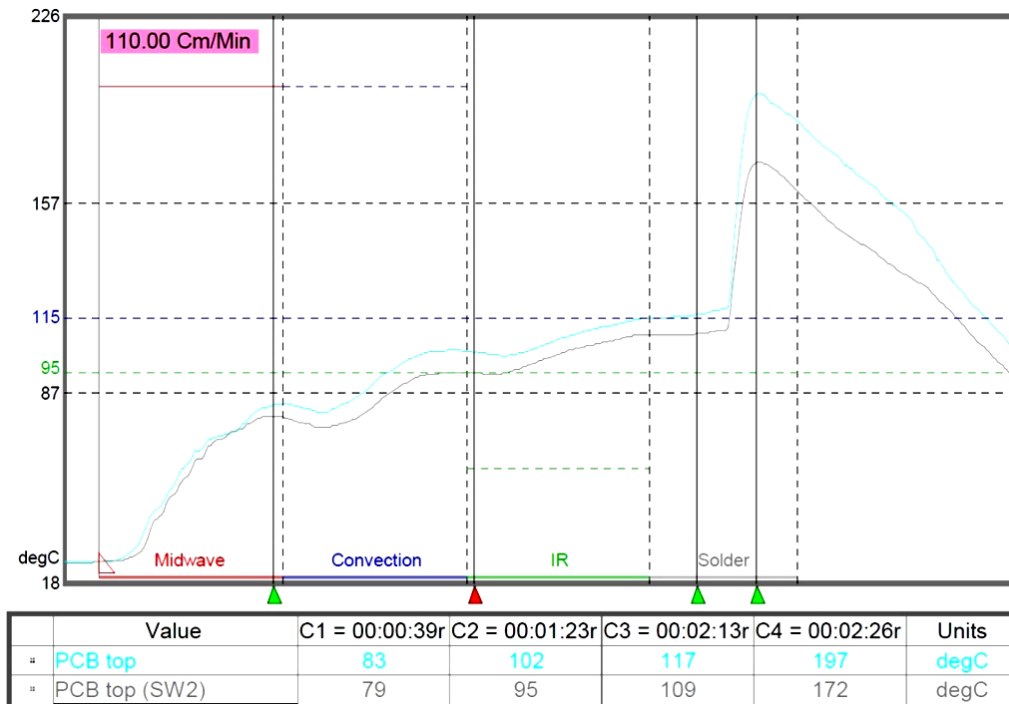
Teplotní profil změřený pro nastavení předehřevu na 30 % je zobrazen na Obr. 60. V tomto teplotním profilu je šedá křivka pro termočlánek umístěný uprostřed desky. Nejdůležitější hodnoty měření jsou u přechodu předehřevu do pájecí vlny, pro termočlánek u switche je to 104°C a pro termočlánek umístěný uprostřed desky je to 109°C.



**Obr. 60.:** Teplotní profil pro nastavení předehřevu na 30%



Teplotní profil změřený pro nastavení přehřevu na 60 % je zobrazen na Obr. 61. V tomto teplotním profilu je šedá křivka pro termočlánek umístěný u switche. Nejdůležitější hodnoty měření jsou u přechodu přehřevu do pájecí vlny, pro termočlánek u switche je to 109°C a pro termočlánek umístěný uprostřed desky je to 117°C.



**Obr. 61.:** Teplotní profil pro nastavení přehřevu na 60%

Na všech teplotních profilech jsou naměřené hodnoty na termočlátku u switche nižší než hodnoty měřené na termočlátku uprostřed desky. Důvodem pro nižší teplotu na termočlátku switche je blízkost pájecího rámu u této součástky.

### 3.6. Diskuze k DOE na vybraný typ DPS

Design of experiment k tomuto měření byl naplánován správně. Ale z důvodů neznalosti provádění analýzy bylo opomenuto naplánování měření interakce AxB. Což zapříčinilo nedostatek dat k provedení analýzy a následného vytvoření modelu, který je důležitý pro optimalizaci nastavení.

Po aplikování této metody a její analýzy, bylo zjištěno, že Taguchiho metoda je nejvhodnější pro více úrovněvý a více faktorový experiment. Touto metodou se zjistí, které faktory mají hlavní účinek a poté se podle zjištěných výsledků naplánuje podrobnější plnoplánový experiment. Ze kterého se zjistí podle analýz optimální nastavení.

Po zhodnocení analýz a provedení ověřujících testů mohou doporučit nastavení podle logického úsudku. Doporučení je v Tab. 19.

*Tab. 19.: Doporučení pro nastavení*

	NASTAVENÍ
TAVIDLO	20 %
PŘEDEHŘEV	45 %
ČIPOVÁ VLNA	ZAPNUTO

## 4. METODIKA ŘEŠENÍ

V této části práce je znázorněn postup při aplikaci Design of Experiments pro plnoplánový dvouúrovňový třífaktorový experiment. Je zde uvedeno doporučené pokračování na optimalizaci výroby. K doporučenému pokračování je v této části uveden už naplánovaný experiment, jeho navrhování a ukázka jeho provedení. Další součástí je analýza experimentu s uvedením teoretického postupu, jak naměřená data analyzovat.

### 4.1. Plánování experimentu

Pro další postup je zvolen plnoplánový dvouúrovňový třífaktorový experiment.

*Vstupy experimentu:* TAVIDLO, PŘEDEHŘEV, ČIPOVÁ VLNA

*Výstup experimentu:* POČET JEDNOTLIVÝCH CHYB (kontrola podle normy IPC-A-610E CZ, třída 2)

*Počet opakování:* 10x

Vstupy experimentu, což jsou faktory, jejich úrovně a nastavení je uvedeno v Tab. 20.

**Tab. 20.:** *Naplánovaný experiment: faktor, úroveň, nastavení*

Faktor A – Tavidlo		Faktor B – Předehřev		Faktor C – Čipová vlna	
Úroveň	Nastavení	Úroveň	Nastavení	Úroveň	Nastavení
1	20 % - Cobar	1	Min. hodnota	1	Zapnuto
2	20 % - AIM	2	Max. hodnota	2	Vypnuto

Faktor A: Tavidlo je zvoleno podle obsahu sušiny. Cobar 396-DRX-M+ má 2,9 % sušiny, AIM Solder NC 277 má 5,86 % sušiny.

Faktor B: Předehřev by měl být nastaven na úrovni 1 na minimální hodnotu, která jde nastavit a na úrovni 2 zase na maximální.

## 4.2. Navrhování experimentu

Pro návrh experimentu je zvolena soustava L8. Ta je uvedena v Tab. 21.

*Tab. 21.: Návrh experimentu*

	A	B	C
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	2	1
4	1	2	2
5	2	1	1
6	2	1	2
7	2	2	1
8	2	2	2

## 4.3. Provedení experimentu

V Tab. 22 je uvedeno nastavení pro jednotlivé naplánované experimenty. Podle této tabulky se poté budou nastavovat hodnoty na strojní vlně.

*Tab. 22.: Nastavení hodnot jednotlivých experimentů*

	A		B		C	
1	1	20 % COBAR	1	MIN	1	Zapnuto
2	1	20 % COBAR	1	MIN	2	Vypnuto
3	1	20 % COBAR	2	MAX	1	Zapnuto
4	1	20 % COBAR	2	MAX	2	Vypnuto
5	2	20 % AIM	1	MIN	1	Zapnuto
6	2	20 % AIM	1	MIN	2	Vypnuto
7	2	20 % AIM	2	MAX	1	Zapnuto
8	2	20 % AIM	2	MAX	2	Vypnuto

#### 4.4. Analýza experimentu

Úloha bude řešena pomocí faktorových experimentů typu  $2^3$  - tedy třífaktorových experimentů, kde každý faktor je ve dvou úrovních.

Faktor A ... reprezentuje tavidlo

Faktor B ... reprezentuje přehřev

Faktor C ... reprezentuje čipovou vlnu

Základní schéma experimentů je uvedeno v Tab. 23.

Tab. 23.: Základní schéma experimentů

$A_1$				$A_2$			
$B_1$		$B_2$		$B_1$		$B_2$	
$C_1$	$C_2$	$C_1$	$C_2$	$C_1$	$C_2$	$C_1$	$C_2$
$A_1B_1C_1$	$A_1B_1C_2$	$A_1B_2C_1$	$A_1B_2C_2$	$A_2B_1C_1$	$A_2B_1C_2$	$A_2B_2C_1$	$A_2B_2C_2$
(1)	$c$	$b$	$bc$	$a$	$ac$	$ab$	$abc$
$y_{1,1}$	$y_{2,1}$	$y_{3,1}$	$y_{4,1}$	$y_{5,1}$	$y_{6,1}$	$y_{7,1}$	$y_{8,1}$
$y_{1,2}$	$y_{2,2}$	$y_{3,2}$	$y_{4,2}$	$y_{5,2}$	$y_{6,2}$	$y_{7,2}$	$y_{8,2}$
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
$y_{1,r}$	$y_{2,r}$	$y_{3,r}$	$y_{4,r}$	$y_{5,r}$	$y_{6,r}$	$y_{7,r}$	$y_{8,r}$
$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$R_8$

zde  $y_{i,j}$  je výsledek experimentu (naměřená hodnota) pro kombinaci faktorů v daném sloupci,  $i$  je číslo sloupce,  $j$  je číslo řádku. Každý experiment je opakován  $r$  – krát.

Zápis v pátém řádku tabulky (1),  $c$ ,  $b$ ,  $bc$ , ...,  $abc$  je symbolický zápis, který se užívá pro odvození. Příslušné veličiny jsou ve finální fázi výpočtu nahrazeny sloupcovými součty  $R_i$ .

Celkový počet experimentů:

$$N = r \cdot 2^n = r \cdot d \quad (34)$$

kde  $r$  je počet řádků

$d$  je počet sloupců.

Veličina  $R_i$  je dána vztahem:

$$R_i = \sum_{j=1}^r y_{i,j} \quad (35)$$

pro  $i = 1, 2, \dots, d = 2^n$ .

Nejprve je třeba stanovit odhad vlivu faktorů a jejich interakcí na sledovaný výstupní parametr. Pro určení odhadu vlivu faktorů a jejich interakcí uijeme znaménkové tabulky (Tab. 24).

**Tab. 24.:** Znaménková tabulka

Odhad efektu	Kombinace							
	(1)	$a$	$b$	$ab$	$c$	$ac$	$bc$	$abc$
$Z_A$	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
$Z_B$	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
$Z_{AB}$	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
$Z_C$	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
$Z_{AC}$	1	-1	1	1	-1	1	-1	1
$Z_{BC}$	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
$Z_{ABC}$	-1	1	1	1	1	-1	-1	1

Např. pro výpočet hodnoty  $Z_A$  použijeme vztahu:

$$Z_A = -1 + a - b + ab - c + ac - bc + abc \quad (36)$$

Pro výpočet číselné hodnoty  $Z_A$  dosadíme namísto veličin  $a, b, ab \dots$  sloupcové součty naměřených hodnot  $R_i$  pro danou veličinu.

Hodnoty ostatních odhadů vlivu a interakcí zjistíme stejným způsobem.

Dále vypočteme součty čtverců odchylek:

$$S_A = \frac{Z_A^2}{d \cdot r} \quad (37)$$

$$S_{AB} = \frac{Z_{AB}^2}{d \cdot r} \quad (38)$$

a analogicky také vypočteme  $S_B, S_C, S_{BC}, S_{AC}$  a  $S_{ABC}$ .

Dále určíme testové charakteristiky pro F-rozdělení pro jednotlivé faktory a interakce:

$$F_A = \frac{S_A}{\frac{S_r}{\nu}} \quad (39)$$

$$F_{AB} = \frac{S_{AB}}{\frac{S_r}{\nu}} \quad (40)$$

kde  $S_r$  je reziduální součet čtverců

$\nu$  je počet stupňů volnosti

a analogicky také vypočteme  $F_B, F_C, F_{BC}, F_{AC}$  a  $F_{ABC}$ .

Reziduální součet čtverců  $S_r$  určíme podle vzorce:

$$S_r = \sum_{i=1}^d \sum_{j=1}^r \left( y_{i,j} - \frac{\sum_{j=1}^r y_{i,j}}{r} \right)^2 \quad (41)$$

Pro počet stupňů volnosti platí vztah:

$$\nu = d \cdot (r - 1) \quad (42)$$

Vypočtené hodnoty testových charakteristik  $F_A, F_B, F_{AB}, F_C, F_{BC}, F_{AC}$  a  $F_{ABC}$  se porovnají s kritickou hodnotou F-rozdělení  $F_\alpha(1, \nu)$ , která se odečte ze statistických tabulek.

Zde  $\alpha$  je hladina významnosti (zpravidla se uvažuje 1 %),  $(1 - \alpha)$  je pravděpodobnost, že se neudělá chyba 1 druhu, tedy že se nepřijme nesprávná hypotéza.

Jestliže je vypočtená hodnota testové charakteristiky **větší** než kritická hodnota F-rozdělení odečtená v tabulce, pak efekt faktoru nebo interakce **je významný a musí být zahrnut** do matematického modelu.

Jestliže je vypočtená hodnota testové charakteristiky **menší** než kritická hodnota F-rozdělení odečtená v tabulce, pak efekt faktoru nebo interakce **není významný a matematický model nejprve ověřujeme bez tohoto faktoru či interakce**.

Dále je třeba vypočíst matematický model procesu. Pro tento výpočet provedeme nejprve transformaci:

$$X_1 = \frac{2}{A_2 - A_1} \cdot \left( A - \frac{A_1 + A_2}{2} \right) \quad (43)$$

zde jsme faktor A transformovali do proměnné  $X_1$ . Analogicky budeme transformovat faktor B do proměnné  $X_2$  a faktor C do proměnné  $X_3$ .

Je zpravidla předpokládán matematický model v obecném tvaru:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \beta_{1,2} X_1 X_2 + \beta_{1,3} X_1 X_3 + \dots + \beta_{n-1,n} X_{n-1} X_n + \beta_{1,2,3} X_1 X_2 X_3 + \dots + \beta_{1,2,\dots,n} X_1 X_2 \dots X_n \quad (44)$$

Pro případ tří faktorů bude mít úplný model tvar:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{1,2} X_1 X_2 + \beta_{1,3} X_1 X_3 + \beta_{2,3} X_2 X_3 + \beta_{1,2,3} X_1 X_2 X_3 \quad (45)$$

Dle zjištěné významnosti faktorů nebo interakcí bude tento model upraven tak, že faktory, nebo interakce, které byly zjištěny v předchozím testování jako statisticky nevýznamné, budou z tohoto modelu vyloučeny.

Pro výpočet koeficientů  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{123}$  platí vztahy:

$$\beta_0 = \frac{1}{d \cdot r} \sum_{i=1}^d \sum_{j=1}^r y_{i,j} \quad (46)$$

$$\beta_1 = \frac{Z_A}{d \cdot r}, \beta_2 = \frac{Z_B}{d \cdot r}, \beta_3 = \frac{Z_C}{d \cdot r} \quad (47)$$

$$\beta_{1,2} = \frac{Z_{AB}}{d \cdot r}, \beta_{1,3} = \frac{Z_{AC}}{d \cdot r}, \beta_{2,3} = \frac{Z_{BC}}{d \cdot r} \quad (48)$$

$$\beta_{1,2,3} = \frac{Z_{ABC}}{d \cdot r} \quad (49)$$

Dále je nutné kvalitu modelu otestovat. Proto je třeba vypočítat testovou charakteristiku:

$$\bar{F} = \frac{\frac{S_S}{d \cdot r - n - 1}}{\frac{S_r}{v}} \quad (50)$$

pro  $d \cdot r > n + 1$ .

Zde celkový součet čtverců odchylek  $S_S$  vypočteme podle vztahu:

$$S_S = \sum_{i=1}^d \sum_{j=1}^r (y_{i,j} - \beta_0 - \beta_1 x_{1,i} - \beta_2 x_{2,i} - \dots - \beta_{1,2,3} x_{1,i} x_{2,i} x_{3,i})^2 \quad (51)$$

a reziduální součet  $S_r$  podle vztahu:



$$S_r = \sum_{i=1}^d \sum_{j=1}^r y_{i,j}^2 - \frac{1}{r} \sum_{i=1}^d R_i^2 = \sum_{i=1}^d \sum_{j=1}^r y_{i,j}^2 - \frac{1}{r} \sum_{i=1}^d \left( \sum_{j=1}^r y_{i,j} \right)^2 = \sum_{i=1}^d \sum_{j=1}^r (y_{i,j} - \bar{y}_i)^2 \quad (52)$$

Pro počet stupňů volnosti platí:

$$F_\alpha = ((d \cdot r - 1), 1) \quad (53)$$

zde  $\alpha$  je opět hladina významnosti.

Je-li hodnota  $\bar{F} < F_\alpha$ , potom je model vyhovující a lze ho použít pro optimalizaci. Je-li  $\bar{F} > F_\alpha$ , pak má model statisticky významnou odchylku od naměřených dat a je třeba ho zpřesnit. To se provádí zpravidla tak, že části modelu, které z něj byly vypuštěny na základě testování odhadu vlivu faktorů na výstupní parametr v první části faktorových experimentů, jsou do něj zařazeny zpět a model je přepočítán. Není-li ani potom vyhovující, je třeba změnit typ modelu.

Jako poslední krok uděláme zpětnou transformaci z proměnných typu  $X$  na technologické faktory  $A$ ,  $B$  a  $C$  s pomocí transformačního vztahu (43).

Dále je třeba nalézt extrém modelu pro požadovanou hodnotu výstupního parametru. Uveďme si tuto optimalizaci na příkladu reálného modelu.

Předpokládejme, že jsme našli model ve tvaru:

$$z = 5 + 3A + 2AB - AC + B^2 + C^2 \quad (54)$$

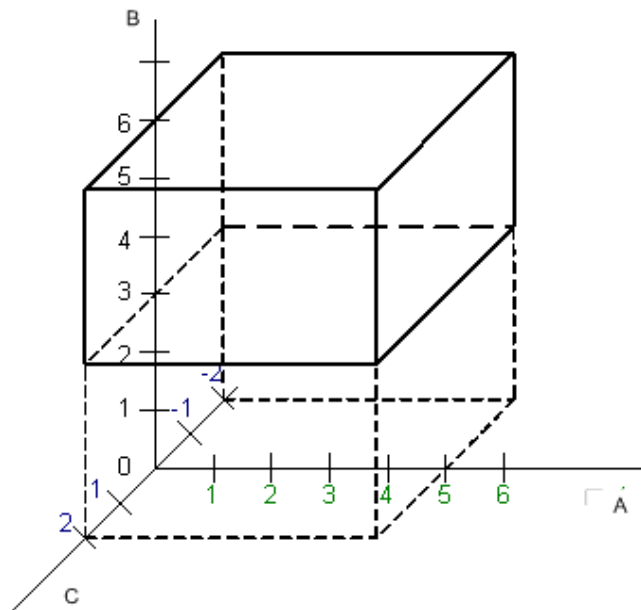
Přitom pro jednotlivé faktory platí následující omezující podmínky:

$$\begin{aligned} 0 &\leq A \leq 5 \\ 3 &\leq B \leq 6 \\ -2 &\leq C \leq 2 \end{aligned} \quad (55)$$

Extrémy hledáme nejprve tak, že položíme rovno nule první parciální derivace účelové funkce dle jednotlivých proměnných. Tak získáme soustavu rovnic:

$$\begin{aligned} 3 + 2B - C &= 0 \\ 2A + 2B &= 0 \\ -A + 2C &= 0 \end{aligned} \quad (56)$$

Řešením uvedených rovnic je bod  $(A = 6/5, B = -6/5, C = 3/5)$ . Tento bod však leží mimo interval hodnot existence technologických faktorů. Proto musíme hledání omezit na tento interval, který si je možné představit jako následující kvádr:



**Obr. 62.:** Kvádr omezujících podmínek faktorů

Nejprve budeme hledat extrém na stěnách kváдру, jako první prohledáme levou stěnu, jejíž rovnice je  $A = 0$ . Pro tuto stěnu má model tvar:

$$Z_1 = 5 + B^2 + C^2 \quad (57)$$

Po výpočtu parciálních derivací dle  $B$  a  $C$ , které položíme rovné nule, dostaneme polohu extrému v bodě  $(0, 0, 0)$ . Tento bod je také mimo přípustnou oblast existence faktorů  $A, B, C$ .

Takto prohledáme všechny stěny kváдру, a pak všechny hrany kváдру. Nakonec vypočteme hodnotu funkce ve vrcholech kváдру. Vždy kontrolujeme, zda vypočtené body leží v oblasti dané omezujícími podmínkami faktorů. V bodech, které jsme našli v kváдру omezujících podmínek, nebo na jeho povrchu, vypočteme hodnoty parametru. Nejvyšší z hodnot je maximum, nejnižší minimum.

Tímto postupem je možné získat extrémy matematického modelu pro model závislý na třech technologických faktorech, což byl náš případ.

## 5. ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo nastudovat odbornou literaturu k strojnímu pájení vlnou, materiálům pro pájení a k Design of Experiments. Dále se seznámit s požadavky na kontrolu kvality dle požadavků firmy Honeywell i s normami k technologiím pájení. Metodu Design of Experiments poté aplikovat na výrobu desky, pro optimalizaci výroby této desky.

V teoretické části této práce jsou uvedeny základní poznatky o pájení, zejména technologie strojního pájení vlnou. Metodika kontroly kvality podle norem i základy metody DOE pomocí „Taguchiho přístupu“.

V části práce „Metodika pro kontrolu kvality u strojního pájení vlnou“ jsou uvedeny zásady ESD a manipulace s DPS. Dále vizuální kontrola DPS pro pájení, osazení a součástky, kde jsou uvedeny závady, které při kontrole kvality nesmí nastat. Celá metodika je psaná pro závady možné u Třídy 2.

Aplikování DOE na výrobu desky je uvedeno v části „Praktická část Design of Experiments“. Její součástí je plánování experimentu, návrh experimentu, provedení experimentu, analýza experimentu, ověřovací testy a diskuze s vyhodnocením provedeného experimentu. V diskuzi je uvedeno doporučené nastavení po zhodnocení výsledků analýz. Doporučením je nastavit nástřik tavidla na 20 %, nastavit předehřev na 45 % a při pájení vybrané DPS mít zapnutou čipovou vlnu.

V poslední části práce „Metodika řešení“ je znázorněn postup při aplikaci DOE pro plnoplánový dvouúrovňový třífaktorový experiment. Její součástí je plánování experimentu a návrh experimentu, kde je uvedeno, jak by mohl další experiment vypadat. Další součástí je analýza experimentu s uvedením teoretického postupu, jak naměřená data analyzovat.

Na optimalizaci procesu s využitím Design of Experiments je potřeba pokračovat, získávat nové poznatky a metodu zdokonalovat. Dále by bylo možné využívat metodu a poznatky z této diplomové práce nejen u strojního pájení vlnou, ale i např. u šablonového tisku pájecí pasty, kde se v montážním procesu statisticky vyskytuje nejvíce defektů.

## SEZNAM LITERATURY

- [1] VALA, R. *Testování vlastností pájek v ochranné atmosféře*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 77s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.
- [2] SZENDIUCH, I. *Základy technologie mikroelektrotechnických obvodů a systémů*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2006. 379 s. ISBN 80-214-3292-6
- [3] AIM Metals & Alloys LP. *AIM* [online]. ©2013 [cit. 2013-12-14]. Dostupné na [www: <http://www.aimsolder.com/>](http://www.aimsolder.com/)
- [4] Alpha, an Alent plc Company. *Alpha* [online]. ©2013 [cit. 2013-12-14]. Dostupné na [www: <http://alpha.alent.com/>](http://alpha.alent.com/)
- [5] BALVER ZINN. *BALVER ZINN® COBAR®* [online]. [cit. 2013-12-14]. Dostupné na [www: <http://www.balverzinn.com/home.html>](http://www.balverzinn.com/home.html)
- [6] Kester. *Kester®* [online]. ©2013 [cit. 2013-12-14]. Dostupné na [www: <http://www.kester.com/>](http://www.kester.com/)
- [7] Kovohutě Příbram. *Kovohutě Příbram* [online]. [cit. 2013-12-14]. Dostupné na [www: <http://www.kovopb.cz/>](http://www.kovopb.cz/)
- [8] Senju Metal Industry Co., Ltd. *SMCI* [online]. ©2013 [cit. 2013-12-14]. Dostupné na [www: <http://www.senju-m.co.jp/en/>](http://www.senju-m.co.jp/en/)
- [9] STARÝ, J. *Montážní a propojovací technologie: MMOT*. [online – pracovní verze 100501]. [cit. 2013-12-14]. VUT Brno
- [10] IPC-A-610E CZ. *Kritéria přijatelnosti elektronických sestav*. Revize E-2010. PBT Rožnov p. R., s.r.o. Bannockburn, Illinois, USA: IPC, 2010
- [11] BLECHARZ, P. *Základy metody DOE (Taguchiho přístup)*. 1.vyd. Ostrava: Repronis pro P. Q. M., česko-švýcarská spol. s.r.o., 2005. 124 s. ISBN 80-7329-106-1
- [12] ŠPETÍK, Z. *Návrh a analýza techniky plánovaných experimentů I: Úvod do techniky plánovaných experimentů, experimenty na 2 úrovních faktorů*. Školící materiál pro technické pracovníky Tesla SEZAM, a. s., Rožnov p. R. 2001. 66s.
- [13] Somerset Solders Ltd. *Somerset ESD* [online]. [cit. 2014-05-16]. Dostupné na [www: <http://www.somersetsolders.co.uk/ESD-Wrist-Strap-and-ESD-footwear-tester>](http://www.somersetsolders.co.uk/ESD-Wrist-Strap-and-ESD-footwear-tester)
- [14] Safetyshop.cz. *Safetyshop.cz* [online]. [cit. 2014-05-16]. Dostupné na [www: <http://www.safetyshop.cz/p1431-esd-pozor-vyhrazeny-prostor-tabule>](http://www.safetyshop.cz/p1431-esd-pozor-vyhrazeny-prostor-tabule)

## SEZNAM ZKRATEK

ANOVA	( <i>ANalysis Of VAriance</i> ) – analýza rozptylu
DIP	dvouřadá pouzdra
DOE	( <i>Design Of Experiments</i> ) – metoda plánovaných experimentů
DOF	( <i>Degrees Of Freedom</i> ) – stupeň volnosti
DPS	deska plošných spojů
ESD	( <i>Electrostatic discharge</i> ) – elektrostatický výboj
FR4	označení základního materiálu použitého k výrobě DPS
HAL	( <i>Hot Air Leveling</i> ) druh povrchové úpravy desky
IPC	označení normy (tak jak u nás ČSN)
MSD	( <i>Mean Squared Deviation</i> ) – střední kvadratická odchylka.
S/N	( <i>Signal/Noise</i> ) – poměr signál/šum
SIP	jednořadá pouzdra
SMD	( <i>Surface Mount Device</i> ) – součástka pro povrchovou montáž
ROSE	( <i>Resistivity of Solvent Extraction</i> ) – odporová extrakce
VOC	( <i>Volatile Organic Compounds</i> ) - těkavé organické látky (obsahují alkohol)
VOC FREE	( <i>Volatile Organic Compounds</i> ) - bezalkoholové

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha A: Tabulky sesbíraných dat z provedení experimentu .....	2
Příloha B: Procentuální účinek jednotlivých faktorů podle Taguchiho metody .....	12

## Příloha A: Tabulky sesbíraných dat z provedení experimentu

1. experiment (A=1, B=1, C=1)		
ČÍSLO DESKY	CHYBY	POZNÁMKA
S0667699300534	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
S0667699300543	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
S0667699300536	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Jiné	x7
S0667699300541	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Jiné	x7
	Jiné	x8
S0667699300610	propojeni switche	
	propojeni trimru	
S0667699300434	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Jiné	x7
S0667699300607	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Jiné	x7
S0667699300622	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Jiné	x7
S0667699300606	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Jiné	x7
S0667699300623	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	zkrat na 6 pin konektoru	2 piny

2. experiment (A=1, B=2, C=2)		
ČÍSLO DESKY	CHYBY	POZNÁMKA
S0667699300605	propojeni switche	
	propojeni switche	
S0667699300624	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Jiné	x7
	zkrat na 6 pin konektoru	4 piny 2a2
S0667699300238	zkrat na 6 pin konektoru	2 piny 1a1
	Praporky	
S0667699300301	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	propojeni trimru	
	zkrat na 6 pin konektoru	3 piny 2a1
S0667699300522	propojeni trimru	
	Jiné	x7
	zkrat na 6 pin konektoru	2 piny 1a1
	Praporky	
S0667699300660	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	zkrat na 6 pin konektoru	3 piny 2a1
	Praporky	
S0667699300521	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	propojeni trimru	
	Jiné	x8
	zkrat na 6 pin konektoru	4 piny 2a2
	Praporky	
S0667699300661	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	propojeni trimru	
	zkrat na 6 pin konektoru	3 piny 2a1
	Praporky	
S0667699300520	propojeni trimru	
	zkrat na 6 pin konektoru	4 piny 2a2
	Praporky	
S0667699300662	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	zkrat na 6 pin konektoru	4 piny 2a2
	Praporky	



3. experiment (A=1, B=3, C=1')		
ČÍSLO DESKY	CHYBY	POZNÁMKA
S0667699300519	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Praporky	
S0667699300663	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	propojeni trimru	
	Praporky	
S0667699300517	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Jiné	x8
	zkrat na 6 pin konektoru	4 piny 2a2
	Praporky	
S0667699300665	zkrat na 6 pin konektoru	4 piny 2a2
	Praporky	
S0667699300516	Praporky	
S0667699300666	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Jiné	x8
	zkrat na 6 pin konektoru	2 piny 1a1
	Praporky	
S0667699300515	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Praporky	
S0667699300667	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Jiné	x8
	Jiné	trimr nadzvedly
	zkrat na 6 pin konektoru	4 piny 2a2
	Praporky	
S0667699300514	propojeni switche	
	zkrat na 6 pin konektoru	2 piny
S0667699300668	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Jiné	x8
	zkrat na 6 pin konektoru	4 piny 2a2
	Praporky	

4. experiment (A=2, B=1, C=2)		
ČÍSLO DESKY	CHYBY	POZNÁMKA
S0667699300513	propojeni trimru	
	Praporky	
S0667699300669	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Praporky	
S0667699300512	zkrat na 6 pin konektoru	2 piny 1a1
S0667699300670	propojeni switche	
	propojeni switche	
	zkrat na 6 pin konektoru	2 piny 1a1
	Praporky	
S0667699300484	propojeni trimru	
	zkrat na 6 pin konektoru	2 piny
	Praporky	
S0667699300485	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Praporky	
S0667699300482	propojeni switche	
	Jiné	trimr nadzvedly
	zkrat na 6 pin konektoru	4 piny 2a2
	Praporky	
S0667699300487	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	Jiné	x8
	Praporky	
S0667699300296	propojeni switche	
	zkrat na 6 pin konektoru	2 piny 1a1
	Praporky	
S0667699300243	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Jiné	x8
	Praporky	

5. experiment (A=2, B=2, C=1')		
ČÍSLO DESKY	CHYBY	POZNÁMKA
S0667699300295	propojeni switche	
	Praporky	
S0667699300244	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Jiné	x8
	Praporky	
S0667699300288	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Jiné	x8
	Praporky	
S0667699300251	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Praporky	
S0667699300289	zkrat na 6 pin konektoru	2 piny 1a1
	Praporky	
S0667699300250	zkrat na 6 pin konektoru	2 piny 1a1
S0667699300403	zkrat na 6 pin konektoru	2 piny 1a1
	Praporky	
S0667699300080	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Jiné	x8
	Praporky	
S0667699300286	propojeni trimru	
S0667699300253	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Praporky	

6. experiment (A=2, B=3, C=1)		
ČÍSLO DESKY	CHYBY	POZNÁMKA
S0667699300287	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	propojeni trimru	
S0667699300252	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Jiné	x8
S0667699300141	propojeni switche	
	propojeni trimru	
S0667699300084	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Jiné	x8
	zkrat na 6 pin konektoru	2 piny 1a1
	Praporky	
S0667699300142	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	propojeni trimru	
S0667699300083	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	propojeni trimru	
	Jiné	x7
	Jiné	x8
	zkrat na 6 pin konektoru	2 piny
S0667699300402	Jiné	trimr nadzvedly
S0667699300081	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Jiné	x8
	zkrat na 6 pin konektoru	2 piny 1a1
	Praporky	
S0667699300136	Praporky	
S0667699300137	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Jiné	x8
	zkrat na 6 pin konektoru	2 piny 1a1
	Praporky	

7. experiment (A=3, B=1, C=1')		
ČÍSLO DESKY	CHYBY	POZNÁMKA
S0667699300139	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Praporky	
S0667699300086	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	propojeni trimru	
	Jiné	x7
	Jiné	x8
S0667699300145	NIC	
S0667699300090	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	zkrat na 6 pin konektoru	2 piny 1a1
	Praporky	
S0667699300040	propojeni switche	
	Jiné	trimr nadzvedly
S0667699300043	Praporky	
S0667699300036	propojeni switche	
S0667699300042	propojeni switche	
S0667699300166	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	zkrat na 6 pin konektoru	2 piny 1a1
S0667699300121	zkrat na 6 pin konektoru	4 piny 2a2

8. experiment (A=3, B=2, C=-1)		
ČÍSLO DESKY	CHYBY	POZNÁMKA
S0667699300164	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Jiné	x7
	S0667699300123	propojeni switche
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	propojeni trimru	
	Jiné	x8
S0667699300162	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	propojeni trimru	
	zkrat na 6 pin konektoru	4 piny 2a2
S0667699300125	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	propojeni trimru	
	Jiné	x7
	Jiné	x8
S0667699300345	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Praporky	
S0667699300271	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	propojeni trimru	
	Jiné	x7
S0667699300748	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	Jiné	x7
	S0667699300653	propojeni switche
propojeni switche		
propojeni trimru		
propojeni trimru		
Praporky		
S0667699300339	propojeni switche	

S0667699300339 (k)	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	propojeni trimru	
	Praporky	
S0667699300273	propojeni switche	
	propojeni trimru	
	propojeni trimru	
	Jiné	x7
	Praporky	

9. experiment (A=3, B=3, C=2)		
ČÍSLO DESKY	CHYBY	POZNÁMKA
S0667699300338	zkrat na 6 pin konektoru	3 piny 2a1
	Praporky	
S0667699300346	propojeni trimru	
	Praporky	
S0667699300337	NIC	
S0667699300347	propojeni switche	
	propojeni switche	
	propojeni switche	
	praporky	
S0667699300336	Jiné	x7
S0667699300348	zkrat na 6 pin konektoru	2 piny 1a1
	praporky	
S0667699300335	NIC	
S0667699300349	zkrat na 6 pin konektoru	2 piny 1a1
S0667699300523	NIC	
S0667699300659	propojeni trimru	
	zkrat na 6 pin konektoru	2 piny 1a1



## Příloha B: Procentuální účinek jednotlivých faktorů podle Taguchiho metody

Exp/faktory	A	B	C	Výsledky	Switch	Trimr	X7	X8	Zkrat	Prap.	Jiné
1	1	1	1	y1	31	10	6	1	1	0	0
2	1	2	2	y2	19	11	2	1	24	7	0
3	1	3	1'	y3	22	8	0	4	18	9	1
4	2	1	2	y4	20	5	0	2	8	9	1
5	2	2	1'	y5	21	6	0	3	3	8	0
6	2	3	1	y6	24	11	1	5	4	4	1
7	3	1	1'	y7	14	4	1	1	6	3	1
8	3	2	1	y8	31	17	5	2	4	4	0
9	3	3	2	y9	3	2	1	0	5	4	0

POZN.: jiné – je označení pro nadzvednutí součástky

$$A[\%] = \frac{A}{A + B + C} * 100$$

$$B[\%] = \frac{B}{A + B + C} * 100$$

$$C[\%] = \frac{C}{A + B + C} * 100$$

$$A = |A_{max} - A_{min}|$$

$$B = |B_{max} - B_{min}|$$

$$C = |C_{max} - C_{min}|$$

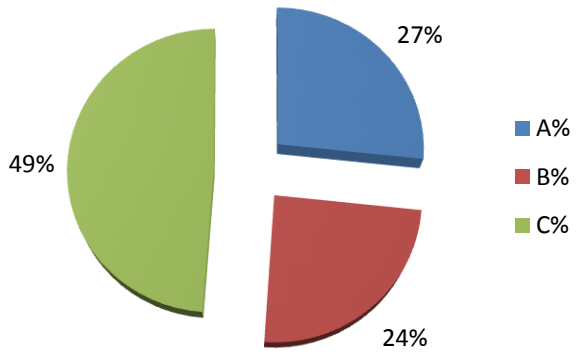
$$A1 = \left(\frac{y1+y2+y3}{3}\right), A2 = \left(\frac{y4+y5+y6}{3}\right), A3 = \left(\frac{y7+y8+y9}{3}\right)$$

$$B1 = \left(\frac{y1+y4+y7}{3}\right), B2 = \left(\frac{y2+y5+y8}{3}\right), B3 = \left(\frac{y3+y6+y9}{3}\right)$$

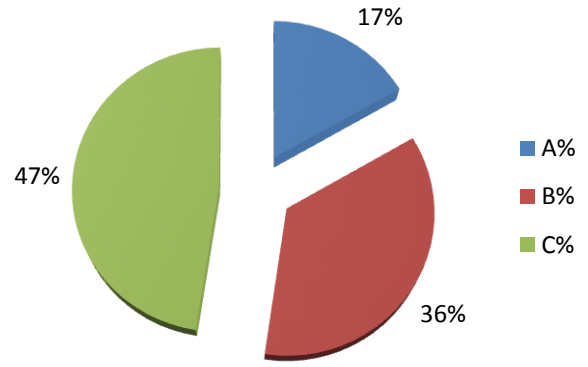
$$C1 = \left(\frac{y1+y6+y8}{3}\right), C2 = \left(\frac{y2+y4+y9}{3}\right), C1' = \left(\frac{y3+y5+y7}{3}\right)$$

	<b>SWITCH</b>	<b>TRIMR</b>	<b>X7</b>	<b>X8</b>	<b>ZKRAT</b>	<b>PRAP.</b>	<b>JINÉ</b>
<b>A1</b>	24,00	9,67	2,67	2,00	14,33	5,33	0,33
<b>A2</b>	21,67	7,33	0,33	3,33	5,00	7,00	0,67
<b>A3</b>	16,00	7,67	2,33	1,00	5,00	3,67	0,33
<b>Amax</b>	24,00	9,67	2,67	3,33	14,33	7,00	0,67
<b>Amin</b>	16,00	7,33	0,33	1,00	5,00	3,67	0,33
<b>B1</b>	21,67	6,33	2,33	1,33	5,00	4,00	0,67
<b>B2</b>	23,67	11,33	2,33	2,00	10,33	6,33	0,00
<b>B3</b>	16,33	7,00	0,67	3,00	9,00	5,67	0,67
<b>Bmax</b>	23,67	11,33	2,33	3,00	10,33	6,33	0,67
<b>Bmin</b>	16,33	6,33	0,67	1,33	5,00	4,00	0,00
<b>C1</b>	28,67	12,67	4,00	2,67	3,00	2,67	0,33
<b>C2</b>	14,00	6,00	1,00	1,00	12,33	6,67	0,33
<b>C1'</b>	19,00	6,00	0,33	2,67	9,00	6,67	0,67
<b>Cmax</b>	28,67	12,67	4,00	2,67	12,33	6,67	0,67
<b>Cmin</b>	14,00	6,00	0,33	1,00	3,00	2,67	0,33
<b>A</b>	8,00	2,34	2,34	2,33	9,33	3,33	0,34
<b>B</b>	7,34	5,00	1,66	1,67	5,33	2,33	0,67
<b>C</b>	14,67	6,67	3,67	1,67	9,33	4,00	0,34
<b>A[%]</b>	26,66	16,70	30,50	41,09	38,89	34,47	25,19
<b>B[%]</b>	24,46	35,69	21,67	29,45	22,22	24,12	49,63
<b>C[%]</b>	48,88	47,61	47,83	29,45	38,89	41,41	25,19
	<b>VŠE</b>			<b>VŠE – BEZ JINÉ</b>			
<b>A[%]</b>	30,50			31,39			
<b>B[%]</b>	29,61			26,27			
<b>C[%]</b>	39,89			42,35			

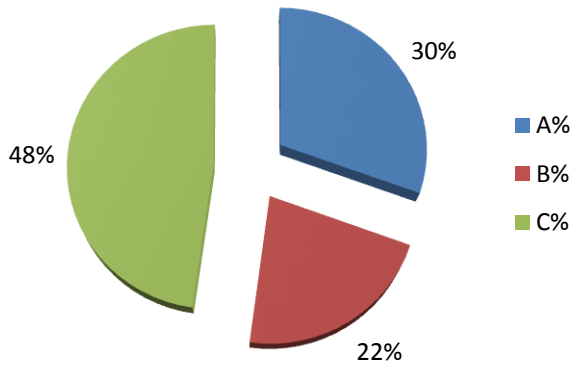
**SWICH**



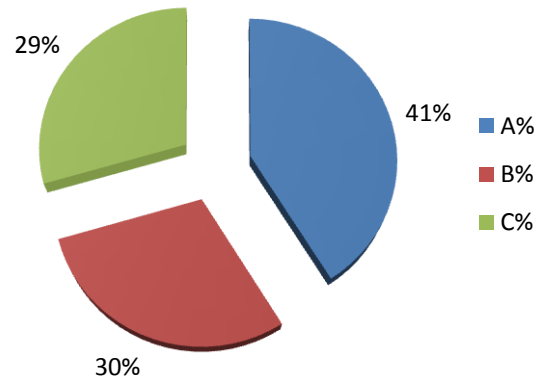
**TRIMR**



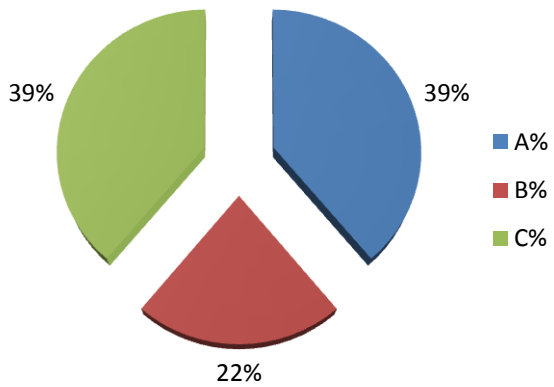
**X7**



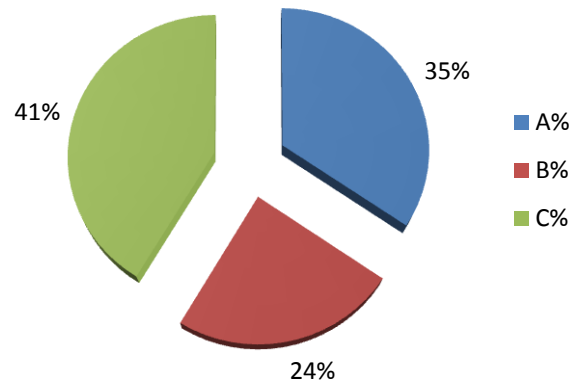
**X8**



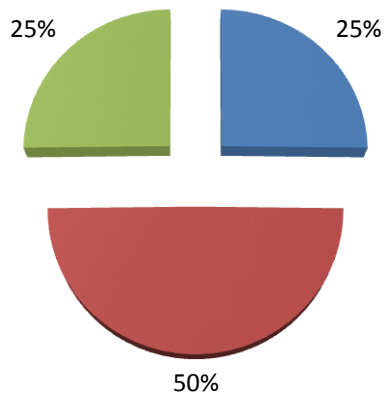
**ZKRAT**



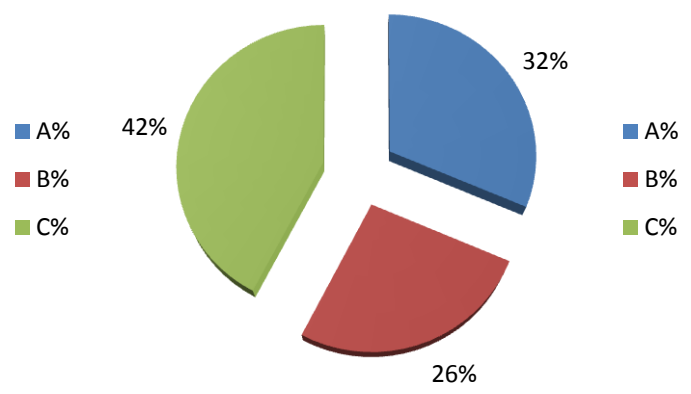
**PRAP.**



### JINÉ



### VŠE - BEZ JINÉ



### VŠE

